成像光谱仪复合色散棱镜支撑设计与试验

汪逸群，高志良

(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：复合色散棱镜是高分辨力星载成像光谱仪的关键分光元件，其光机支撑是成像光谱仪工程研制阶段必须解决的重要问题。首先介绍了复合色散棱镜的工作原理，在此基础上给出了复合色散棱镜光机支撑的技术指标要求；接着综合考虑了热匹配、密度、弹性模量、可加工性等因素后选择了棱镜支撑结构材料；然后运用温度补偿法解决了复合色散棱镜中一块棱镜与支撑结构材料线膨胀系数不匹配的问题，采用半运动学安装方法对两块棱镜进行支撑；最后给出了复合色散棱镜组件力学和热学分析结果并进行了相应试验。试验结果表明：复合色散棱镜组件一阶基频达 301.5 Hz，在 20 ℃±5 ℃温度范围内组合光程差优于 0.021λ(λ=632.8 nm)，能够满足成像光谱仪工程研制需要。

关键词：光谱学； 成像光谱仪； 复合色散棱镜； 光机支撑

中图分类号：TP70；TH74 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2276(2014)06-1982-06

Design and test of imaging spectrometer′s dual dispersive prisms

Wang Yiqun, Gao Zhiliang

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

Abstract: Dual dispersive prisms are the key dispersive component of high resolution space-borne imaging spectrometer. Their opto-mechanical mounting is an important problem which must be resolved during imaging spectrometer engineering development phase. Firstly, the working principle of dual dispersive prisms was introduced and their opto-mechanical mounting requirements were also presented. Furthermore, after taking into account coefficient of expansion matching, density, modulus of elasticity, machining property and so on, dual dispersive prisms mounting material was confirmed. Moreover, the great difference of coefficient of expansion between one of dual dispersive prisms and its mounting material was compensated using the temperature compensation method. Afterward, the dual dispersive prisms were mounted by the semikinematic mounting method. Finally, Mechanics analysis and thermoanalysis results were proposed, subsequently corresponding tests were also carried out. Tests results indicate that the nature frequency of dual dispersive prisms assembly is 301.5 Hz, integrative OPD of dual dispersive prisms assembly is better than 0.021λ (λ=632.8 nm) at 20 ℃±5 ℃. The results proved the dual dispersive prisms assembly satisfied the requirements of imaging spectrometer.

Key words: spectroscopy; imaging spectrometer; dual dispersive prism; opto-mechanical mounting

收稿日期：2013-10-22； **修订日期**：2013-11-23

基金项目：国家 863 计划(2011AA12A103)；中国地质调查局工作项目支持(1212011120227)

作者简介：汪逸群(1983-)，男，硕士，主要从事空间精密扫描机构设计与检测、航空航天高光谱成像方面的研究。

Email:hitwyq@aliyun.com

0 引　言

星载成像光谱仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代空间光学遥感仪器。它将光学成像系统和光谱分光系统有机结合在一起，能够同时获取目标的空间特征和光谱特征，在军事侦察、环境监测、资源调查、地质勘探等应用领域展现出广阔的应用前景[1-3]。

星载成像光谱仪的光学系统一般由望远镜系统和光谱仪系统组成，光谱仪系统采用的分光技术直接影响整个成像光谱仪的性能、结构复杂程度、质量和体积等[4]。目前成像光谱仪的分光方式主要有棱镜色散型、光栅色散型、傅里叶变换型三种[5]，其中棱镜和光栅色散型光谱仪由于技术成熟度高而得到最广泛的应用。综合考虑透光率、杂散光、色散线性、光谱带宽、成本等各方面因素后，棱镜更适合于星载高分辨力成像光谱仪的分光[6]。为了校正光谱色散的非线性，往往采用两块不同材料的棱镜组合形成复合色散棱镜，从而得到接近线性的光谱曲线[7]。

由于两块色散棱镜材料不同，热膨胀系数往往差别较大，而星载成像光谱仪所处的热环境比较复杂，这给复合色散棱镜的支撑设计带来巨大困难。为了获得清晰的高分辨力图像，光学设计人员对复合色散棱镜的波前畸变提出了接近光学加工能力极限的要求，这进一步增加了复合色散棱镜支撑设计的难度。

对于单个棱镜的支撑，参考文献[8]进行了较为全面的阐述，包括棱镜安装的运动学和半运动学原理、机械压紧和粘接技术等安装方式。但是该文献没有涉及双棱镜的支撑(胶合棱镜的支撑与单棱镜支撑相似)，国内外相关文献也较少提及该问题。文中针对该问题进行了理论研究并提出了行之有效的解决方案。

1　成像光谱仪复合色散棱镜工作原理

图 1 为棱镜色散型成像光谱仪光谱成像系统的结构原理图，由两块非球面镜、一组复合色散棱镜和一块面阵探测器组成，复合色散棱镜用于校正光谱色散的非线性，两块非球面镜工作在离轴状态，棱镜的背面镀银反射膜，形成棱镜内反射。经狭缝进入光谱成像系统的光通过准直镜形成平行光，平行光通过复合色散棱镜的三个折射面和一个反射面形成不同角度出射的光谱，最后经成像镜和折叠镜会聚在 CCD 上形成光谱图像。

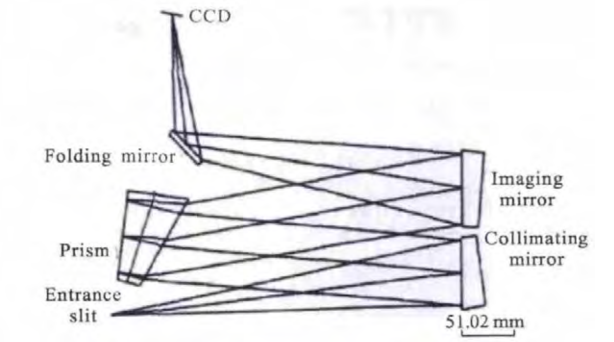

图 1 光谱成像系统结构原理图

Fig.1 Principle map of spectral imaging system

2　复合色散棱镜支撑设计

2.1　设计输入条件

复合色散棱镜由一块石英棱镜和一块 F4 棱镜组成，其中石英棱镜的线胀系数 α_1=0.55×10^{-6}/℃，质量为 501.7 g，而 F4 棱镜的线胀系数 α_2=8.3×10^{-6}/℃，质量为 487.9 g。两块棱镜的三维模型如图 2 所示，其中图 2(a)为石英棱镜，图 2(b)为 F4 棱镜。

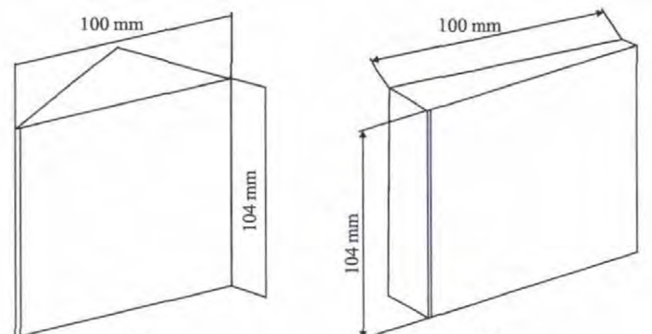

图 2 石英棱镜与 F4 棱镜模型

Fig.2 Models of silica prism and F4 prism

光学设计要求保证石英棱镜与 F4 棱镜之间的空气间隔为 0.05~0.08 mm，相邻两平面的平行度优于 10″，两棱镜的折射面、反射面与机械基准面的垂直度优于 10″，复合棱镜组合光程差小于 1/45λ(RMS 值)，λ=632.8 nm。总体要求组件质量不大于 2.4 kg，外形尺寸不大于 Φ126 mm×154 mm，环境温度适应范围为 20 ℃±5 ℃，组件固有频率不低于 200 Hz。

2.2　支撑结构材料的选择

复合色散棱镜支撑结构材料的选择需要考虑材

料的密度、弹性模量、线膨胀系数、加工性能、尺寸稳定性等因素，目前常用的光学元件支撑结构材料包括殷钢、钛合金、铝合金、铝基复合材料等(如表 1 所示)。殷钢的线膨胀系数可以根据光学元件的线膨胀系数进行设计，能够与大多数光学元件实现良好的热匹配，因而得到广泛的应用。

表 1 材料属性表

Tab.1 Properties of candidate material

Material name	Density (10^{-6} kg/mm^3)	Young′s modulus/MPa	Thermal Exp. Coef.(10^{-6}/℃)
4J32	8.1	138 180	0–1.5
ZTC4	4.4	106 820	8.9
7A09	2.8	69 580	23.6
TiB2/Al	2.77	95 000	16–18

在该项目中，线胀系数相差很大的两块棱镜必须安装在同一个支撑结构内，若采用殷钢材料不能同时实现与两块棱镜的热匹配，且殷钢密度较大，不能满足组件质量要求。铝合金和铝基复合材料线膨胀系数较大，且加工难度大，不适合作为复合色散棱镜的支撑结构材料。考虑到钛合金(ZTC4)密度为4.4，约为殷钢的一半，线膨胀系数与 F4 棱镜的线膨胀系数相当，是复合色散棱镜支撑结构材料的最优选择。然而石英棱镜与钛合金材料的线膨胀系数相差 16 倍，在 20 ℃±5 ℃温度载荷条件下，若两种材料直接接触必然导致石英棱镜光学面形急剧恶化，最终影响光学系统的成像质量。

为了解决这一问题，借鉴了前苏联光学和天文学家马克苏托夫提出的温度补偿法[9]，也就是根据各种材料线膨胀系数不同，选择线膨胀系数较大的材料作为补偿块，置于石英棱镜与钛合金支撑结构之间，利用补偿块的大收缩量(膨胀量)补偿棱镜收缩量(膨胀量)的不足。石英棱镜与钛合金支撑结构的热匹配必须在空间各个方向都有效，现以石英棱镜 104 mm 方向(棱镜截面上两个方向上的原理类似)为例来说明温度补偿法在棱镜支撑设计中的使用。

补偿块的线膨胀系数记为 α，厚度记为 x，那么支撑结构在这个方向上高度为$(104+x)$mm，根据热匹配原理有公式(1)成立。

$$(104+x)\times 8.9\times 10^{-6}=104\times 0.55\times 10^{-6}+x\times\alpha \tag{1}$$

由公式(1)可知，只要给定 α 即可求出对应的厚度 x。由于复合棱镜组件质量和体积有限，必须选择 α 值大的材料以尽可能减小 x，从而节省空间。

2.3 支撑结构设计

从准直镜出来的平行光要两次经过复合色散棱镜的三个折射面，一次经过复合色散棱镜的反射面才能形成不同角度出射的光谱，简单计算可知，要保证组合光程差的 RMS 值优于 1/45λ，必须要将三个折射面和一个反射面均加工至优于 1/100λ 的光学面形，即便如此，留给装配、温度变化等因素造成的变形余量也很小，这给复合色散棱镜支撑结构的设计带来巨大的挑战。

在棱镜支撑结构的设计过程中采用了半运动学的安装方式，对棱镜的六个自由度分别进行约束，尽可能避免引入过约束，如图 3 所示。但要保证复合色散棱镜的光学面形，这是远远不够的，装配应力的控制也非常重要。遗憾的是，没有一个简单的公式可以将棱镜的表面畸变与施加的力联系起来，而且实际操作过程中装配应力的量化控制也比较困难。对于一种给定的棱镜安装形式，有限元分析是确定棱镜变形的最佳方法。

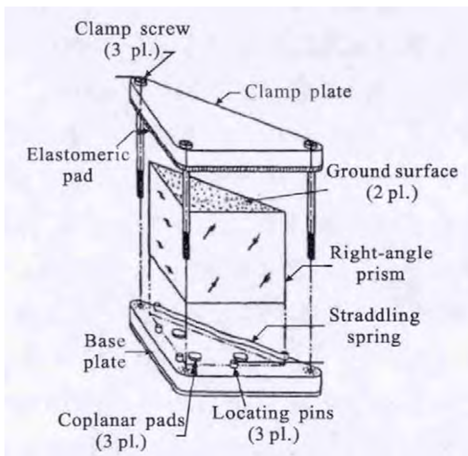

图 3 棱镜的半运动学安装原理示意图

Fig.3 Semikinematic mounting for a prism

棱镜的支撑有机械压紧、粘接和挠性安装等几种方法[9]。其中机械压紧方法具有定位精度高、安装可靠等优点，但压紧力大小较难控制；粘接方法能提供较高的机械强度，结构简单，经常应用于定位精度要求不严格的条件下；而挠性安装主要应用于大型棱镜的安装，占用的空间较大。根据两块棱镜的结构尺寸、定位精度和工作环境，决定采用机械压紧来保

证定位精度，尽可能降低机械压紧力，利用粘接的方式弥补机械压紧力的不足，从而实现复合棱镜的光机支撑。棱镜组件的支撑结构如图 4、图 5 所示。

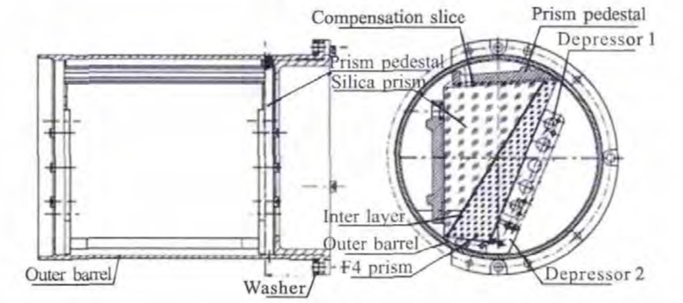

图 4 棱镜组件结构示意图

Fig.4 Structure sketch map of prism assembly

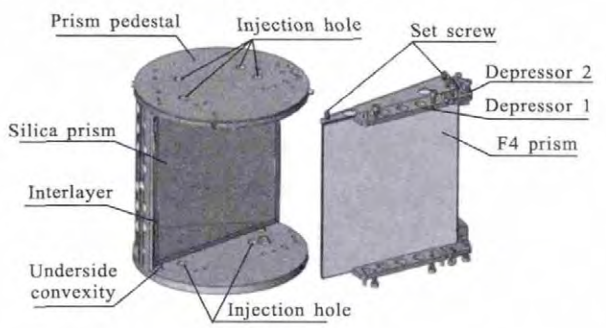

图 5 棱镜组件三维图

Fig.5 3D model of prism assembly

在机械压紧方面，采用小面积接触的半运动学安装方法分别对石英棱镜和 F4 棱镜进行固定。对于石英棱镜，有补偿片、底凸台面和顶部顶丝对石英棱镜进行支撑，底凸台面与棱镜组件机械基准之间的精度通过机械加工保证，从而保证石英棱镜折射面、反射面与棱镜组件机械基准之间的垂直度。对于 F4 棱镜，两端面分别通过底凸台面和顶部顶丝固定，F4 棱镜与石英棱镜之间用 0.06 mm 厚隔片隔开，以保证光学设计要求的光学间隔，用压板 1 和压板 2 将 F4 棱镜压靠在隔片上，从而保证 F4 棱镜与石英棱镜相邻表面的平行度优于 10″。

在胶粘方面，棱镜座的底面与顶面设计了注胶孔，注胶孔的位置要避开棱镜的尖角和薄边。胶层不仅起到粘接作用，还可以在棱镜与结构支撑件之间形成一个缓冲地带，因此胶层的厚度要严格控制：胶层太厚则难以完全固化，力学环境试验时两棱镜的相对运动量过大，相互撞击容易破碎；胶层太薄起不到缓冲作用。

3 工程分析

3.1 模态分析

棱镜组件有限元模型根据三维实体模型生成，以保证几何数据与设计结构一致。对于棱镜组件主要采用六面体单元对其进行有限元网格的划分，个别拐角处采用楔形单元过渡，整个组件的有限元模型中共有 67 747 个节点，49 550 个单元，如图 6 所示。

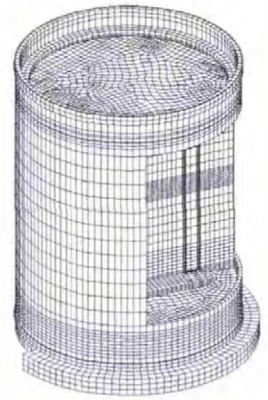

图 6 棱镜组件的有限元模型

Fig.6 FEA model of prism assembly

经过计算，棱镜组件三个方向的基频分别为 325 Hz、320 Hz 和 702 Hz。图 7 为棱镜组件各基频的变形云图，模态分析结果满足成像光谱仪总体提出的设计要求。

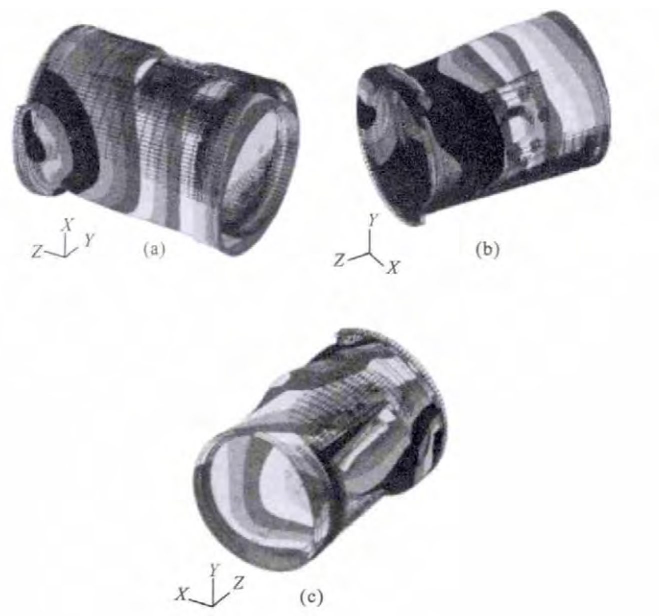

图 7 棱镜组件 X、Y、Z 方向工作基频振型

Fig.7 X, Y, Z orientation vibration modes of nature frequency

3.2 自重变形分析

在 X 向重力载荷作用下的石英棱镜反射面的面形结果见表 2,变形云图如图 8 所示。

表 2 自重作用变形结果

Tab.2 Distortion result by gravity

		X orientation gravity
PV/nm		61.5
RMS/nm		8.7
R/(″)	y	−21.4
	z	−1.1
T/μm	x	−6.1
	y	−0.5
	z	−2.6
Distortion nephogram		Fig.7

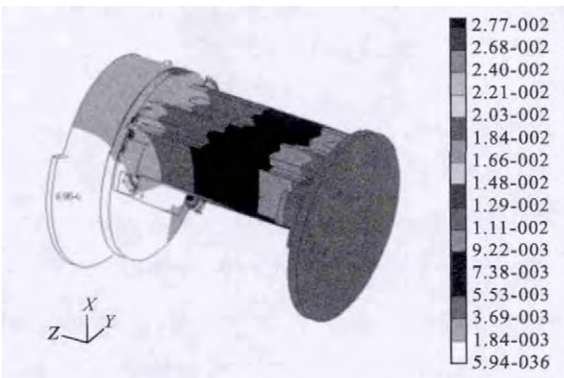

图 8 自重变形云图

Fig.8 Distortion nephogram by gravity

3.3 热变形分析

棱镜组件在−5 ℃均匀温降载荷单独作用下以及−5 ℃均匀温降载荷与 X 向自重载荷耦合作用下,石英棱镜反射面的面形计算结果见表 3,变形云图如图 9、图 10 所示。

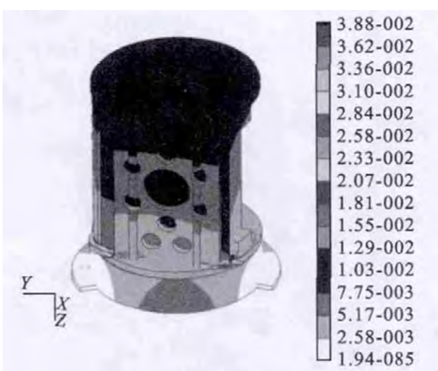

图 9 热变形云图

Fig.9 Thermo-distortion nephogram

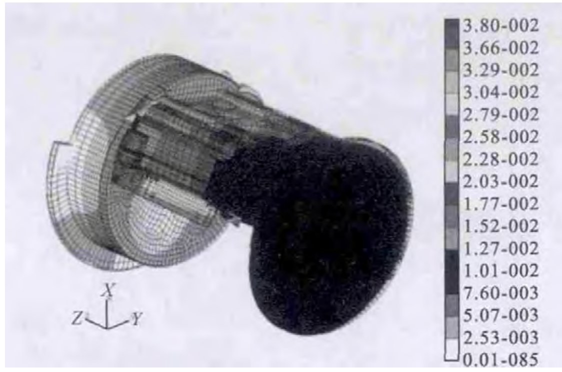

图 10 热力耦合变形云图

Fig.10 Gravity-thermo distortion nephogram

表 3 热变形计算结果

Tab.3 Thermo-distortion result

		−5℃ decline	−5℃ decline and gravity coupling
PV/nm		65.2	45.1
RMS/nm		9.6	8.1
R/(″)	y	−20.2	13.1
	z	−4.1	−2.3
T/μm	x	5.4	−3.9
	y	−0.6	−1.5
	z	15.7	5.4
Distortion nephogram		Fig.8	Fig.9

4 环境试验

4.1 力学环境试验

采用电磁振动台对棱镜组件三个方向的基频特性进行了检测,如图 11 所示。检测结果为 X 向 304.7 Hz,Y 向 301.5 Hz,Z 向 648.7 Hz,与理论分析结果分别相差 6.2%,5.8%,7.6%。

图 11 棱镜组件力学环境试验

Fig.11 Mechanics environment test of prism assembly

4.2 热光学环境试验

棱镜组件的热光学试验在空调房间中进行,如图 12 所示,试验温度范围为 20 ℃±5 ℃。试验结果表明,

在 15 ℃时棱镜组件的组合光程差为 0.021λ(RMS 值)，满足设计要求，如图 13 所示，其余各温度条件下均优于该数值。

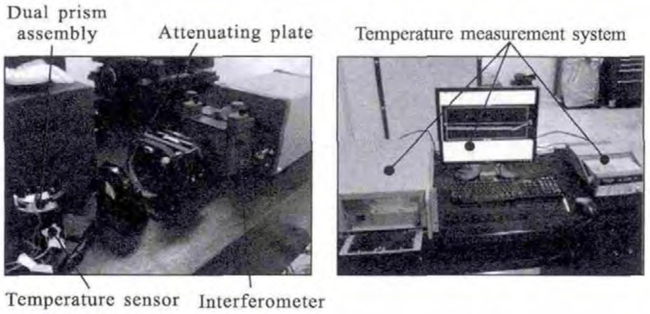

图 12 复合棱镜组件热光学试验

Fig.12 Thermo-optics test of dual prism assembly

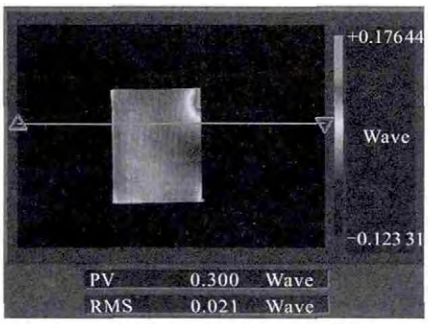

图 13 15 ℃时棱镜组件组合光程差

Fig.13 Integrative OPD of prism assembly at 15 ℃

5 结 论

文中根据星载成像光谱仪复合色散棱镜的光机支撑需求，运用温度补偿法和半运动学安装方法提出了一套复合色散棱镜的支撑方案，给出了具体的设计结果，对该设计进行了力学、热学分析。棱镜组件进行了力学和热光学试验，力学试验结果表明棱镜组件固有频率达到 301.5 Hz，满足成像仪总体提出的设计要求；热光学试验结果表明棱镜组件能够适应 20 ℃±5 ℃的温度范围，15 ℃时组合光程差达到 0.021λ(RMS 值)，能够满足星载成像光谱仪工程研制需求。

参考文献：

[1] Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field of view[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2011, 31(6): 0622004. (in Chinese)
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.

[2] Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2011, 31(8): 0822001. (in Chinese)
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.

[3] Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Lin Chao. Thermal effect on spectral-line shift of spaceborne imaging pectrometer [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32(5): 0528001. (in Chinese)
张军强, 颜昌翔, 蔺超. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0528001.

[4] Liu Jifan, Ma Yanhua, Zhang Lei, et al. New hyperspectral imaging system based on AOTF [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(11): 3065-3069. (in Chinese)
刘济帆, 马艳华, 张雷, 等. 基于 AOTF 的新型成像光谱系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3065-3069.

[5] Gong Dun, Wang Hong. Optical design of hyperspectral imaging spectrometer on space [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(2): 541-545. (in Chinese)
巩盾, 王红. 空间高光谱成像仪的光学设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 541-545.

[6] Wang Yiqun, Yan Changxiang, Miao Chun′an. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyper-spectral imager [J]. ***Chinese Journal of Optics and Applied Optics***, 2009, 2(4): 304-308. (in Chinese)
汪逸群, 颜昌翔, 苗春安. 星载高分辨力超光谱成像仪分光方式的选择[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4): 304-308.

[7] Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu, et al. Design of a new type interleaver[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2003, 23(12): 1424-1428. (in Chinese)
张娟, 刘立人, 周煜, 等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1424-1428.

[8] Paul R Yoder. Opto-Mechanical Systems Design[M]. 3rd ed. Zhou Haixian, Cheng Wengfang, Translated. Beijing: China Machine Press, 2008: 349-369. (in Chinese)

[9] Shao Jun. Investigation on support structure of special reflector[J]. ***Infrared***, 2006. 27(4): 36-41. (in Chinese)
邵君. 空间反射镜支撑结构研究概述 [J]. 红外, 2006, 27(4): 36-41.