

文章编号 1004-924X(2009)10-2450-06

空间成像光谱仪的主体支撑方式

张军强^{1,2}, 董得义¹, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了改善空间成像光谱仪主体支撑方式对系统光机结构稳定性的影响,分析了成像光谱仪对主体支撑结构的要求,介绍了常用空间光学遥感仪器的支撑方式。在传统支耳支撑方式不能满足离轴非球面三反射镜(TMA)系统热稳定性的情况下,提出了一种新的双耦合的支撑方案并对其进行了理论分析。优化设计过程中,采用有限元分析软件 MSC. PATRAN 对其三维样机进行工程分析,结果显示,在正弦振动载荷作用下,主体一阶频率为 95 Hz;在 10 °C 均匀温降与自重耦合作用下,各反射镜的镜面变形 RMS 最大值为 12 nm, PV 最大值为 60 nm,主镜绕 Z 轴的转角由原来的 55" 降低为 12",热真空环境下整机成像试验获得的光谱数据验证了工程分析的正确性,表明双耦合的支撑方案能满足整机刚度和光机系统对热稳定性的要求。

关键词:成像光谱仪;支撑技术;结构设计

中图分类号: TP73; TH744.1 **文献标识码:** A

Primary support of high resolution space imaging spectrometer

ZHANG Jun-qiang^{1,2}, DONG De-yi¹, YAN Chang-xiang¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: With the aim to improve the effect of the primary support of a space High Resolution Imaging Spectrometer (HRIS) on its stability of optic-mechanic system, the requirements were analyzed for the rigidity and heat stability of a common space remote sensor. The traditional support structures to the space optical remote sensors were introduced. As the traditional supports by lags could not meet the need of the three-mirror anastigmatic (TMA) imaging system, a new coupling support structure by two axes was presented and its theory was analyzed. The finite element analysis of a 3D model was realized by software MSC. PATRAN during the optimum designing. The results show that the first order natural frequency is 95 Hz under sine vibration loading. The maximum RMS value and the maximum PV value of the mirror surface aberration are 12 nm and 60 nm under both of a 10 °C temperature fall and the influence of the gravity, respectively. The angle rotation by the Z axis of primary mirror is reduced from 55" to 12". The spectral data of the optical system under the hot vacuum environments

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2008-12-05.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

verify the analysis results, which shows the coupling support structure is able to meet the needs of the rigidity and the heat-stability of optic-mechanic systems.

Key words: high resolution imaging spectrometer; support technology; structure design

1 引言

成像光谱仪是多光谱成像遥感技术发展的一个重要进步,它显著地提高了遥感技术探测地球表面特征和物体性质的能力,在军事、资源调查与环境监测等许多领域有重要的应用前景^[1]。

高分辨成像光谱仪(High Resolution Image Spectrometer, HRIS)一般都采用离轴非球面三反射镜(TMA)系统,对于离轴安装的各反射镜,不但对反射镜本身的面型精度有严格的要求,而且对每一块光学反射镜的位置度误差也有严格的限制,即位置度公差要求严格^[2-3]。传统的光学件轻量化及支撑优化设计技术只能提高单个光学件的面形精度,满足单个光学件的尺寸稳定性和热稳定性,而不能解决整个光学系统的尺寸稳定性和热稳定性问题。工程分析和实践表明,如果主体支撑结构不能满足力学环境和热环境的要求,由此带来的主体稳定性和热变形将不只影响光学系统的分辨率和成像质量,严重的时候甚至决定着整个光学系统能否成像。

本文将在各光学件组件已经优化设计的前提下,重点讨论主体支撑方案对光学系统的视轴漂移以及镜面的波前畸变的影响,并给出具有较高尺寸稳定性和热稳定性的主体支撑方案,以提高成像光谱仪的分辨率和成像质量。

2 成像光谱仪的主体支撑结构要求

图 1 为成像光谱仪的光路简图,为了同时达到高分辨、大视场和较低的体积和重量,望远镜采用非球面的主镜、次镜和第三镜构成离轴 TMA 系统,光谱仪采用非球面准直和成像镜也构成离轴非球面系统,光谱仪的色散元件为复合棱镜。

由于在运输、发射和在轨工作期间受到力学和温度载荷的作用,光机结构内部各零件都会发生变形,最终导致光机结构的尺寸稳定性发生变

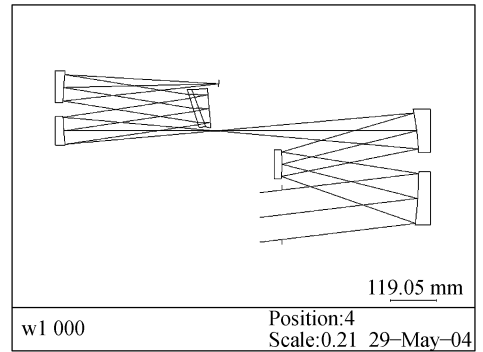


图 1 成像光谱仪的光学结构

Fig. 1 Optical configuration of HRIS

化^[4-5],进而对分辨率和成像质量产生影响。为了满足恶劣环境下光学分辨率和成像质量要求,TMA 系统成像光谱仪对主体支撑提出了较高的要求:

2.1 刚度要求

空间遥感仪器结构件的失效形式通常为刚度失效,而非强度失效。由于运输、发射条件的限制,为了保证空间遥感仪器整个生命周期内不发生刚度破坏,主体支撑结构须使整机具有较高的刚度,这是任务成功的前提。

2.2 热稳定性要求

成像光谱仪采用的 TMA 光学系统决定了其主体的箱式结构,离轴分布各光学件的视轴漂移以及镜面的波前畸变对温度载荷非常敏感,要求主体支撑结构具有较高的热稳定性。

3 成像光谱仪支撑技术

3.1 光学遥感仪器安装支撑方式

为了使光学遥感仪器能够承受在地面运输、发射运载以及在轨运行期间恶劣的力学和热真空环境载荷作用,光学遥感仪器必须通过可靠的支撑方式和平台连接。光学遥感仪器与平台的机械接口即光学遥感仪器的安装支撑方式决定了光学遥感仪器能否正常完成遥感成像任务。当前,空

间光学遥感仪器的主体支撑方式主要有以下两种:

3.1.1 框架式支撑方式^[6]

框架式支撑如图 2 所示,主要包括长方形框架和三角形框架,长方形框架支撑在遥感仪器主体的质心附近,避免由于偏心产生的力矩耦合到主体上。框架式支撑主要用于支撑卡塞格林系统(R-C 系统)和同轴 TMC 系统等同轴系统。

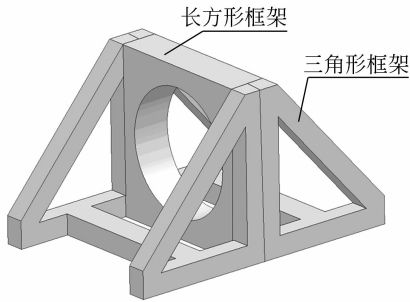
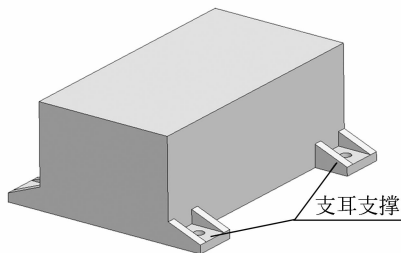


图 2 框架式支撑结构简图

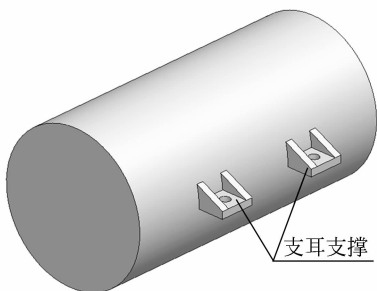
Fig. 2 Sketch of frame structure

3.1.2 支耳式支撑方式

支耳式支撑结构如图 3 所示,根据要求的强度、刚度、安装精度等要求在仪器主框架的某些位置留出一定数量的支耳,支耳精加工的底面作为安装基准,通过螺钉和平台连接。



(a) TMA 系统



(b) R-C 或 TMC 系统

图 3 支耳支撑结构简图

Fig. 3 Sketch of lug structure

支耳式支撑既可支撑卡塞格林(R-C)和同轴 TMC 等同轴光学系统,也可支撑离轴 TMA 光学系统。在支撑质量较大仪器的场合,支耳式支撑方式常演变为平面支撑方式。

3.2 成像光谱仪主体支撑设计

本文讨论的成像光谱仪其望远镜和光谱仪都采用了离轴 TMA 系统,光机优化设计后主体外形呈方箱形,这显然不能使用框架式支撑方式,按照以往的经验选择支耳式支撑,如图 4 所示。为了避免由于偏心产生的力矩耦合到主体上,在主体质心附近对称设计了一个长 200 mm 的支耳,通过两侧共 6 个 M8 的螺钉和平台连接。

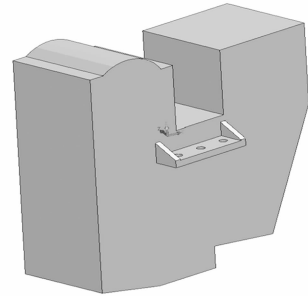


图 4 成像光谱仪支耳支撑外形简图

Fig. 4 Shape of HRIS supported by lug structure

为了满足总体对强度和刚度的要求,对支耳进行了优化设计,并采用 MSC. Patran 对优化设计后的模拟样机进行了力学分析。在正弦和随机振动载荷作用下支耳局部应力远小于屈服应力,主体一阶频率为 95 Hz,振型围绕 Z 轴转动。由此可见,支耳支撑能满足强度和刚度要求。

为了考核成像光谱仪在空间恶劣温度载荷作用下光机结构的尺寸稳定性发生的变化,对优化设计后的模拟样机进行了热载荷分析,主要计算了 10 °C 均匀温升(降)变化以及 3 个方向的温差形成的温度场等情况。表 1 是成像光谱仪在 10 °C 均匀温升与自重耦合作用下各主要光学元件面形变化情况。

表 1 支耳支撑 10℃ 均匀温升与自重耦合分析

Tab.1 Changes of mirrors under load of temperature and deadweight supported by lugs

| 镜面 | PV (nm) | RMS (nm) | $R(^{\circ})$ | | | $T(\mu\text{m})$ | | |
|-----|------------|-------------|------------------|------|------|------------------|-----|-----|
| | | | x | y | z | x | y | z |
| 要求 | 63 | 13 | 10 | 40 | 500 | 500 | 500 | |
| 主镜 | 80 | 16 | 光 轴 方 向 | 0.2 | 55 | -44 | -50 | 0.2 |
| 次镜 | 76 | 18 | | 5.3 | 6.4 | 10 | -11 | -2 |
| 三镜 | 42 | 8 | | 1.0 | 21.3 | -53 | -21 | 0.3 |
| 准直镜 | 10 | 3 | | -0.4 | 8.5 | -50 | 4 | 0.8 |
| 成像镜 | 12 | 3 | | -0.1 | 18.0 | -59 | 15 | 0.9 |

由表 1 可知,在 10℃ 均匀温升与自重耦合作用下,光学系统超过设计指标的有:主镜与次镜的 PV 值、RMS 值以及主镜绕 Z 轴的转角。可以发现,组件级工程分析中视轴漂移以及镜面的波前畸变(即镜面刚性位移和面形)都满足要求的主镜,在集成后光学系统中其视轴漂移以及镜面的波前畸变却超出了允许的范围,这将导致此前对主镜所作的轻量化、支撑等优化设计都徒劳无功。主镜作为空间光学遥感仪器的关键件之一,其状态对仪器的整体性能起着至关重要的作用^[7-9],主镜的这种稳定性变化超差是绝不允许的。

研究分析表明,问题源于主体的支耳支撑方式。由于支耳支撑方式约束了主体的全部 6 个自由度,使得在 10℃ 均匀温升与自重耦合载荷作用下,望远镜框架发生严重的热变形,最终导致了主镜等光学元件稳定性发生了变化,这种由于支撑方案理论缺陷导致的镜面变形是任何优化设计无法弥补的,而且主镜绕 Z 轴的转角超差也是调焦无法弥补的。

为了解决由于空间恶劣温度环境载荷作用,光谱仪光学系统发生较大视轴漂移以及镜面波前畸变导致成像质量的下降,本文提出了采用单点欠约束、多点耦合完全约束的支撑方式。单点支撑欠约束可保证在温度载荷作用下主体热变形最小,而多点耦合完全约束保证主体和平台连接的刚度要求。由于万向节支撑整机不能达到很高的刚度,权衡多种方案后选择如图 5 所示的轴支撑方案。

主支撑轴、辅助支撑轴各两件成对分布在主体两侧,其中主支撑轴位于主体质心附近,承受主

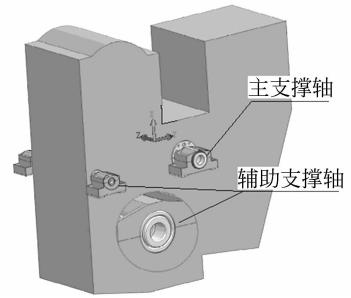


图 5 成像光谱仪轴支撑外形简图

Fig. 5 Shape of HRIS supported by axis structure

体的绝大部分质量,辅助支撑轴根据现有位置关系位于主轴的前侧一定距离,辅助主支撑轴共同约束主体。主支撑轴和辅助支撑轴通过各自的轴座和平台连接。

主支撑轴约束主体沿 X、Y、Z 的平移 T_x 、 T_y 、 T_z 和绕 X、Y 轴的旋转 R_x 、 R_y 共 5 个自由度,有效防止了温度载荷作用下,由于非对称变形导致主支撑轴位置绕 Z 轴旋转应力引起的主体变形;辅助支撑轴仅仅约束主体绕 Z 轴的旋转 R_z 一个自由度,既有效防止主体绕主支撑轴旋转,又释放了其他方向的热应力。

分析轴支撑方案的约束关系可知,轴支撑方案有以下特点:

(1) 主支撑轴和辅助支撑轴各自都没有完全约束主体,属于欠约束,这有利于温度载荷下热应力的释放。

(2) 由于主支撑和辅助支撑的耦合作用,主体的 6 个自由度都得到了可靠的约束,保证了整机的刚度。

在综合考虑整机刚度、强度、质量要求的前提下,对主支撑和辅助支撑的支撑点位置、支撑轴形状和尺寸以及轴座进行了优化设计,对优化设计后的模拟样机进行了力学和热环境工程分析。在正弦和随机振动载荷作用下支撑轴和轴座满足强度要求,主体一阶频率仍为 95 Hz,振型围绕 Z 轴转动;在 10℃ 均匀温升与自重耦合作用下各主要光学元件面形变化情况如表 2 所示。

表 2 轴支撑 10 °C 均匀温升与自重耦合分析

Tab.1 Changes of the mirrors under the load of temperature and deadweight supported by axes

| 镜面 | PV (nm) | RMS (nm) | R(") | | | T(μm) | | |
|-----|------------|-------------|------------------|------|------|-------|-----|-----|
| | | | x | y | z | x | y | z |
| 要求 | 63 | 13 | | 10 | 40 | 500 | 50 | 50 |
| 主镜 | 60 | 11 | 光 轴 方 向 | 0.2 | 12 | -44 | -50 | 0.2 |
| 次镜 | 52 | 12 | | 5.3 | 6.4 | 10 | -11 | -2 |
| 三镜 | 29 | 5 | | 1.0 | 21.3 | -53 | -21 | 0.3 |
| 准直镜 | 9 | 2 | | -0.4 | 8.5 | -50 | 4 | 0.8 |
| 成像镜 | 10 | 2 | | -0.1 | 18.0 | -59 | 15 | 0.9 |

对比表 1、表 2 分析结果可知:相比支耳式支撑方案,轴支撑方案在 10 °C 均匀温升与自重耦合条件下,各镜面面形有了明显的改善,特别是主镜绕 Z 轴的转角由原来的 55"降低为 12",满足了光学设计对光学系统的视轴漂移以及镜面的波前畸变的要求。

4 试验验证

对成像光谱仪进行了正弦振动力学试验,整机一阶频率为 90 Hz,满足刚度要求。

由于整机集成后热真空环境下单镜组件的热稳定性不易检测,为此,在真空环境下 8、18、28 °C 3 个温度点进行了系统成像试验,通过对获取的光谱数据分析可知,系统像质和光谱性能达到设计要求,轴支撑方案能承受温度载荷的作用。

参考文献:

- [1] 禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究[J]. 光机电信息, 2000, 17(4): 1-5.
YU B X. Research of high resolution imaging spectrometer[J]. *Ome Information*, 2000, 17(4): 1-5. (in Chinese)
- [2] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 48-53.
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [3] 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, et al.. De-

5 结 论

讨论了成像光谱仪对光机结构稳定性的具体要求,探讨了主体支撑方式对光机结构尺寸稳定性和热稳定性的影响,并提出了能有效改善系统光机结构稳定性的轴支撑方案。通过分析和试验可以得出:

(1) 成像光谱仪望远镜系统和光谱仪系统采用的离轴非球面三反射镜(TMA)系统能减小整机体积、减轻质量、提高成像质量,但是对光机结构的尺寸稳定性和热稳定性提出了更高要求。传统的框架支撑和支耳支撑技术不能满足要求。

(2) 单点欠约束、多点耦合完全约束的轴支撑方案,既保证了成像光谱仪较高的刚度,又有效释放了温度变化时的热应力,使成像光谱仪能承受力学载荷和温度载荷的共同作用。

(3) 对某空间成像光谱仪使用了双耦合支撑的方案。正弦振动试验表明,整机一阶频率为 90 Hz;通过对温度载荷作用下的系统成像试验获取的光谱数据分析可知,系统像质和光谱性能达到了设计要求。

结果表明,单点欠约束、多点耦合完全约束的轴支撑方案对于离轴非球面三反射镜(TMA)系统成像光谱仪主体支撑是合适的。

sign, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)

- [4] 丁延卫, 尤政, 卢铿. 航天光学遥感器光机结构尺寸稳定性变化对成像质量的影响[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(3): 1-4.

DING Y W, YOU ZH, LU E. Influences of dimension instability of space optical remote sensor opto-structural system on imaging quality[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(3): 1-4. (in Chinese)

- [5] 丁延卫, 尤政, 卢铿. 温度变化对遥感器光机结构尺寸稳定性的影响[J]. 光电子·激光, 2004, 15(10): 1170-1173.

DING Y W, YOU ZH, LU E. Influences of temperature change on dimension stability of sensor op-

to-structural system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(10):1170-1173. (in Chinese)

- [6] 丁亚林,田海英.一种提高碳纤维环氧树脂复合材料框架结构应用性能的结构技术[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(3):297-288.
DING Y L, TIAN H Y. Use of pre-embedded parts to improve the performance of carbon fibre framework[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3):287-288. (in Chinese)
- [7] 吴清文,卢锴,王家骥.空间光学遥感器主镜背部形状的选择[J]. *空间科学学报*, 1997, 17(2):172-177.
WU Q W, LU E, WANG J Q. The Selection of rear shapes of primary mirrors in spatial optical remote sensor[J]. *Chinese Journal of Space Science*,

1997, 17(2):172-177. (in Chinese)

- [8] 俞天野,贾建军.大口径主反射镜的轻量化设计方案[J]. *红外*, 2007, 28(8):6-10.
YU T Y, JIA J J. Light weight design of large-diameter mirror[J]. *Infrared*, 2007, 28(8):6-10. (in Chinese)
- [9] 续强,王延凤,周虎,等.空间光学遥感器主反射镜轻量化及支撑设计[J]. *应用光学*, 2007, 28(1):43-46.
XU Q, WANG Y F, ZHOU H, *et al.*. Design and analysis of lightweight structure and support for primary mirror of space optic remote sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(1):43-46. (in Chinese)

作者简介:



张军强(1981—),男,江苏泰州人,助理研究员,博士研究生,主要从事光机结构设计、空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com



颜昌翔(1973—),男,副研究员,湖北洪湖人,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yan cx@ciomp.ac.cn



董得义(1979—),男,助理研究员,主要从事有限元分析、力学试验与仿真等方面的研究。E-mail: s200201029@163.com