文章编号 1674-2915(2010)02-0157-07

小型 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构设计及分析

刘 伟
(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:根据小型 Offner 凸光栅光谱成像仪光学系统的特点,对其反射镜支撑结构和桁架结构进行了研究,完成了小型 Offner 光谱成像系统的结构设计,建立了系统的 3D 实体模型。为了验证结构设计的合理性,对设计的 3D 模型进行有限元分析。在模态分析中得到该结构的第一阶固有频率为 362 Hz,高于系统设计要求的 120 Hz;在加速度及温度载荷分析中,得到主要光学元件的面形值以及它们之间的相对位置变化,其离轴及偏角均在允许公差范围内,说明结构刚度满足使用要求,证明了结构设计的合理性。

关 键 词:Offner 凸光栅;光谱成像系统;结构设计;有限元分析
中图分类号: TH744.1; TP391 **文献标识码**:A

Design and analysis of structure of compact Offner spectral imaging system

LIU Wei

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

Abstract: On the basis of characteristics of optical systems of Offner spectral imagers, the material choices of every parts, structure design of mirrors and frames in the imagers were investigated, then the structure design of a compact Offner spectral imaging system was achieved and its 3D model was established. In order to prove the reasonability of the structure, the 3D model was analysed by finite element method. The analysis results indicate that the first natural frequency of the structure is 362 Hz, which is higher than 120 Hz requested by the system. Furthermore, the analysis results of weight and temperature indicate that the RMS of surface figure, distances, centrifugal axes and the deflection of angle in every important parts all meet the requirements of the system tolerance. These results validate the rationality of structure of the compact Offner spectral

收稿日期:2010-01-16;**修订日期**:2010-03-23

imaging system.

Key words: Offner convex grating; spectral imaging system; structure design; finite element analysis

1 引 言

超光谱成像技术是光谱技术和成像技术的有机结合[1],它能够在遥感平台上获取地物目标的高分辨率超光谱图像,在军事侦察及农、林、水、土、矿等资源调查方面具有广阔的应用前景[2]。目前,世界各国已研究开发了十几台超光谱成像仪,比较著名的有 AVRIS、CASI、AIS、HYDICE、Ocean-PHILLS 等等[3]。

Offner 光谱成像系统是在反射式 Offner 中继光学系统的基础上发展起来的新型光谱成像系统。Offner 凸球面光栅光谱成像系统是美国喷气动力实验室(JPL)的一项专利技术,已用于Ocean-PHILLS、Hyperion、COIS 等航空或航天超光谱成像仪。与传统准直光束中使用光栅或棱镜的光谱成像系统相比,Offner 光谱成像系统完全解决了谱线弯曲问题,Offner 凸光栅光谱成像系统的色畸变也能达到可以忽略的程度。这种类型的光谱成像系统具有较大的平像场和较小的体积,而且其前置光学系统比较灵活,既可以联接透射式望远系统,又可以联接反射式望远系统,因此研究其结构具有较强的实际应用价值。

本文介绍了一种小型 Offner 光谱成像系统的设计,建立了系统的 3D 实体模型,对系统进行了静态刚度、加速度载荷和热载荷分析,给出了分析结果。

2 Offner 凸光栅成像光学系统[4]

Offner 凸光栅光谱成像系统由两块球面反射镜和一块凸球面光栅组成,结构简单,除了能量利用率稍低外,其谱线弯曲、色畸变和分辨力等参数均比较好,是小型化超光谱成像仪中光谱成像系统的首选。光谱成像系统的光学设计如图 1 所示。

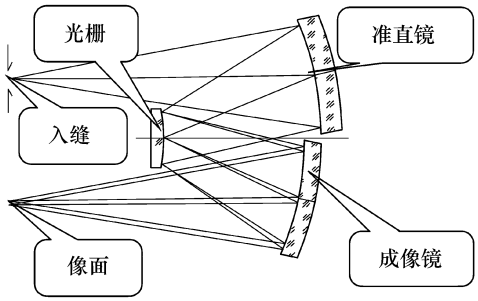

图 1 Offner 凸光栅成像系统光学设计示意图

Fig. 1 Optical sketch of Offner spectral imaging system with convex grating

2.1 光谱成像系统光学参数

在光谱成像系统的光学设计中,综合考虑球差、彗差及像散的消除而采用了典型的 Offner 光谱成像系统,表 1 为系统的结构参数,其主要设计参数和性能指标为:入射狭缝长度 18 mm,物方数值孔径 0.18,光谱区 400 ~ 1 000 nm。

表 1 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构参数

Tab. 1 Construction parameters of Offner spectral imaging system with convex grating

序号	名称	半径/mm	口径/mm	偏心量/mm
1	准直镜	-149.0	70×52	27.2
2	凸球面光栅	-71.9	26×26	0
3	成像镜	-137.9	66×54	-31.5
4	像面	-	20×6	-32.8

2.2　光谱成像系统的误差要求

影响光谱成像系统成像质量的因素主要有各镜的面形变化和各镜相对位置变化等。为保证成像质量,准直镜、凸球面光栅、成像镜的面形要小于12.6 nm(RMS 值),各镜之间相对位置变化要小于0.05 mm,各镜偏心量要小于 0.05 mm。

3　光谱成像系统结构设计

3.1　材料的选取

在进行材料的选择时要重点考虑材料的密度、弹性模量、热导率、线膨胀系数和轻度极限等,应该选择密度低、弹性模量高、热导率高的材料。综合比较后,光学元件材料选择了石英,结构框架材料选择了钛合金、固定光学元件的结构材料选择了殷钢,各材料属性见表 2[5]。

3.2　结构设计

在进行结构设计时主要考虑的因素有:

(1)支撑结构应具有足够的支撑刚度,能够抵抗反射镜重力引起的镜面变形和在发射过程中的冲击,且过载下不发生微屈服和破坏现象,在使用过程中保持面形不变;

(2)稳定性好,长期使用尺寸不发生变化;

(3)能够抵抗一定范围内温度变化引起的镜面变形。

表 2　材料属性表

Tab. 2　Properties of different materials

材料	密度 ρ/(g/cm^3)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ_b/MPa	热膨胀系数 α/($\times10^{-6}$/℃)	热导率 W/m·K
石英	2.2	67	0.167	–	0.21	1.3
殷钢(4J32)	8.1	141	0.25	470 302($\sigma_{0.2}$)	0.3	13.9
钛合金(ZTC4)	4.4	114	0.34	877.1	8.9	8.8

常用的反射镜支撑方式有周边支撑、侧面支撑、背部支撑、中心支撑等多种,这些支撑方式各有优缺点[6]。选择支撑方式还要考虑体积、刚度、质量等因素。由于本系统光学元件距离比较近且尺寸比较小,不适于侧面支撑。如果采用周边支撑结构会比较简单,重量也不会增大很多,但由于光学系统的限制,在光学元件口径留有一定的余量后,采用周边支撑会发生遮挡光路现象,无法采用周边支撑。因此,本文采用了背部中心定位方式支撑反射镜。在反射镜背部中心伸出一个圆柱台,在镜座中心加工出 3 个悬臂挠性支架,用结构粘合剂(环氧树脂)把反射镜粘接在悬臂挠性支架上。悬臂挠性支架在切向和轴向上是刚性的,在径向上是挠性的,这样使外部变形对反射镜的影响尽可能地小。图 2 为反射镜所采用的支撑结构(以主镜为例)。

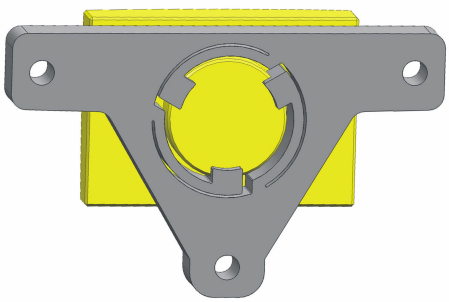

图 2　反射镜的支撑结构

Fig. 2　Support structure of mirror

为了增加系统的刚度和尽量减少系统的总体质量,主框架采用桁架结构,同时考虑到前置光学系统的接口,既可以联接透射式望远系统,又可以联接反射式望远系统。设计的光谱成像系统结构模型如图 3 所示。

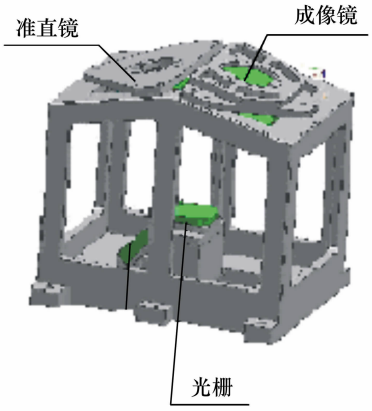

图 3 光谱成像系统结构模型

Fig. 3 Structure model of imaging system

4 工程分析

为了考核结构设计的可行性及合理性,需要对设计的结构进行 CAE 分析,主要包括静态刚度、加速度载荷作用、热载荷作用、动态刚度分析[7]。本文利用 MSC. Patran&Nastran 有限元分析软件对光谱成像系统结构进行 CAE 分析。

4.1 建立有限元模型

如图 4 所示,利用 Patran 建立了有限元模型,模型大部分采用六面体单元,共划分 18 163 个单元,28 931 个节点。由于主框架底面固定在遥感器平台上,因此在分析时将其作为约束部位,6 个自由度全部约束。

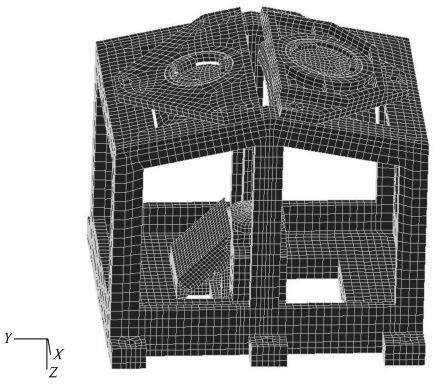

图 4 系统的有限元模型

Fig. 4 Finite element analysis of imaging system

4.2 静态刚度分析

在进行静态刚度分析时,要在模型的 3 个方向加载 1 g 的重力加速度,这样可以考察系统各个方向的刚度在重力场作用下能否正常工作,各镜面变形、位置是否在要求的范围内,以及结构的应力是否在强度极限内。图 5、图 6 分别是系统在重力作用下的有限元变形分析和应力分析云图。

图 5 重力载荷下变形云图

Fig. 5 Displacement of system with gravity load

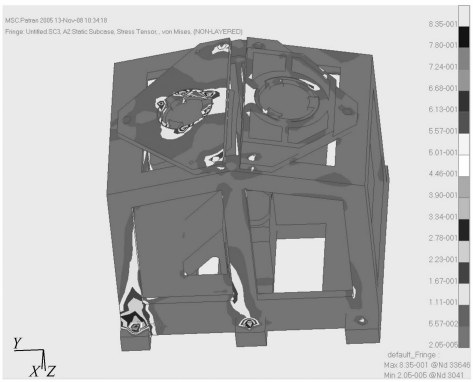

图 6 重力载荷下应力云图

Fig. 6 Stress of system with gravity load

表 3 重力载荷下的面形误差

Tab. 3 Shape errors with gravity load

	成像镜	准直镜	光栅
RMS 值/nm	1.29	0.48	0.30
最大位移/nm	3.79	3.79	0.70
最小位移/nm	-3.43	-0.34	0.69
偏心量/mm	4.21	0.87	9.45

利用有限元变形分析结果和面形拟合工具可以得到表 3。

由上表可以看出,各镜位置变化和面形 <12.6 nm,各镜偏心量 <0.05 mm。利用变形分析结果,提取各镜中心的节点坐标值,与分析前的模型相比较可以得到各镜之间相对位置变化最大值为 0.012 mm(准直镜与成像镜的相对位置变化值),小于 0.05 mm;根据应力云图可以看出,这个结构的最大应力发生在框架的固定安装孔处,其值为 0.84 MPa,远远小于各材料的强度极限,充分说明重力不会影响整个系统的正常工作。

4.3　加速度载荷分析

在发射过程中系统受到加速度载荷,要求仪器在过载作用下不被破坏,依然保持完整的使用功能。分析时在飞行方向施加 6 g 加速度载荷、其它两个方向施加2.2g的加速度载荷,这样可以考察系统各个方向的刚度,各镜面的变形、相对位置是否在要求的范围内,以及结构受到的应力是否在强度极限内。图 7、图 8 分别是系统在加速度载荷作用下的变形和应力云图。

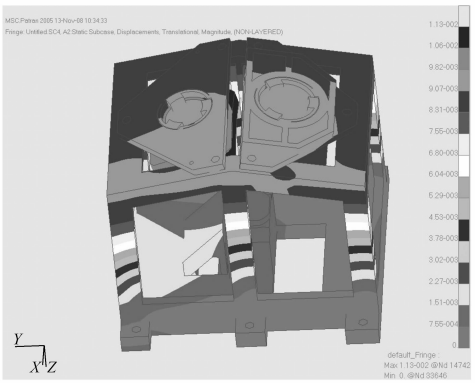

图 7　加速度载荷变形云图

Fig. 7　Displacement of system with acceleration load

图 8　加速度载荷应力云图

Fig. 8　Stress of system with acceleration load

根据变形分析结果和面形拟合计算工具得到表 4。

表 4　加速度载荷下的面形误差

Tab. 4　Shape errors with acceleration load

	成像镜	准直镜	光栅
RMS 值/nm	8.88	5.93	0.83
最大位移/nm	23.3	3.79	0.70
最小位移/nm	−23.3	−0.34	0.69
偏心量/mm	0.013	0.010	0.011

由表 4 可以看出,各镜位置变化和面形 <12.6 nm,各镜偏心量 <0.05 mm。利用与静态刚度中分析各镜相对位置变化类似的方法,得到各镜之间相对位置变化最大值为 0.032 mm(准直镜与成像镜的相对位置变化值),<0.05 mm;从应力分析结果的云图可以看出,在加速度载荷作用下结构的最大应力发生在框架的固定孔处,其最大应力为 8.50 MPa,也远远小于各材料的强度极限,充分说明加速度载荷不会影响整个系统的正常工作。

4.4　热载荷分析

成像系统在应用时会受到周围环境的影响,温度发生变化,一般在 −10 ~ 40 ℃,这就要求系统在此温度内能够正常工作。一般成像系统的

图 9　温升载荷下变形图

Fig. 9　Displacement of system with temperature load

制造、调试过程在温度为20 ℃时进行,因此要施加最大温度为30 ℃的载荷来考核系统的热刚度。图9、图10是系统在热载荷作用下的有限元变形分析和应力分析云图。

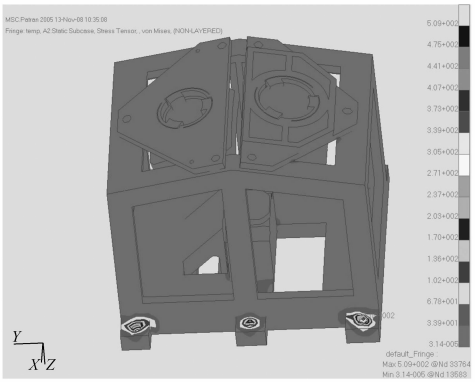

图10 温升载荷下应力图

Fig. 10 Stress of system with temperature load

表5 温度载荷下的面形误差

Tab. 5 Shape errors with temperature load

	成像镜	准直镜	光栅
RMS值/nm	4.87	9.48	2.31
最大位移/nm	10.3	19.3	21.9
最小位移/nm	-14.3	-9.86	18.4
偏心量/mm	0.027	0.034	0.031

根据变形分析结果和面形拟合工具可以得到表5。

由表5可以看出,各镜位置变化和面形<12.6 nm,各镜偏心量<0.05 mm。同样利用与静态刚度中分析各镜相对位置变化类似的方法,得到各镜之间相对位置变化最大值为0.014 mm(准直镜与成像镜的相对位置变化值),小于0.05 mm;根据应力云图可以看出,这个结构的最大应力在框架的固定孔处,值为50.9 MPa,也远远小于各材料的自身的强度极限,充分说明温度变化不会影响整个系统的正常工作。

4.5 模态分析

为了避免成像系统在发射过程及运行过程中在受迫振动时发生共振现象而破坏结构,还要考核其动态刚度。为了避免发生共振现象,系统的固有频率一般要高于120 Hz。图11为系统第一阶固有频率振型图,从有限元分析可以看到系统的第一阶固有频率为362 Hz,高于120 Hz,说明系统可以避免受到外界环境的振动影响而发生共振。

图11 系统一阶固有频率振型图

Fig. 11 The first mode shape of system

5 结 论

本文根据小型Offner凸光栅光谱成像系统的光学要求对其进行了结构设计,并对系统进行了静态刚度、加速度载荷和热载荷分析,分析结果表明设计的结构满足光学系统要求。同时,对系统进行了模态分析,分析结果显示系统的第一阶频率为362 Hz,小于设计要求的120 Hz,表明系统可以避免受外界环境的影响而发生共振。因此,小型Offner光谱成像系统光机结构是合理可行的,能够满足使用要求。

参考文献:

[1] 沈中,葛之江. 航天超光谱成像技术原理及发展现状[J]. 航天器工程,2001,10(4):45-52.
SHEN ZH, GE ZH J. The principle and development situation of the spacebome hyper-spectrum imager[J]. *Spacecraft Eng.*, 2001, 10(4): 45-52. (in Chinese)

[2] 许洪,王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):13-17.

XU H, WANG X J. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)

[3] 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
ZHENG Y Q, YU B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, 6(1): 75-80. (in Chinese)

[4] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(6): 650-651.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-651. (in Chinese)

[5] 姚志雄, 黄健, 王欣. 航天反射镜材料 SiC[J]. 红外, 2005, (4): 22-25.
YAO ZH X, HUANG J, WANG X. Mirror material SiC for space application[J]. *Infrared*, 2005(4): 22-25. (in Chinese)

[6] 卢锷. 空间遥感相机结构的计算机辅助设计[J]. 光学 精密工程, 1989, (4): 16-23.
LU E. Computer-aided engieering analysis of space remote-sensing camera structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1989(4): 16-23. (in Chinese)

[7] 秦琴, 顾永杰, 陶津平. 望远镜系统的结构设计及有限元分析[J]. 光电工程, 2008, 35(6): 130-134.
QIN Q, GU Y J, TAO J P. Finite element analysis of R-C telescope system[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2008, 35(6): 130-134. (in Chinese)

作者简介: 刘　伟(1967—),男,吉林长春人,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事光机结构设计方面的工作。
E-mail: 2400liuwei@163.com