宽光谱、大视场小畸变望远系统设计

马洪涛,张晓辉,韩 冰

(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:设计了一个应用于成像光谱仪的望远系统,针对成像光谱仪的特点,由前置望远镜及后置光 谱仪组成。前置望远系统的参数以及成像质量对整个成像光谱仪应用显得非常重要。设计了一个谱段 范围 1~2.5 μm、视场为 28.1°×0.3°、相对口径为 1/4、焦距长度为 60 mm 的望远系统。系统在谱段 1~2.5 μm 宽谱段范围内通过玻璃的匹配校正了色差及二级光谱,畸变控制在 0.2%以内,很好地保证 了与后续光谱仪的对接,此设计可用于航空领域进行大视场、高分辨率成像。

关键词:成像光谱仪; 宽光谱; 大视场; 小畸变

中图分类号: O433 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)07-1754-04

Design of telescope system with a wide spectrum, large field and small distortion

Ma Hongtao, Zhang Xiaohui, Han Bing

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

Abstract: In view of the characteristics of the imaging spectrometer, a telescope system applied to the imaging spectrometer was designed, which was composed of a pre-telescope and post spectrometer. Pre-telescope system parameters and imaging quality of the application of the imaging spectrometer is very important. Designed a spectral range of $1-2.5 \mu m$, field of view of $28.1^{\circ} \times 0.3^{\circ}$, a relatively large diameter of 1/4, 60 mm focal length of the telescope system. Systems in a wide spectral $1-2.5 \mu m$ spectral range by the glass and two matching spectral correction of chromatic aberration, distortion control at 0.2%, to ensure good follow-up spectroscopy with the butt, could be used for aviation the large field, high-resolution imaging.

Key words: imaging spectrometer; wide spectrum; large field; small distortion

收稿日期:2012-11-10; 修订日期:2012-12-08

作者简介:马洪涛(1980-),男,助理研究员,硕士,主要从事航天光机系统设计、检测、装调方面的研究。Email:mhtgjs@163.com

(2)

0 引 言

光谱成像技术开始于 20 世纪 80 年代,由于其 特有的成像和光谱探测的优点,已经广泛应用于国 民经济及国防建设的各个领域。目前,世界各国已经 研发了十几台航空用成像光谱仪^{[11},比较著名的有 AVRIS、CASI、AIS、HYDICE、OCEAN-PHILIS 等。高 分辨率成像光谱仪的光学系统由前置望远光学系统 和后端光谱仪光学系统组成。成像光谱仪的分辨率 以及视场角都由前置望远系统决定。因此设计出好 的前置望远系统对成像光谱仪有着重要的意义。

成像光谱仪谱段的范围一般分为 0.4~1 μm 和 1~2.5 μm 两种,应用于成像光谱仪的望远镜视场可 以做到 20°左右,焦距在 150 mm 左右^[2-3],随着视场 的增大,成像系统将难以避免出现畸变。这种像差对 光谱仪的性能具有很大的影响,必须在设计过程中 就要考虑对其进行矫正。文中根据对矿产勘查的需 求,设计了一个成像光谱仪的前置望远系统,该系统 在具有宽光谱、大视场、长焦距特性的同时能够畸变 矫正到 0.15%左右,这对于该系统的实际应用是非 常有利的。

1 前置望远系统的参数计算

根据对矿产勘查的需要及国内外航空领域的光 谱仪的参数、市场上常见的的 CCD 器件参数,可确 定成像光谱仪设计要求如下:

谱段范围为 1~2.5 μm、探测器像元尺寸为 30 μm、 像元数为 1000×256 个、地面像元分辨率为 6 m,轨 道高度为 12 km。

根据几何光学理论,可以得知系统焦距、探测器 像元尺寸、轨道高度、地面像元分辨率这几个参数的 关系如下:

$$f' = \frac{b}{\sigma} h \tag{1}$$

式中:b为探测器像元尺寸; σ 为地面像元分辨力;h 为卫星轨道高度。

通过公式(1)可算出成像光谱仪前置望远系统的 焦距为 60 mm。

系统视场角由探测器像元尺寸、探测器像元数 以及系统焦距共同决定,其关系式如下: w=arctan(nb/2/f')

式中:b为探测器像元尺寸;n为探测器像元数;f'为 系统焦距。

将系统设计参数代入公式(2)可计算得到所设计 的成像光谱仪前置望远系统的视场角为 28.1°×0.3°。

光学系统的另一个关键参数相对孔径 D/f′,可以根据公式(3)确定。

$$\delta_0 = 1.22\lambda F \tag{3}$$

式中: δ 表示系统达到衍射极限时艾里班直径; λ 表示谱段范围; F 即常用的 F 数, 是光学系统的相对孔径的倒数, 即 F=f'/D。

光学系统未达到衍射限,则成像的艾里斑直径 要比达到衍射限时的直径要大。所以此时的弥散圆 直径有 δ≥1.22 λ F。对于确定的光学系统,其实用波 长范围 λ已知,同时成像 CCD 确定后,根据实际标 定的 δ值也就可以确定出 F 的范围。λ为 1~2.5 μm 范围,δ=30 μm,所以 F≤9.8。

系统 F 越小,系统收集能量的能力越强,然而 F 也不是可以无限的小,因为系统的 F 越小系统的轴 向像差越难校正。最后选择前置望远系统 F=4。

于是得到前置望远系统的光学参数:

谱 段 范 围 :1~2.5 μm、f′ =60 mm、F =4、2w = 28.1°×0.3°。

2 前置望远系统方案选择

在确定了望远系统的主要光学参数后,还应该 选择合理的结构形式。望远系统现有透射式光学系 统、全反射式光学系统、反射与透射组合式光学系统 这几种结构^[4-5],文中介绍了几种结构的主要特点。

反射式系统具有的特点是:

(1) 不存在色差,二级光谱也就不存在,可以用于很宽的谱段成像;

(2) 镜片数较少,质量轻;

(3) 可以用非球面来获得大孔径、大视场、长焦距系统。

反射与透射组合式光学系统具有可以做大口径 长焦距系统的特点。

透射式光学系统具有特点是:

(1) 系统变量多,视场角可以做的很大;

(2) 系统透镜都为球面,加工装调简单;

(3) 系统为同轴系统,结构设计简单,系统稳定性好。

针对文中所要设计系统焦距短、视场大的特点 是最终选用透射式光学系统。

3 具体设计与性能分析

现详细设计谱段范围:1~2.5 μm、f'=60 mm、F= 4、2w=28.1°×0.3°成像光谱仪前置望远系统。

具体设计各光学表面和间隔的结构参数见表 1。

rab. i System parameter (Onit : min)							
Surface	Radius	Thickness	Glass				
1	23.01	4	N-PK51				
2	101.378	3.8	-				
3	13.089	4.6	N-PSK53				
4	Infinity	1	KZFSN5				
5	10.4	14.49	-				
6	-10.254	1.64	N-KZFS11				
7	Infinity	6.13	N-SK14				
8	-15.678	9.45	-				
9	67.446	8	N-SSK5				
10	-56.886	18.774					

表1结构参数(单位 : mm)

Tab.1 System parameter(Unit:mm)

可以看出,该前置望远系统由6个球面透镜组成,结构图为图1所示。



图 1 系统结构图 Fig.1 System layout

得到设计结构参数后,对该系统的主要光学性 能进行了定量的分析。

首先,作为光学成像系统最重要的一个性能参数,分析了该系统的传递函数,结果如图2所示。



通过 MTF 曲线可以看出,文中所设计的望远镜 在 CCD 奈奎斯特频率处的 MTF 平均优于 0.8。成像 质量很好。

其次,分析了光学系统的另一个重要指标,弥散 斑半径见图 3。



通过点列图可以看出,文中所设计的望远镜像面 处成像弥散斑半径最大为 9.4 μm。远小于 CCD 一个 像元 30 μm。反映出所设计的系统成像质量很好。

文中所设计的系统波长在 1~2.5μm, 谱段范围 为 1 500 nm, 谱段范围很宽,

分析了色差曲线,见图 4。



通过色差曲线可以看出,该系统在1~2.5 μm 范

围内二级光谱校正在 2 μm 左右, 很好的满足系统对 色差的要求。

由于大视场光学成像系统难以避免出现畸变, 因此需要对系统畸变量进行定量分析。图 5 给出了 系统畸变分析结果,从图中可看出,采用文中设计方 案得到的望远镜头畸变能够控制在 0.2%以内,这样 保证了后续与光谱仪对接时谱线弯曲的控制。



图 5 畸变曲线 Fig.5 Distortion curve

通过最终的设计,像质与畸变都能够很好的满 足成像光谱仪对前置望远镜的要求。系统的全长为 213 mm。

通过查阅 SCHOTT 玻璃表得到本系统中所用透 镜在 1~2.5 μm 在 10 mm 样品的透过率参数,见表 2。

表 2 10 mm 样品透过率									
Tab.2	Transmission	10 mm	sample	thickness					

		-				
	2.5 μm	2.3 μm	1.9 µm	1.5 μm	1 μm	
N-PK51	0.919	0.941	0.976	0.994	0.998	
N-PSK53	0.609	0.764	0.915	0.982	0.998	
KZFSN5	0.246	0.565	0.901	0.967	0.999	
N-KZFS11	0.507	0.779	0.965	0.991	0.999	
N-SK14	0.679	0.831	0.959	0.992	0.998	
N-SSK5	0.727	0.847	0.963	0.992	0.996	

可以看出,该系统中所用的玻璃都是在长波处透过率比较低,最低的为 KZFSN5,10 mm 试件的透过率为 0.246,SCHOTT 玻璃表中 KZFSN5 25 mm 试件的透过率为 0.03,通过计算此玻璃对 2.5 μm 波长 1 mm 玻璃厚的吸收率为 0.0116,所以可知通过 镀膜设计,1 mm 厚度 KZFSN5 玻璃对 2.5 μm 的透

过率可以达到 0.988, 文中所用的 KZFSN5 的厚度 就为 1 mm,所以透过率为 0.99。通过分析计算文中 N-SSK5 的透过率为 0.78、N-PK51 的透过率为 0.97、N-PK51 透过率为 0.90、N-SK14 透过率为 0.88 mm N-KZFS11 为 0.96,所以该系统在 2.5 μm波 段处的透过率为 0.57,其他波长透过率都会优于0.57。

4 结 论

文中所设计的系统有如下特点:

通过系统结构形式的选取及设计控制,在28.1° 视场内很好的控制了系统的畸变,最终畸变设计值 为0.2%以内。

通过 KZFSN5、N-SK14 低色散材料的选取,在 1~2.5 μm 范围内校正了色差及二级光谱。

通过特殊的膜系设计,可以保证该系统在 1~2.5 μm 范围内平均透过率在 57%以上。

光学系统结构形式采用透射射形式,使用了6 个球面透镜,通过公差分析加工难度低,便于装调。 由于文中设计使用的是矩形视场,适用于线阵的 CCD 接收器,通过推扫方法可得到成像,在航空领域 具有很好的应用前景^[6]。

参考文献:

- Fan Jinxiang, Yue Yanjun. Development in new concepts andnew schemes for military infrared imaging systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 1–6. (in Chinese)
- Zhang Kai, Sun Siliang. Design of infrared dynamic scene target simulator system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 12-16. (in Chinese)
- [3] Guo Ming, Wang Xuewei. IR modeling and simulation ofspace target/star and space environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 399-404. (in Chinese)
- [4] Tian Tieyin, Wang Hong, Gu Feng'an. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17 (11): 2692 – 2698. (in Chinese)
- [5] Labaw C. Airborne imaging spectrometer: an advanced concept instrument[C]//SPIE, 1983, 430: 68-73.
- [6] Peter A F. Image acquisition planning for the CHR1S sensor onboard PROBA[C]//SPIE, 2004, 5546: 141-150.