

星载多角度偏振成像仪光学系统设计

杨伟锋^{1,2} 洪 津² 乔延利²

¹中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026

²中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 星载多角度偏振成像仪是一种超广角画幅式低畸变成像的偏振传感器。介绍了多角度偏振成像仪的基本工作原理,从保证偏振测量精度和大视场成像质量要求出发,分析了光学系统的设计难点及光学系统的结构型式,最终采用了反远距型像方远心光路结构。根据光路结构的像差特点,采用非球面镜校正畸变及像散,改善像面照度的均匀性,依据这样的思路,运用光学设计软件对多角度偏振成像仪的光学系统进行了光线追迹和优化,其工作光谱范围为420~930 nm,全视场角为118.74°,焦距为4.833 mm,相对孔径为1:4,并对设计系统进行了像质评价,结果表明,光学系统的传递函数在全视场大于0.5@22.22 lp/mm,最大畸变为0.9669%,像面相对照度均匀性高于97%,经过光学系统的加工制造装调,成像质量满足实际任务要求。

关键词 光学设计; 偏振; 多角度; 超广角; 低畸变

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822005

Optical Design of Spaceborne Directional Polarization Camera

Yang Weifeng^{1,2} Hong Jin² Qiao Yanli²

¹Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Spaceborne directional polarization camera is a super-wide-angle polarization and low-distortion imaging sensor. First, the working principle of the spaceborne directional polarization camera has been introduced. In order to guarantee the requirements of polarization measurement accuracy and the wide field of view imaging quality, the design difficulties of the optical system have been analyzed and finally a retro-type image side telecentric optical structure has been adopted. Due to the aberration characteristics of the optical path structure, aspheric lens has been used to correct distortion and astigmatism which improves the uniformity of the image plane illuminance. Depending on this method, ray tracing and optimization for spaceborne directional polarization camera has been used by the optical design software. The spectral range is 420~930 nm. The whole field of view angle is 118.74°. The focal length is 4.833 mm. The relative aperture is 1: 4. The result shows that the modulation transfer function (MTF) of the optical system in the whole field of view is greater than 0.5@22.22 lp/mm, the maximum distortion is 0.9669% and the degree of surface unevenness of image is higher than 97%. After mounting, aligning and fabricating, the image quality of optical system completely satisfies the requirements.

Key words optical design; polarization; multi-angle; super-wide-angle; low distortion

OCIS codes 220.3620; 120.0280; 120.4640; 280.1100

1 引 言

大气散射辐射具有明显的偏振特性,大气偏振特性及其变化与大气本身的光学和微物理特性密切相

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-04-08

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY2011060405-1)

作者简介: 杨伟锋(1976—),男,博士研究生,副研究员,主要从事偏振遥感仪器的工程光机设计以及多光谱成像系统设计方面的研究。E-mail: wfyang@aiofm.ac.cn

导师简介: 乔延利(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感辐射定标、大气校正等方面的研究。

E-mail: yljiao@aiofm.ac.cn

关,使得偏振遥感技术可以应用于影响全球气候变化的气溶胶和云的光学、微物理特性参数探测,多角度偏振成像仪正是基于此特殊的应用需求而发展的一种偏振探测仪器。星载多角度偏振成像仪是一种多光谱、多角度且具备偏振测量功能的超广角光谱偏振成像系统,通过多角度偏振成像仪可以获取大气气溶胶及云的多角度偏振辐射成像信息,基础研究表明,增加了多角度偏振信息的遥感探测可以获得更高的探测精度,而且还可以提供光谱和辐射强度信息^[1]。

在国际上,欧美等发达国家均开始了从卫星平台上采用偏振遥感技术对大气气溶胶进行探测和定量分析研究,20世纪90年代末美国开始研制地球观测扫描偏振计(EOSP)、机载扫描偏振计(RSP)、星载气溶胶偏振计(APS)等传感器,美国的APS载荷装载于Glory卫星平台,于2011年3月发射,由于运载火箭的原因失败。法国先后有POLDER-1、POLDER-2和PARASOL带有偏振探测通道的载荷在轨运行。在偏振探测技术方案上,国际上美国APS和法国POLDER仪器采取了2种完全不同的技术路线,美国的APS仪器采用9个波段以多个视角进行综合测量其创新的光学设计将使得它能够在扫描地球表面的同时瞬时采集光谱和偏振测量数据,APS的光学方案是利用多路集束平行光学系统,通过渥拉斯顿棱镜进行偏振分析,二元探测器探测景物信号,APS偏振测量精度的保证是在于其精确调整多路光学系统的光轴互相平行以及采用偏振和非偏振参考源^[2]。法国的POLDER仪器概念基于一个宽视场的望远光学系统、一个带有光谱滤光片和偏振滤光片的旋转轮和一个帧转移面阵电荷耦合器件(CCD)探测器,该仪器具有测量大气气溶胶及云的可见光及近红外光谱偏振成像信息,同时可以从13个方向观察一次通过的目标,POLDER偏振测量精度的保证是基于其棱镜滤光片的精密设计、装调以及飞行前的定标^[3]。

本文介绍的星载多角度偏振成像仪类似于法国的POLDER是一种大视场画幅式低畸变成像的偏振传感器,其任务目的是通过仪器的超大角度在轨对地观测获取地球环境信息,偏振测量精度和大视场成像是重要的指标要求,在光学系统方案上选择透射式光学系统,采用反远距结构,根据在运动平台上三次偏振测量须进行像元配准,采用像方远心光路,在成像物镜的前组设置抛物面型的非球面透镜,校正系统畸变及像散,改善像面照度的均匀性,依据这样的思路,设计了一个星载多角度偏振成像仪光学系统,通过光学设计软件对光学系统成像质量进行了分析和评价,结果表明满足实际任务要求。

2 工作原理及技术指标

2.1 工作原理

仪器设计上采用面阵CCD探测器进行大视场画幅式成像,偏振信息的获取则采用分时工作方式,多角度偏振成像仪的数据获取方式是这样进行的:卫星在轨飞行时,通过检偏器-滤光片轮的转动,按波段顺序逐一测量。由于观测的目标是地球环境系统,几乎没有偏振光的相位信息,所以通过测量能够得到的是不完全的斯托克斯向量。因此要了解某一波段,在某一方向的反射光偏振态只需要三次测量,偏振测量特别强调“同时测量同一目标”,多角度偏振成像仪是“准同时测量同一目标”,通过光楔滤光片用来补偿卫星运动产生的像移,保证在卫星飞行时同一波段的三幅图像是来自同一目标^[4]。由三幅图像对应像元的输出数据,通过预先确定的测量矩阵即可得到被测目标在某一方向上的偏振信息和辐射量,也就是所说的斯托克斯向量(S_0, S_1, S_2)。

检偏器-滤光片轮旋转一周,可以得到15幅图像,其第一幅为暗背景图像,对应于CCD的暗电流参数,其他14幅对应于5个光谱和9个偏振波段,被测目标的方向反射和偏振分布函数是通过仪器在轨飞行的大角度观测实现的。同一目标可以在多角度方位观测到,把那些测量结果联合起来进行分析即可得到反射辐射和偏振的分布函数,如图1所示。

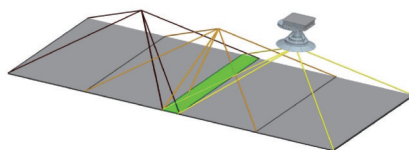


图1 多角度信息获取原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi-angle information achievement

2.2 技术指标

仪器工作轨道高度 $H=708$ km,要求沿轨和穿轨方向视场均为 100° ,星下点空间分辨率优于 3.5 km,选用的探测器为帧转移 CCD 探测器,像元数 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元大小为 $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$,光谱范围为 $420 \sim 930 \text{ nm}$ 。通过在滤光片转轮上设置不同中心波长的窄带滤光片,共分成 8 个光谱波段,其中心波长分别为 443 nm 、 490 nm (P)、 565 nm 、 670 nm (P)、 763 nm 、 765 nm 、 865 nm (P)、 910 nm ,其中 490 nm 、 670 nm 、 865 nm 为偏振测量波段,其他为光谱测量波段。根据总视场及像元尺寸,光学系统焦距为 4.833 mm :

$$f' = \frac{512 \times 22.5 \times 10^{-3}}{2 \tan 50^\circ} \quad (1)$$

进而计算得对角线半视场角 θ 为 59.319° :

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{(512 \times 22.5 \times 10^{-3})^2 + (512 \times 22.5 \times 10^{-3})^2}}{2 \times 4.833} \quad (2)$$

光学系统设计时取 $\theta = 59.37^\circ$ 。

由轨道高度、焦距、像元尺寸计算星下点空间分辨率:

$$\frac{22.5 \times 10^{-3} \text{ mm}}{V_{\text{GSD}}} = \frac{4.833 \text{ mm}}{708 \text{ km}} \quad (3)$$

空间分辨率为 3.296 km ,幅宽 1687.552 km 。相对孔径代表着光学系统收集能量大小的能力,综合考虑分辨率和信噪比要求,取相对孔径为 $1:4$ 。多角度偏振成像仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 多角度偏振成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of directional polarization camera optical system

Spectral range/nm	433~453 nm, 480~500 nm (P) 555~575 nm, 660~680nm (P) 758~768 nm, 745~785 nm 845~885 nm (P), 900~920 nm
Field of view /($^\circ$)	118.74 $^\circ$
Focal length of system /mm	4.833
Back focal length /mm	≥ 30
Relative aperture	1:4
Distortion	$\leq 1\%$
Relative illumination	$\geq 97\%$
Modulation transfer function@22.5 lp/mm	≥ 0.6
Detector array size /pixel	512 \times 512
Detector array size / μm	22.5

3 光学系统设计考虑

一般来说,成像光学系统的相对孔径、视场和焦距是相互关联和相互制约的。广角光学系统在大相对口径和长焦距的情况下难以获得好的成像质量。由多角度偏振成像仪的设计指标可以看出,多角度偏振成像仪的物镜是超广角的,全视场为 118.74° ,因此只能是中等相对孔径和短焦距的物镜。从大视场偏振成像和保证偏振测量精度两个方面,多角度偏振成像仪还需重点考虑以下几个方面。

后截距的长度必须能够在物镜和探测器间安装检偏器-滤光片轮,为了获得足够大的后工作距离,光学系统须采用反远距结构^[5],如图 2 所示,反远距就是光学系统的后截距大于其焦距,采用负正透镜的分离,负光焦度的透镜作为前组,正光焦度的透镜作为后组,当平行光束入射时,经前组发散后,被后组成像在焦面上,这样,就使得整个系统的主面向后移出物镜之外,从而获得比焦距还要长的后截距,而视场角很大的轴外光束经前组发散后,相对于后组来说视场角变小,从而达到广角的目的。反远距之比越大,光楔滤光片的夹角越小,从而光楔滤光片对成像质量的影响也就越小。

偏振测量强调同时测量同一目标,在卫星平台通过采用旋转偏振片进行三次偏振测量的技术方案中,是通过光楔滤光片补偿卫星运动位移,达到准同时测量同一目标,补偿只是针对相邻的三个偏振方向成像观测时而言的,对于同一波段中的三个滤光片,取第二个滤光片成像的位置为基准,第一个和第三个分别向前和向后补偿一定角度。为保证这样的探测精度,光学系统需采用像方远心光路^[5],如图 3 所示,像方远心光路是将孔径光阑放置在光学系统的物方焦平面上,而像方的主光线平行于光轴。其优点在于:1) 如果 CCD

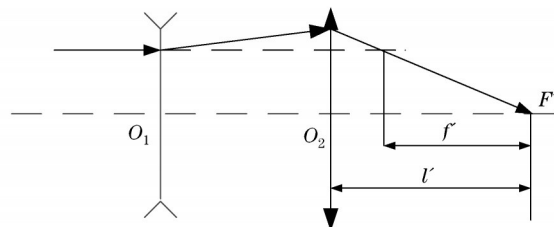


图2 反远距型结构

Fig.2 Inverted telephoto structure

探测器不能准确定位于焦平面时,像点的中心位置不改变;2) 在焦平面前的光楔形滤光片可供所有像元向同一方向改变相同的距离;3) 更为重要的是,在远心光路中加入检偏器不会因双向衰减不同而产生 Maltese Cross 现象,这种现象将影响偏振测量精度^[6]。

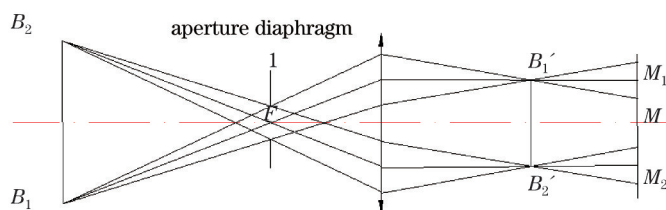


图3 像方远心系统

Fig.3 Telecentric system in image space

多角度偏振成像仪的物镜为超广角物镜,如果按照常规设计,其像面上边缘照度下降得将非常厉害,这样的照度下降会降低偏振测量的动态范围,这对于进行偏振测量是不能允许的。

像面照度的公式为:

$$E' = E_0 k_1 k_2 \cos^4 \alpha, \quad (4)$$

式中 K_1 为几何渐晕系数; K_2 为轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比,即像差渐晕系数; E_0 为轴上像点照度; α 为像方半视场角。可以看出,轴外像点照度随像方视场角的增大呈四次方的关系下降。屈恩世等^[7]通过数学分析和模拟验证得出像面照度分布取决于物方视场角而非像方视场角,提高像面照度应该采用物方远心而非像方远心,对于无穷远-有限共轭的系统,物方远心根本无法做到,因此对于类似系统,像面照度基本随设计视场的增大呈 $\cos^4 \alpha$ (物方视场)规律下降,对于 $\alpha=59.37^\circ$,像面边缘照度只有其中心照度的 6.7%,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^[7],从多角度偏振成像仪的应用要求及其技术指标,采用渐变滤光片虽然能使整个视场内的像面照度比较均匀,相当于缩小了原系统的相对孔径,直接导致仪器的信噪比不能满足要求;而采用桶形畸变的方式,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,但是对于进行大视场情况下的偏振测量是不能接受的,畸变会增大偏振测量中的像元对准误差,直接导致光楔不可用,并且大的畸变不利于视场定标,不能实现多角度观测。

从分析可以看出,单纯的采用一种光路构型,难以在大视场成像情况下获得均匀的像面照度和高的成像质量,根据像面照度公式,均匀像面照度的获得是受几个因素的共同影响。在光学系统的前组远离光栏处使用非球面校正与视场有关的高级象散和畸变,同时产生光瞳像差,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,整个光学系统采用了反远距的像方远心光路,正是这些设计可以有效减缓大视场像面照度的降低,或者说提高像面照度的均匀性,成像系统基本上没有 $\cos^4 \alpha$ (视场)的影响,也就是说物方的出射度相同,焦平面上的照度基本相同^[8-11]。

4 光学系统设计结果及成像质量分析

4.1 光学系统设计结果

根据分析,多角度偏振成像仪采用反远距结构,设计后的光学系统分成两大组,由 12 片透镜组成,采用了熔石英(F_silica)、ZK6、ZF7、BaK1、BaF3 等 5 种光学玻璃,如图 4 所示。设计的光学系统焦距为 4.833 mm, F 数为 4,在所有波段,光学系统的筒长为 360.63 mm,透镜最大直径 220 mm,后截距为 32.54 mm。

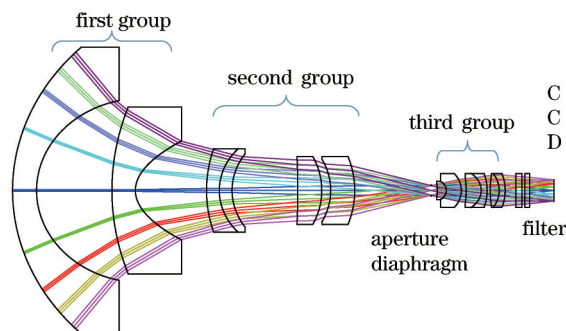


图4 光学系统结构

Fig.4 Structure of the optical system

孔径光阑前的透镜组称为前组,其后的透镜组称为后组。前组具有负光焦度,后组具有正光焦度,前组的第一组为发散透镜,第二组与第一组形成无焦系统,它们两组所成的作用是缩小视场角范围。第三组是成像用的会聚透镜。孔径光阑放置在第三组成像透镜的前焦面上,以形成了像方远心光路结构。前组实质上为一扩束系统,把大视场的细光束平行光转换成小视场的粗光束平行光,而且这种扩束比不能过大,也不能过小,必须适中。所谓适中是从像差平衡和物镜必须具备的特点这一意义上来权衡的。从设计的角度来说,前组的最大困难是因大视场产生的大像散和大畸变。像散使成像模糊,畸变使物体的像失真。为解决像散、畸变问题,在前组光学透镜中我们引入非球面。前组的第一个透镜是起保护罩的作用,选用耐辐照性能最好的熔石英材料,因为熔石英具有良好的理化性能及耐辐照性能,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。第二个透镜是前组的关键光学元件,也是整个系统的关键元件,它的前表面为球面,后表面为抛物面。非球面透镜的材料选择成都光明生产的ZK6玻璃,ZK6玻璃材料折射率适中且密度较小,易于加工制造,正是这一非球面透镜,加上适当选择的光学材料,才使得前组的像散和畸变达到基本校正。后组由三个双胶合透镜组成,对前组的剩余像散、剩余畸变以及其他像差给予平衡,并把物体成像到焦平面上。

4.2 光学系统成像质量分析

多角度偏振成像仪是大像差成像系统,但必须要满足应用要求,成像质量评价是以各视场的弥散斑、各波段的调制传递函数(MTF)、畸变以及像面照度作为评判。通过443、670、865、910 nm 4个波段的点列图、MTF曲线对系统进行评价。光学系统的点列图如图5所示。

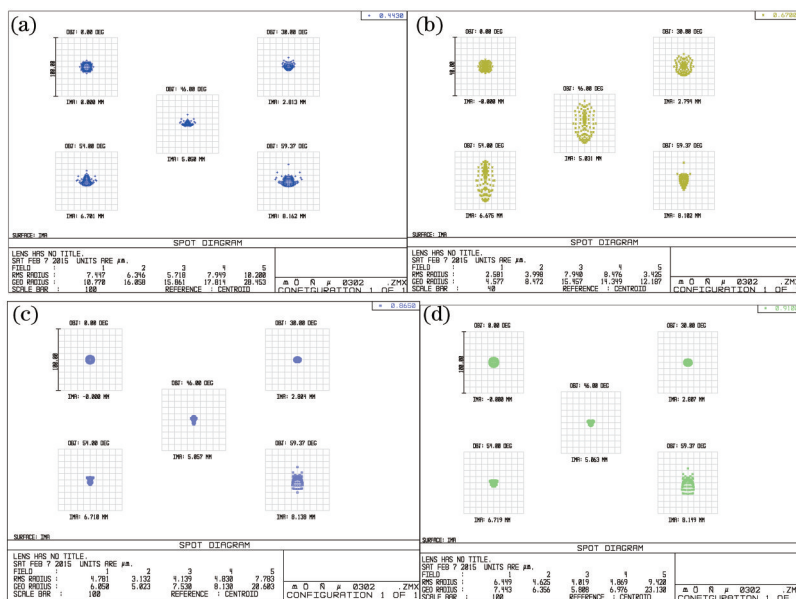


图5 光学系统点列图。(a) 443 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm; (d) 910 nm

Fig.5 Spot diagram of optical system. (a) 443 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm; (d) 910 nm

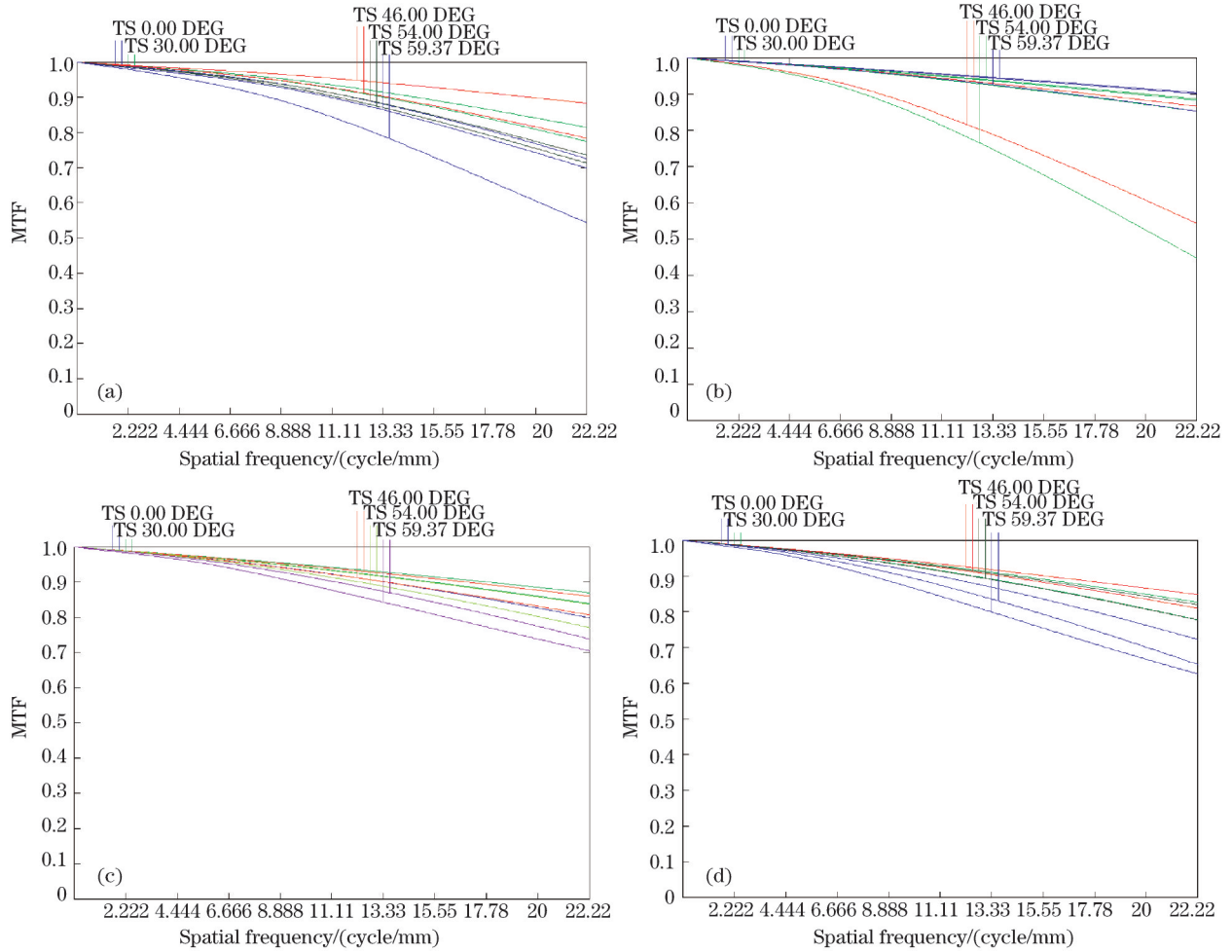


图6 光学系统传递函数曲线。(a)443 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm; (d) 910 nm

Fig.6 MTF curves of the optical system. (a)443 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm; (d) 910 nm

以上列出了成像物镜的弥散斑以及 MTF 随空间频率增加的变化情况。可以看出,各波段的弥散斑直径都小于一个像元直径 $22.5\mu\text{m}$,在探测器奈奎斯特采样频率为 22.22lp/mm 的条件下,MTF 平均值(子午面和弧矢面 MTF 的平均值)大于 0.5,满足应用要求,表明光学系统成像质量良好。

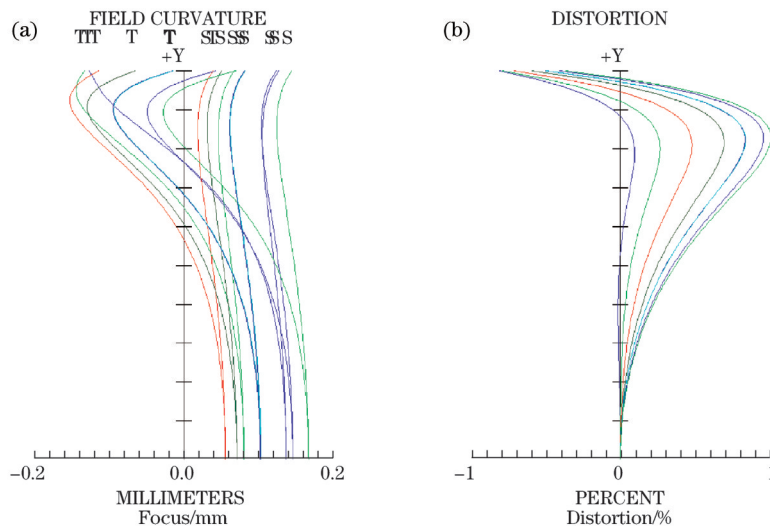


图7 (a) 畸变及; (b) 场曲

Fig.7 (a) Distortion and (b) curvature

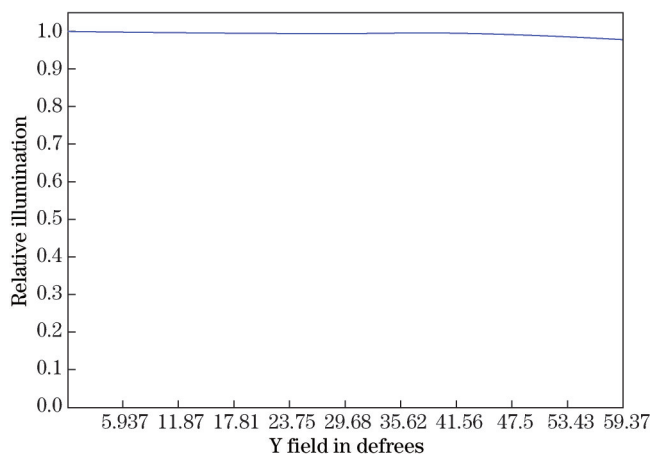


图8 像面相对照度

Fig.8 Relative illumination of image plane

图7列出了成像物镜的场曲和畸变曲线图,从0°视场到59.37°视场,在图中可以发现最大的百分比畸变出现在波长为910 nm、48.6424°视场,百分比畸变为0.9669%。图8给出像平面上相对照明变化情况。从图中估计出视场边缘的相对照度相当于视场中心的0.98,满足光学系统指标要求。

4.3 检偏-光楔滤光片设计

检偏器-滤光片转轮也是光学系统的重要组成部分,要获得不完全的斯托克斯向量,对一个波段至少要测量三次。通过检偏器和滤光片的正确组合,然后通过轮子的转动就能达到间接测量斯托克斯向量的目的,或者说通过轮子的转动,检偏器和滤光片起到两个作用:形成3×3的测量矩阵和三幅图像来自同一目标^[1]。通过光楔滤光片将-60°偏振方向和+60°偏振方向分别向前和向后补偿一定角度,这个角度,按透镜光学结构设计,光楔的角度大小约为6.7',经过光学追迹,各个视场点的质心点位移如表2所示,位移精度满足要求。

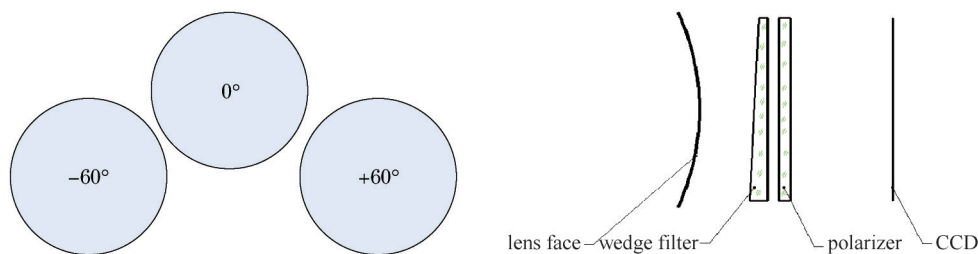


图9 滤光片-检偏器安装图

Fig.9 Installation diagram of filter and polarizer

表2 质心点位移

Table 2 Centroidal displacement

Waveband	Field of view				
	0°	30°	46°	54°	59.37°
490 nm	22.579 μm	22.572 μm	22.569 μm	22.567 μm	22.566 μm
670 nm	22.578 μm	22.577 μm	22.572 μm	22.568 μm	22.569 μm
865 nm	22.578 μm	22.576 μm	22.571 μm	22.567 μm	22.567 μm

5 结 论

多角度偏振成像仪已成为大气气溶胶遥感的迫切需求,根据卫星平台大气气溶胶多角度偏振探测的要求,提出了采用反远距像方远心光路,并利用光阑像差产生有效的像差渐晕方法提高边缘视场的照度,并通过光学系统进行公差分析,依据现有的加工装调水平,特别是非球面透镜的加工制造以及检测,合理设计,保证了光学系统的加工装调符合现有的技术水平,具有较好的工程实施性,光学系统经加工装调完成后,成像质量优良,实测MTF全视场大于0.5,畸变小于1%,相对照度大于97%,像元位移精度0.1 pixel,符合多角度偏振成像仪的指标要求。

参 考 文 献

- 1 Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Cheng Tianhai, *et al.*. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(7): 1-8.
顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 1-8.
- 2 Richard J Peralta, Carl Nardell, Brian Cairns, *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission[C]. SPIE, 2007, 6786: 67865L.
- 3 Y Andre, Jean-Marc Laherrere, Thierry Bret-Dibat, *et al.*. Instrumental concept and performances of the POLDER Instrument[C]. SPIE, 1994, 2572: 79-90.
- 4 He Hucheng, Ji Yiqun, Zhou Jiankang, *et al.*. Optical design of decentered aperture-divided polarization imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622005.
贺虎成, 季轶群, 周建康, 等. 偏心分孔径偏振成像光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0622005.
- 5 Zhang Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 6 Rudlf Kingslake. *Optical System Design*[M]. New York: Academic Press, 1983.
- 7 Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong, *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1364-1368.
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.
- 8 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0822001.
巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0822001.
- 9 Chen Wei, Zheng Yuquan, Xue Qingsheng. Optical system design of wide field of view and large relative aperture hyperspectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0222003.
陈 伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0222003.
- 10 Yao Gang, Tang Tianjin, Huang Ying. Optical system design used for the near infrared remote sensing with large field of view and small F number[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 107-110.
姚 罡, 汤天瑾, 黄 颖. 大视场大相对孔径近红外观测相机光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 107-110.
- 11 Xue Qingsheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 15-21.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 15-21.

栏目编辑: 韩 峰