

doi: 10.3788/gzxb20184709.0922002

高稳定性星载多普勒差分干涉仪支撑结构设计

白玉龙^{1,2}, 孙剑¹, 郝雄波¹, 武俊强¹, 白清兰¹, 冯玉涛¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了保证星载测风多普勒差分干涉仪的力学稳定性和热稳定性, 设计了一种低热传导微应力装夹支撑结构, 采用胶合与弹性压紧相结合的方法对干涉仪进行安装. 首先, 结合多普勒差分干涉仪的结构特点和稳定性要求, 采用四点环形凸台的粘接形式对底座粘接面进行了优化设计, 并与已有的网格化多点凸台粘接面形式进行对比, 然后, 针对随机振动条件下干涉仪与底座粘接面响应应力过大的问题, 设计了施加预紧力的压盖结构来提高粘接可靠性. 最后, 对干涉仪组件进行了有限元仿真和环境振动试验, 分析和验证了干涉仪组件的低热传导性和力学可靠性. 结果表明, 所设计的四点环形凸台粘接形式相较于已有粘接形式在相同条件下由底座导入光学组件的热量减少了 63.54%, 随机振动时粘接面最大响应应力为 2 MPa, 干涉仪组件的模态频率均在 1 900 Hz 以上; 有限元仿真与试验结果的相对误差均在 8.6% 以内. 基于四点环形凸台面粘接并施加预紧力的干涉仪组件具有低热传导、高力学可靠性的特点, 结构设计合理, 性能可靠.

关键词: 稳定性; 面形精度; 粘接面; 结构设计; 模态分析; 随机振动

中图分类号: TH744

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0922002-8

Design of Stable Satellite-borne Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer Support Structure

BAI Yu-long^{1,2}, SUN Jian¹, HAO Xiong-bo¹, WU Jun-qiang¹, BAI Qing-lan¹, FENG Yu-tao¹

(1 Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to ensure the mechanical stability and thermal stability of the satellite-borne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer on wind measurement, a low heat conduction and microstress support structure is designed, and the interferometer is clamped by the combination of bonding and elastic compression. Firstly, according to the structural characteristics and stability requirements of the interferometer, a ring bonding surface is proposed, the bonding surface is optimized and compared with the existing one. Then, in view of the question that the response stress of the interface between the interferometer and the base is too large under the condition of random vibration, a cover structure with pretension is designed to improve bonding reliability. Finally, finite element simulation and test are carried out to analyze and verify the low thermal conductivity and mechanical reliability of the interferometer assembly. Experimental results indicate that the ring bonding surface has a 63.54% reduction in the heat input from the base to the optical components under the same conditions than the existing one. The maximum response stress of the adhesive surface at random vibration is 2 MPa. The basic frequencies of the interferometer component are all above 1900 Hz. The relative error of the analysis and test results is less than 8.6%. The interferometer based on the ring bonding surface and

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41005019)和中科院西部青年学者(No. XAB 2016A07)资助

第一作者: 白玉龙(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干涉仪光机结构设计. Email: baiyulong@nuaa.edu.cn

导师(通讯作者): 冯玉涛(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱成像技术. Email: fytciom@126.com

收稿日期: 2018-04-25; 录用日期: 2018-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

pretension has the characteristics of low heat conduction and high mechanical reliability, the structure design is reasonable and the performance is reliable.

Key words: Stability; Surface figure; Bonding surface; Structural design; Modal analysis; Random vibration

OCIS Codes: 220.4830; 350.4600; 220.4840; 350.6090

0 引言

多普勒差分干涉技术(Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne, DASH)是一种新型风场观测技术,其通过观测大气成分精细光谱谱线的多普勒频移反演大气运动速度,广泛应用于测量中高层大气风场和温度^[1-4].一般而言,10 m/s 风速引起的谱线多普勒频移约为 10^{-5} nm,若要实现高精度的大气风场测量,测风干涉仪自身要保持极高的力学和热学稳定性.而星载多普勒差分干涉仪在运输、发射等阶段经历的力学环境非常复杂^[5],例如发射时需要承受加速度过载、随机振动等苛刻的力学载荷.卫星入轨后,温度波动会产生较大的热应力和结构热变形^[6].多普勒差分干涉仪作为测风干涉仪载荷的核心部件,除了在光学上采用消热设计提高热稳定性外,干涉仪支撑结构组件实现低热传导、微应力装夹和高力学可靠性也尤为重要.

国内外对干涉仪支撑结构进行了较为深入的研究.KILLEEN T L^[7]、孙剑^[8]等从材料、结构、固定方式等多个角度对法布里-珀罗干涉仪光学组件和结构组件进行了全面分析,设计了一种六点悬臂梁结构对干涉仪进行弹性装夹,通过调整臂上的螺钉对施加在干涉仪上的预紧力进行调整,可以实现微应力甚至无应力装夹,满足法布里-珀罗干涉仪的测风精度对热稳定性及力学性能的要求;李霞等针对空间调制型干涉成像光谱仪装校中的问题,提出了一种微应力装调结构^[9],在干涉仪上下表面各胶合了一块与干涉仪材料相同的玻璃平板作为安装面,使干涉仪不与金属结构件直接接触,避免接触处产生局部应力.但上述支撑结构均针对旋转对称结构的干涉仪.迈克尔逊干涉仪中由于有动镜存在,目前大多研究为针对其动镜进行的柔性支撑结构设计^[10-11].对于多普勒差分干涉仪这样无动件、形状不规则干涉仪的支撑问题,国内外文献中则很少涉及.

本文在上述研究的基础上,结合多普勒差分干涉仪的结构特点和稳定性要求,从降低热传导、实现微应力装夹、保障力学可靠性的角度出发,对多普勒差分干涉仪组件的支撑结构设计进行研究,优化了底座粘接面,设计了压盖和支撑杆为干涉仪提供预紧力,并进行了仿真和试验验证.

1 实体多普勒差分干涉仪结构特点及设计要求

光学组件如图 1 所示,由光栅、视场棱镜、分光棱镜通过间隔元件胶合为一体,整体呈“L”形.各元件及其作用、组成材料见表 1.实体多普勒差分干涉仪的基本结构与迈克尔逊干涉仪相似,使用两块平面闪耀光栅代替了迈克尔逊干涉仪两干涉臂上的平面反射镜^[12-13],由于两干涉臂几何长度和元件材料折射率的差异,两臂之间存在一个基础光程差.光线经准直后进入光学系统,被分光棱镜分为两束能量相等的相干光.两束光经光栅衍射后返回,再经成像镜头等比例缩放后由探测器接收.

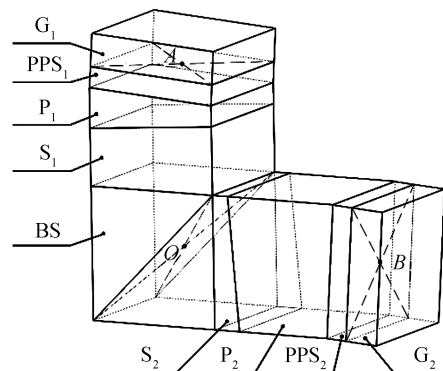


图 1 干涉仪光学组件

Fig.1 Optical components of interferometer

表 1 干涉仪光学元件及其材料
Table 1 Optical elements of interferometer and their materials

Element	Grating		Field prism		Splitter prism			Spacer	
	G ₁	G ₂	P ₁	P ₂	BS	S ₁	S ₂	PPS ₁	PPS ₂
Effect	Diffraction light		Adjust the angle of light		Beam split	Structural parts			
Material	Fused Silica	Fused Silica	H-ZF52A	H-ZF52A	K9	Fused Silica	CaF ₂	Fused Silica	Fused Silica

干涉仪支撑结构的作用是为完全由玻璃构成的实体光学组件提供支撑、调整 and 定位.光学组件对温度极为敏感,温度变化引起的相位变化为

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \delta_{\text{OPD}} \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

式中, δ_{OPD} 为两臂光程差变化量, σ_0 为 Littrow 波数.由于与金属结构件直接接触,温度波动易导致干涉仪两臂基础光程差发生变化.此外,结构件对其的装夹应力和光学胶带来的粘接应力会使工作元件面形发生变化.这些变化将导致干涉图出现基础相位和频率变化、调制度降低和干涉图倾斜,进而降低干涉仪测量精度.

本文从降低热传导、减小装夹应力和保证力学可靠性三个方面入手,对以氧原子 630 nm 气辉为探测源的多普勒差分干涉仪进行支撑结构设计,设计要求为:干涉仪两臂几何长度之差 $|OA - OB|$ 的变化量 Δl 优于 150 nm/°C,结构组件安装前后分光棱镜面形变化小于 10%,干涉仪组件满足航天力学可靠性要求.

2 支撑结构设计

支撑结构与干涉仪的连接方式有机械压紧、胶合、挠性安装等,胶合可以使结构简单、紧凑^[14],并能提供足够的机械强度以抵抗航天应用中的冲击和振动^[15].不过,光学胶在固化时会产生收缩应力,在温度变化时产生不同程度的热应力^[16],对干涉仪的面形产生影响.在设计粘接面时可以通过减小粘接面积来减小粘接部位的局部应力,但减小粘接面积的同时也会降低粘接可靠性.寻找这两个矛盾体的平衡点是多普勒差分干涉仪支撑结构设计的关键所在.本文设计了一种四点环形凸台面粘接形式,并对环形凸台面的结构参数进行优化设计,以达到降低粘接面局部应力、提高干涉仪对温度变化的适应性及粘接可靠性的目的.

2.1 底座

底座是承载干涉仪的主要零部件,和干涉仪下表面通过光学胶进行粘接.光学组件各元件材料的热膨胀系数存在较大差异,若将整个下表面与底座进行粘接,温度变化时将在接触面上产生不均匀热膨胀而影响干涉仪面形.因此,只对分光棱镜下表面进行粘接固定.分光棱镜采用了 K9 玻璃材料,为避免温度变化时在接触面上产生过大的热应力,影响干涉仪工作元件的面形精度,底座选用和分光棱镜热膨胀系数相近的殷钢材料,材料属性见表 2.

表 2 材料属性
Table 2 Properties of different materials

Material	Modulus of elasticity/GPa	Poisson ratio	Density/(Kg · m ⁻³)	Coefficient of thermal expansion/(×10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
K9	81.32	0.21	2530	7.1
Invar 4J45	145	0.25	8130	7.5

文献[9]采用了如图 2(a)所示的网格化多点凸台粘接形式,在底座粘接面上加工出宽 1 mm、深 1.5 mm、间隔 8 mm 的流胶槽,将粘接面分割成若干小矩形,可以减小光学胶固化收缩时在粘接区域产生的应力.这种形式的粘接面积为 784 mm²,由于粘接总面积较大,两种材料间的不均匀热膨胀将直接对光学元件产生影响.同时,由式(2)可知,在胶层厚度 x 与光学胶导热系数 λ 一定的情况下,单位时间内通过胶层的导热热量 Φ 与温度变化率 dt/dx 及粘接面积 S 成正比,大面积粘接将使得通过金属底座传入干涉仪的热量大大增加.

$$\Phi = -\lambda S \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

文献[9]在干涉仪的非通光面上胶合了一块与干涉仪材料性能相同的玻璃平板,作为干涉仪上下表面的安装面,可以削弱光学胶收缩应力、结构件装夹应力和底座导入热量对干涉仪的影响.但这种方法会增加光学组件高度,加大安装难度,同时会使干涉仪组件在振动环境中的稳定性变差.因此,实体多普勒差分干涉仪采用分光棱镜与底座直接粘接的连接方式,必须合理控制粘接面尺寸.

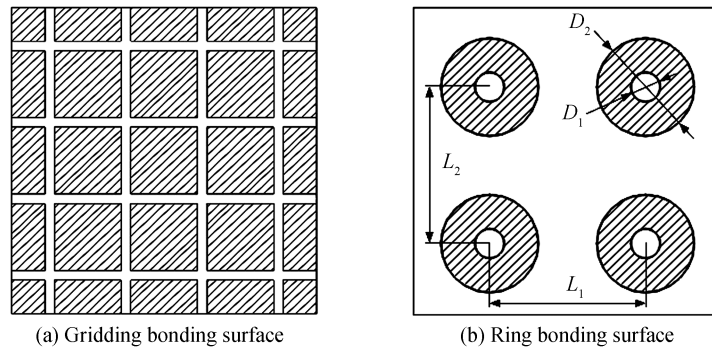


图2 不同的底座粘接面形式
Fig.2 Different adhesive surface of the base

为保证粘接强度,粘接面积也不应过小.若必须使用大面积粘接,应将其分成若干三角形、圆环形或其他形状的小面积粘接,最小粘接面积为^[17]

$$S_{\min} = W a_G f_s / J \quad (3)$$

式中, W 为光学元件的重量 273.85 g, a_G 为最恶劣条件下的加速度因子 54 g, g 为重力加速度, f_s 为安全系数 4, J 为粘结部位的抗剪强度或抗拉强度 10 MPa,计算得到该结构的最小粘接面积为 26.31 mm².

若采用三角形粘接,尖角处会产生应力集中,干涉仪组件在受到振动和冲击时,胶层在此处极易发生破坏而引起干涉仪脱胶.而圆环形结构具有良好的适应性和可靠性,因此,将底座粘接面设计为如图 2(b)所示的四点环形凸台粘接形式,与分光棱镜下表面进行粘接,如图 3.设环形粘接面内径为 $D_1 = 3$ mm, $L_1 = L_2 = 16$ mm,研究随机振动条件下粘接面最大响应应力与其外径 D_2 的关系,仿真结果如图 4 所示.



图3 光学组件粘接示意图
Fig.3 Adhesive schematic diagram of optical components

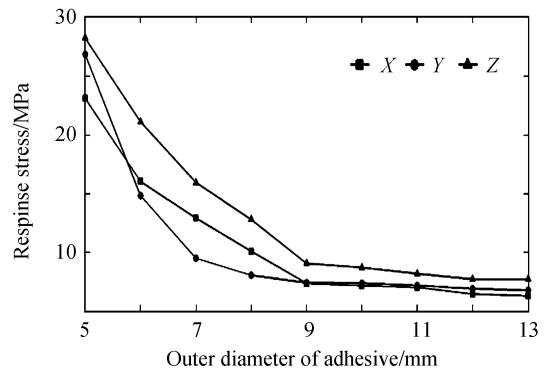


图4 随机振动条件下粘接面最大响应应力随其外径的变化曲线
Fig.4 Maximum response stress of adhesive surface vs. its outside diameters under the condition of random vibration

从图中可以看出,随机振动条件下粘接面最大响应应力随其外径的增加而减小.当外径大于 9 mm 时,响应应力减小趋势趋于平缓,3 个轴向随机振动激励时的最大响应应力均小于 10 MPa.考虑到减小热传导与粘接应力的要求,取粘接面外径 $D_2 = 10$ mm,此时粘接面积 $S = 285.88$ mm²,满足最小粘接面积要求,且相较于网格粘接面减小了 63.54%,可以大大减小通过底座传入干涉仪的热量.分光棱镜的入射面 BS_1 与出射面 BS_2 在 1℃ 温升时的面形误差见表 3,可见在温度变化 1℃ 时,热传导导致的面形变化 $PV < \lambda/50$, $RMS < \lambda/300$,两臂几何长度之差的变化量 $\Delta l = 130.06$ nm,均满足设计指标要求.而采用网格粘接面对多普勒差分干涉仪进行粘接时,相同条件下的 $\Delta l = 162.93$ nm,超出了 150 nm 的设计要求.可见,在光学组件仅与底座进行粘接时,四点环形凸台粘接方式能够减小底座与光学组件之间的热传导,保证光学元件面形等设计指标.

表3 分光棱镜在 1℃ 温升时的面形误差

Working face		BS_1	BS_2
Surface shape/nm	PV	12.974 0	12.413 7
	RMS	2.0210	2.103 1

环形粘接时,随机振动条件下粘接面最大响应应力为 8.194 2 MPa,虽小于所用环氧胶的抗拉强度 10 MPa,但安全阈值较低,在环境振动条件下仍有疲劳脱胶的危险.为提高干涉仪与底座的粘接可靠性,需要对干涉仪上表面施加预紧力.采用文献[7-8]提到的悬臂梁结构可以对干涉仪进行挠性装夹,提供预紧力的同时便于控制装夹应力的大小,避免对干涉仪面形产生影响.但这种方法会增加结构复杂性及装调难度.从提高粘接可靠性与减小装夹应力的角度出发,设计了压盖和支撑杆,采用橡皮垫弹性压紧的方式对干涉仪进行装夹.

2.2 压盖

在压盖上设计了和底座相对应的 4 个环形凸台,使装配带来的弯曲力矩最小,并通过 4 个支撑杆与底座连接.同时对其进行了轻量化设计,在压盖上表面设置加强筋,利用拓扑优化设计技术对盖板与加强筋厚度进行优化,降低压盖重量的同时有效提高了其结构刚度.

为避免压盖与分光棱镜上表面刚性接触,缓解分光棱镜受到的冲击,在两者中间放置了一块 FX-4 橡皮垫.同时为了提高光学组件与底座的粘接可靠性,安装时需要给橡皮垫施加预紧力,最小的预紧力 P_{\min} 的计算公式为^[17]

$$P_{\min} = W f_s a_G \quad (4)$$

安全系数 f_s 一般取 2~4,由于干涉仪下表面已与底座进行粘接,此处安全系数取 $f_s = 2$,计算得到需要施加给橡皮垫的最小预紧力 $P_{\min} = 131.57$ N.

对所选用橡皮垫的压缩量 Δh 随预紧力 P 的变化关系进行实验研究,结果如图 5 所示.可以看出,随着预紧力 P 的不断增大,橡皮垫压缩量 Δh 逐渐变大,且两者呈线性关系,经回归分析可建立 Δh 与 P 的关系为

$$\Delta h = 0.1437P + 1.114 \quad (5)$$

通过修研支撑杆上修切垫的高度来调整橡皮垫的压缩量,间接控制橡皮垫所受到的预紧力.使用 ZYGO 干涉仪对橡皮垫压缩量在 0~0.07 mm 之间的干涉仪面形进行检测,面形误差均在设计要求范围之内.其中压缩量为 0.07 mm 时的 RMS 值变化量为 7.3%,PV 值变化量为 6.7%,满足提高底座与光学元件粘接可靠性和微应力装夹的要求.以此压缩量对干涉仪组件进行安装,根据式(5),此时光学元件受到的预紧力为 479.37 N,满足最小预紧力的要求.

装配完成的干涉仪组件如图 6 所示.对其进行随机振动分析,粘接面最大响应应力为 2 MPa,相较于无压盖的方式减小了 75.6%,且远小于所用光学胶的抗拉强度,证明了弹性压紧能有效提高底座与干涉仪的粘接可靠性.

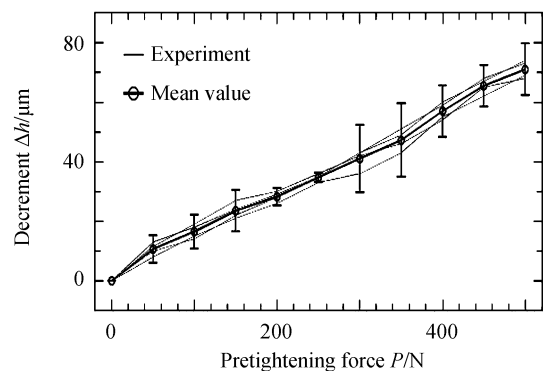


图 5 橡皮垫压缩量与预紧力的关系
Fig.5 Compression capacity of rubber pad vs. pretightening force

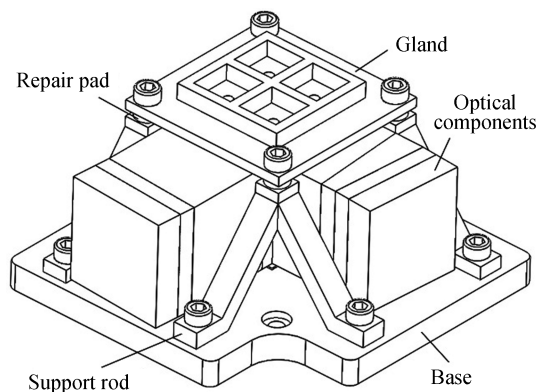


图 6 干涉仪组件装配体示意图
Fig.6 Schematic diagram of assembly body of interferometer components

3 动力学分析及试验验证

为了验证装配完成后干涉仪组件的动力学性能,进行了有限元仿真分析和环境振动试验.仿真分析时对模型进行了合理的简化,去掉了螺钉、倒角等对仿真结果影响较小的特征,得到的有限元模型如图7所示.

将装配完成的干涉仪组件通过转接板固定在试验台上,进行环境振动试验,如图8所示.在两臂光栅背面、分光棱镜侧面、压盖上、底座上共贴了5个传感器对组件的加速度响应进行检测,在转接板上靠近底座4个安装孔的位置贴了4个控制传感器作为输入参考.干涉仪组件总重1 006 g,为减小传感器质量对试验结果造成的影响,选择了最小的传感器,单个传感器重25 g.

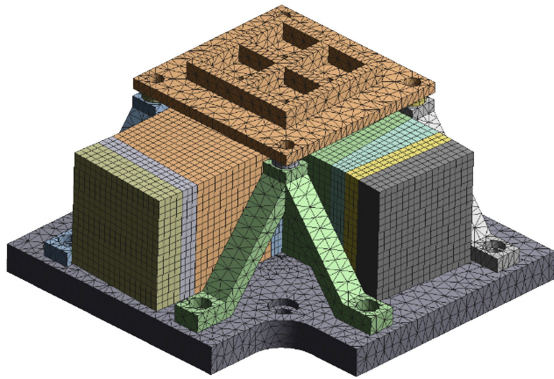


图7 干涉仪组件有限元模型

Fig.7 Finite element model of interferometer components

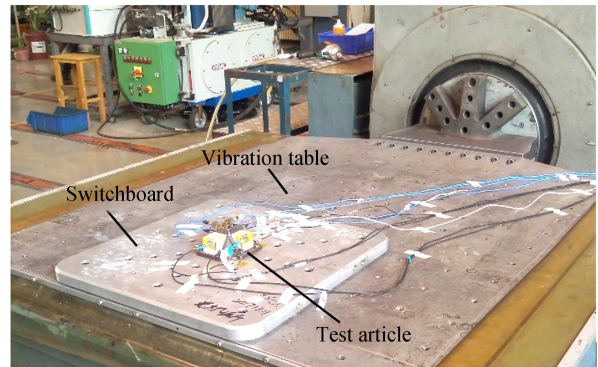


图8 试验现场

Fig.8 Test site

3.1 模态分析及试验验证

固定底座4个安装孔内表面,对干涉仪组件进行模态分析.仿真分析与试验结果的对比见表4.

表4 试验与仿真的模态响应结果对比

Table 4 Modal response results of test and analysis

Direction	Simulation/Hz	Test/Hz	Relative error
X	1 947.15	1 925	1.15%
Y	2 063.46	1 988	3.80%
Z	1 965.37	1 945	1.05%

由表4可以看出,试验与仿真分析所得的X、Y、Z三个方向的模态频率的相对误差均小于4%,在误差允许范围之内.干涉仪组件X、Y、Z三个方向的基本频率均在1 900 Hz以上,避免了运输和发射过程中干涉仪组件与卫星平台发生共振.

3.2 随机振动分析及试验验证

对干涉仪组件进行随机振动分析,从统计学角度分析该组件在加速度激励下的频率响应.根据经验,整个系统的结构阻尼设为0.01.在干涉仪底座安装位置按表5所示的加速度功率谱密度施加随机振动载荷,对其X、Y、Z三个方向的加速度频率响应进行分析,并通过随机振动试验验证仿真分析的准确性.仿真与试验结果见表6.

表5 加速度功率谱密度

Table 5 Power spectral density of acceleration

Frequency range/Hz	20~190	190~500	500~750	750~2 000
Acceleration power spectral density/(g ² ·Hz ⁻¹)	+3 dB/oct	0.06	0.045	-9 dB/oct
Root-mean-square acceleration/g	7.07			

表 6 随机振动仿真与试验数据对比

Table 6 Comparison of the date of random vibration analysis with test

Direction	Simulation/RMS	Test/RMS	Relative error
X	11.222	10.93g	2.67%
Y	9.589 7	9.772g	1.87%
Z	7.423 1	8.114g	8.51%

随机振动试验前后分别进行了扫频,两次扫频结果一致,表明试验结果真实可信.由表 6 可知,仿真分析和试验结果存在相对误差,其原因归结起来有:1)仿真模型和实物模型的差异.由于加工误差,以及仿真分析时对模型的简化,使得仿真模型和实物模型之间存在一定的差异,从而影响试验结果;2)传感器引入的附加重量.由于干涉仪组件重量较轻,传感器的重量占到了总重的 11.05%,且两臂光栅背面的两个传感器相当于增加了悬臂梁的长度和重量,如图 9,对试验结果造成较大影响;3)试验过程中的拆装引起的误差.完成 X 向试验后需要将干涉仪组件旋转 90°进行 Y 向振动试验,之后需要将干涉仪和转接板整体拆卸安装到 Z 向振动试验台上,这一过程对 Z 向随机振动的结果造成较大误差,但该误差小于 10%,在误差允许范围之内,表明支撑结构设计合理,力学性能可靠,能够起到对光学组件的支撑和保护作用.

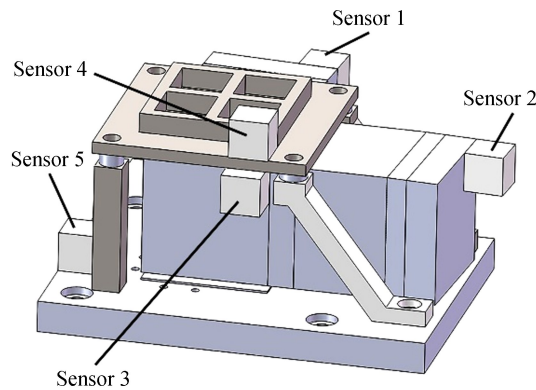


图 9 传感器布置

Fig.9 Sensor placement

4 结论

本文针对星载多普勒差分干涉仪的力学稳定性和热稳定性要求,提出了胶合与弹性压紧相结合的安装方案,设计了一种低热传导微应力装夹支撑结构.通过计算和仿真分析对粘接面尺寸参数进行优化,优化结果显示干涉仪与底座粘接强度满足要求,同时底座与干涉仪之间的热量传递被大大减小.对干涉仪组件的动力学性能进行了仿真分析和环境振动试验,结果表明,干涉仪组件的模态频率均在 1 900 Hz 以上,随机振动仿真与试验结果的相对误差均在 8.6%以内,验证了仿真分析结果的准确性,表明该低热传导微应力装夹支撑结构设计合理,性能可靠.研究结果将直接应用于地基和天基多普勒差分干涉仪工程研制中,并对多种类型干涉仪稳定性设计提供借鉴经验.

参考文献

- [1] HARLANDER J M, ENGLERT C R, BROWN C M, *et al.* Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): monolithic interferometer design and test[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1-2): 601 - 613.
- [2] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BROWN C M, *et al.* Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1-2): 553 - 584.
- [3] HARDING B J, MAKELA J J, ENGLERT C R, *et al.* The MIGHTI wind retrieval algorithm: description and verification[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(4):1-16.
- [4] ENGLERT C R, BROWN C M, MARR K, *et al.* As-built Specifications of MIGHTI - the thermospheric wind and temperature instrument for the NASA ICON[C]. *Fourier Transform Spectroscopy*, 2016:FTh4B.2.
- [5] CHEN Ding-yue. Research on environment vibration experiment upon optical precision spaceflight apparatus during transportation[J].*Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(7):711-714.

- 陈丁跃. 光学精密航天仪器运载中的环境振动试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(7):711-714.
- [6] CAI Wei-jun, FAN Bin, ZHANG Feng-qin, *et al.* High opto-mechanical stability design of multi-spectral camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(3):85-92.
蔡伟军, 范斌, 张凤芹, 等. 多光谱相机高稳定性光机结构设计技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(3):85-92.
- [7] KILLEEN T L, HAYS P B, KENNEDY B C, *et al.* Stable and rugged etalon for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer. 2: performance.[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(21):3903.
- [8] SUN Jian, FENG Yu-tao, BAI Qing-lan, *et al.* Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5):1167-1173.
孙剑, 冯玉涛, 白清兰, 等. 高热稳定性测风 Fabry-Perot 干涉仪标准具的设计[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(5):1167-1173.
- [9] LI Xia, YUAN Yan, ZHAO Jian-ke. Microstress installation and experiment result of the interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5):918-921.
李霞, 袁艳, 赵建科. 干涉仪的微应力安装力学分析以及试验结果[J]. 光子学报, 2007, **36**(5):918-921.
- [10] LIU Hua, LIU Wei-qi, FENG Rui, *et al.* Design of flexible-supporting mechanism with double compensation rods for moving mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6):1313-1319.
柳华, 刘伟奇, 冯睿, 等. 柔性双补偿杆式动镜支撑机构的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(6):1313-1319.
- [11] FENG Jun-hao, ZENG Li-bo, WU Qiong-shui, *et al.* Error analysis of moving mirror based on flexible hinge support [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017, (5):35-39.
冯骏豪, 曾立波, 吴琼水, 等. 柔性铰链支撑式动镜的误差分析[J]. 仪表技术与传感器, 2017, (5):35-39.
- [12] FENG Yu-tao, LI Juan, ZHAO Zeng-liang, *et al.* Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind observations based on satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, **34**(3):14-26.
冯玉涛, 李娟, 赵增亮, 等. 大气风场探测星载干涉光谱技术进展综述[J]. 上海航天, 2017, **34**(3):14-26.
- [13] YIN Shi, FENG Yu-tao, BAI Qing-lan, *et al.* Design of compact spatial heterodyne imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0312002.
尹诗, 冯玉涛, 白清兰, 等. 紧凑型空间外差成像光谱仪设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(3): 0312002.
- [14] DONG De-yi, LI Zhi-lai, LI Rui-gang, *et al.* Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10):2698-2707.
董得义, 李志来, 李锐钢, 等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(10):2698-2707.
- [15] WANG Cheng-bin, SUN Sheng-li, HU Ting-liang, *et al.* Analysis and test of affection of vibration on glue connection [J]. *Computer Simulation*, 2015, **32**(2):251-255.
王成彬, 孙胜利, 胡亭亮, 等. 振动对反射镜胶连接的影响分析与试验[J]. 计算机仿真, 2015, **32**(2):251-255.
- [16] GUO Jun-li, AN Yuan, LI Zong-xuan, *et al.* Bonding technique of mirror components in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(3):0313002.
郭骏立, 安源, 李宗轩, 等. 空间相机反射镜组件的胶结技术[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(3):0313002.
- [17] YODER P R. Opto-mechanical systems design[M]. China Machine Press, 2008.
YODER P R. 光机系统设计[M]. 机械工业出版社, 2008.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No. 41005019), the Western Academics of the Chinese Academy of Sciences(No. XAB 2016A07)

引用格式: BAI Yu-long, SUN Jian, HAO Xiong-bo, *et al.* Design of Stable Satellite-borne Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer Support Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9):0922002
白玉龙, 孙剑, 郝雄波, 等. 高稳定性星载多普勒差分干涉仪支撑结构设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(9):0922002