文章编号: 1672-8785(2015)03-0021-05

干涉式红外光谱仪分束器装校研究

樊 庆 1,2

(1. 中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室,上海 200083)

摘 要:介绍了作为干涉式红外光谱仪重要部件的分束器的作用。根据分束器装校后 产生的面形峰-谷(Peak-to-Valley, PV)值变化量必须达到 0.05λ(λ=632.8 nm)的要求。确 定了分束器的支撑方式。通过对其在平放、竖放和失重情况下的面形变化进行有限元 分析,得知对压片施加不同的压强可以控制分束器的面形变化。发现在竖放时影响最 大,此时能施加的最大压强为 0.866 MPa。通过分析,为分束器选择了弹性支撑材料, 确定了其尺寸大小,并将其加工成了实物。实际测量值证明,通过有限元分析方法能 充分满足分束器的高精度装校要求。这为提高系统的精度提供了依据。

关键词:干涉;分束器;面形;有限元方法

中图分类号: TH744 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.03.004

Study of Support of Beam Splitter for Interference Infrared Spectrometer

FAN $Qing^{1,2}$

 (1.Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083;
2.Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Abstract: The role of a beam splitter for an interference infrared spectrometer is presented. According to the requirement that the peak-to-valley (PV) value variation of a beam splitter should be 0.05 λ (λ =632.8 nm) after it is fixed, the supporting method of the beam splitter is determined. By analyzing the PV value variation of the beam splitter when it is in the states of flatness, verticality and zero-gravity by a finite element method, it is derived that the PV value variation of the beam splitter can be controlled by applying different pressure to the tablet used. It is found that when the beam splitter is in the state of verticality, its PV value is varied greatly and the maximum pressure which can be applied is 0.866 MPa. The elastic supporting material is selected, its size is determined and a supporting sample is made. The actual measurements show that the analysis by the finite element method can meet the high precision supporting requirement of the beam splitter fully. This provides the basis for the accuracy improvement of the instrument system.

Key words: interferometer; beam splitter; surface shape; finite element analysis

收稿日期: 2015-03-17 **作者简介:** 樊庆(1983-),上海人,助理研究员,主要从事空间干涉仪结构研究。 E-mail: araon19@163.com

0 引言

干涉式红外光谱仪是一种重要的红外遥感 仪器。它是基于迈克尔逊干涉原理,通过测量 离散干涉图并通过干涉图进行傅里叶积分变换 计算反演得到光谱图,从而获得光谱信息的。分 束器是干涉式红外光谱仪的重要部件,它将来 自红外光谱仪主光学系统的入射红外辐射一分 为二,其中一路红外辐射被反射到定镜,再由定 镜反射回分束器;另一路红外辐射透过分束器 到达动镜,再由动镜反射回分束器,两路反射辐 射束产生干涉调制信号。

分束器主要由分束片和补偿片组成,其中 分束片是产生分光干涉的关键部件。由于分束 片材料对不同波长光的折射率不同,因而产生的 光程差不同。为消除复色光产生的色散,需要附 加一块与分束片几何形状完全相同的补偿片, 组成分束器组件。分束片和补偿片材料选用硒 化锌 ZnSe。ZnSe 适合于红外光谱段,具有很高 的透过率和理化特性,不易潮解,尺寸大小为 Φ100 mm×10 mm。

在装校过程中,因重力和装夹受力大小的 不合理,分束片和补偿片的面形会产生很大的 变化,这会影响整台仪器的干涉效率。按照仪器 的光学要求,在地面调试和上天工作中,分束片 和补偿片装校前后面形 PV 值的变化量必须达 到 0.05λ(λ=632.8 nm),即 31.64 nm。本文对分束 器在平放、竖放状态下受重力的影响和在空间 应用时失重情况分别进行分析比较,以使其达 到良好的光学面形要求。

1 方案选择

对面形要求很高的分束器,采用金属直接 压紧的方法固定是不可行的。机械单个零件的 加工精度一般只能达到微米级,再加上装配、公 差配合的误差,以及通过螺钉压紧时分束片和 补偿片产生的挤压变形,面形 PV 值变化总量远 远超过 31.64 nm,这必定会影响光学器件的性 能。 我们采用浮动支撑的方法对分束片和补偿 片进行固定。浮动支持的方式有灌硅胶、杠杆重 锤、气囊、水银带和钢带等。杠杆重锤和钢带支 持只能在地面光学遥感仪器中应用。在空间, 由于失重,不能使用这种机械调整装置。气囊和 水银带都需要密封后才能在地面和空间使用, 结构相对复杂,所以一般在大口径的光学系统 中使用。对分束器结构来说,采用一般的灌硅胶 方式就能实现固定。在圆周方向上给分束片和 支承件之间灌硅胶,可以起到支持和限位的作 用,而在轴向上则可采用弹性垫片以三点支持 的压紧方式进行固定。

目前,很多研究人员对镜片的变形进行了 研究,并给出了一些定量的计算公式,如δ = K^{ρD⁴}。但这个公式仅仅说明镜片变形δ和镜片 口径D的四次方成正比,与镜片厚度h的平方 成反比,因为该公式中的比例系数K与镜片的 形状、载荷、支撑方式以及轻量化程度等有关。 要想得到精度很高的面形变化的定量值,特别 是对于面形精度要求很高的分束器,必须用有 限元的方法进行详细的面形分析。由于补偿片 和分束片的材料及尺寸均相同,为简单起见,本 文仅对分束片进行分析研究。

2 有限元分析

2.1 弹性垫片分析

对分束片进行轴向压紧时,螺钉的预紧力 是通过压盖对弹性压片的力再到对分束片的力 的传递来实现的,分析时可只建立分束片、弹性 压片和弹性垫片的模型,即镜子上下表面各有 三片弹性薄片,其中镜子下表面弹性垫片用于 固定。在镜子上表面的弹性压片上施加压力,模 拟螺钉预紧力的作用,具体模型如图1所示。



图 1 轴向压紧的简化模型

考虑到分束片和补偿片有相对距离的要求,其轴向变化量不能太大,必须对下表面弹性垫片的材料和尺寸进行选择。分别选取硅胶和 聚四氟乙烯,其材料属性见表1,厚度分别取0.1 mm和0.5 mm。分束片上表面的弹性压片选用 硅胶材料。对上表面的三个硅胶片分别施加大 小为1 MPa的压强载荷时,通过有限元的方法 算得分束片上表面和下表面的轴向位移量(见表 2) 。

以上几种方案中,厚度为 0.1 mm 的硅胶和 聚四氟乙烯方案都符合分束片和补偿片对相对 距离的要求。但聚四氟乙烯材料的轴向位移相 对小一些,其上表面的位移量为 0.1245 µm,下 表面的位移量为 0.02641 µm。因此,可以对这种 材料进行研究。

	弹性模量 (GPa)	密度 (g/cm^3)	泊松比	线膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)
分束片 $Z_N S_E$	67.2	5.27	0.28	7.57
硅胶	0.004	1.2	0.49	200
聚四氟乙烯	0.7	2.2	0.4	103
安装架 LY12	72	2.78	0.33	25.4

表1 材料属性表

表 2 上表面和下表面轴向位移的最大值

材料	厚度 (mm)	上表面轴向位移 (μm)	下表面轴向位移 (μm)
硅胶	0.1	0. 1247	0.02707
	0.5	21.74	21.71
聚四氟乙烯	0.1	0.1245	0.02641
	0.5	0.5163	0.4403

2.2 状态变化分析

由于所有空间光学仪器都在地面加工和制 造,从设计到最后检测的各阶段它们均会受到 地球引力的影响。遥感仪器在空间工作时虽然不 再受到重力的作用,但将受到重力释放效应的 影响,相当于受到反向重力的作用。对于传统低 精度的光学系统,由于镜片的口径较小,重力等 因素的影响一般可以忽略。但对于超高精度的 干涉式红外光谱仪,工作状态的改变会导致镜面 变形,从而使其不能满足纳米级的精度要求。 因此要对分束片的支撑状态进行有限元分析, 然后选择合适的压紧力。我们对平放、竖放和失 重状态分别进行了分析,并确定平放时重力作 用于分束片的轴向方向,而竖放时重力作用于

图 2 为分束器装配后的组件图。选用铝合金 LY12 为安装架。在圆周方向上给分束片和安

装架之间灌硅胶,下表面选用三个 0.1 mm 厚的 聚四氟乙烯垫片,上表面选用三个硅胶弹性压 片,材料属性见表 1。按照要求建立的有限元模 型如图 3 所示。



图 3 分束器分析模型

模型共建立了 7980 个三维实体单元和 39721 个节点。对硅胶压片分别施加 0 MPa、0.2 MPa、 0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa和 1 MPa的压强载 荷后,得到了分束片上下表面的轴向变形值。 因光线不通过分束片最外圈用于装配的压边位 置,只采用光学有效口径内节点的数据,获得的 分束片上下表面的面形 PV 值见表 3。

对三种状态下分束片上下表面的面形 PV 值数据进行分析和处理后,得到了上表面在不同 压强时在平放、竖放和失重情况下的数值曲线, 如图 4 所示。下表面在不同压强时在平放、竖放 和失重情况下的数值曲线如图 5 所示。

表 3 分束片上下表面的 PV 值 0 MPa0.2 MPa $0.4 \mathrm{MPa}$ $0.6 \mathrm{MPa}$ $0.8 \mathrm{MPa}$ 1MPa 上表面 PV 值 (nm) 17.8680 15.7756 15.661220.4471 27.2651 34.0820 平放 下表面 PV 值 (nm) 15.864520.4991 15.771515.6407 15.511425.6219上表面 PV 值 (nm) 3.33159.0988 15.836522.5740 29.3114 36.0488 竖放 下表面 PV 值 (nm) 3.30517.290712.203417.116822.0292 27.0207 上表面 PV 值 (nm) 0 27.8494 6.962313.9247 20.8871 34.8108 失重 下表面 PV 值 (nm) 0 5.251810.5037 15.7551 21.0065 26.2589





图 5 分束片下表面的 PV 值曲线

通过对图 4 和图 5 进行分析比较,发现 (1) 分束片下表面的 PV 值一般小于上表面,面形 变化相对小一些;(2) 在竖放和失重的情况下, 面形 PV 值和施加的压强呈一定的线性关系; (3) 在平放的状态下,当施加的压强小于 0.6 MPa 时,分束片主要受重力的影响,面形 PV 值和施

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.3, MAR 2015

加的压强不呈线性关系,但当压强大于 0.6 MPa 时,面形 PV 值随压强增大而变大; (4) 施加的 压强大于 0.6 MPa 时,面形 PV 的最大值发生在 竖放状态的分束片上表面; (5) 若要使面形 PV 值必须达到 31.64 nm,所施加的压强值必须在 0.8 MPa 和 1 MPa 之间。

通过比较和分析分束器竖放时在不同载荷 作用下分束片上表面的面形变化,确定了可施 加的最大载荷。对硅橡胶施加不同的压强,通过 有限元法求得分束器的各种面形数据。经过分析 比较,发现施加的载荷为 0.866 MPa 时,分束片 有效口径内面形的相对变化量为 31.6 nm,满足 使用要求。有效口径的内轴向变形云图如图 6 所 示。



图 6 分束片有效口径内轴向变形云图

干涉式红外光谱仪工作在恒温的环境中, 一般情况下没有温度变化。但为了提高设计要 求和可靠性,也须考虑环境温度变化对分束器 产生的影响。考虑到分束器中4种材料的热胀系 数差别较大,因此可以利用线膨胀系数互补的 特点来减小甚至可消除环境温度变化后对分束 器的作用力。

按照:

 $\alpha_{\mathrm{ff}} \times h_1 = \alpha_{\mathrm{ff}} \times h_2 + \alpha_{\mathrm{ff}} \times h_3 + \alpha_{\mathrm{ff}} \times h_4$

式中, α_{H} 、 α_{R} 、 α_{ϕ} 和 α_{et} 分别为铝合金架、 聚四氟乙烯垫片、分束片和硅胶压片的线膨胀 系数; h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 分别为铝合金架、聚 四氟乙烯垫片、分束片和硅胶压片的厚度,其中 $h_2=0.1 \text{ mm}$, $h_3=10 \text{ mm}$, $h_1 = h_2 + h_3 + h_4$ 。可 求得 $h_4=0.98 \text{ mm}$,即垫硅胶片的缝隙大小。而分 束器受的最大压强载荷为 0.866 MPa,通过有限 元分析可知,硅胶压片变形前的原始尺寸为 1.09 mm。

补偿片和分束片的尺寸大小相同,可以使 用同样的安装结构进行设计。安装调试出来的 分束器实物如图7所示。在分束片和补偿片之间



图 7 分束器实物

放置一个中间环,确定固定架的参考面。安装光 学元件时,在缝隙内塞入等厚的铜片,以保证光 学元件处于框架正中间,然后在安装座与镜体之 间的间隙内注入硅胶。轴向上压紧,压圈对硅胶 压片的力再传递到分束片。这种设计方案能保 证光学元件的安装精度,使面形变化量处在合 理的范围之内。

用波长 λ 为 632.8 nm 的商用干涉仪分别测 量了分束器装校前后的面形,测得分束片和补 偿片的 PV 值变化量分别为 0.049λ 和 0.05λ,满 足光学要求。

4 结论

通过有限元的方法对处于平放、竖放和失 重情况下的分束器进行了分析,并通过对压片 施加不同的压强确定了分束器的面形变化。这 种方法能有效进行光学装校控制,充分满足分 束器高精度装校要求,这为提高系统精度提供 了依据。

参考文献

- Glumb R J, Jordan D C, Predina J P, et al. The Crosstrack Infrared Sounder(CRIS) [J].SPIE, 2000,4131: 108–119.
- [2] Elwell J D, Cantwell G W, Scott D K, et al. A Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS) for Hyperspectral Atmospheric Remote Sensing: Instrument Overview and Preliminary Performance Results[J]. SPIE, 2006, 6297: 1– 12.
- [3] 高明辉.空间光学遥感器超薄反射镜及其支撑结构 研究 [D].中国科学院长春光学精密机械及物理研 究所博士论文, 2004.
- [4] Bingham G E, Cantwell G, Robinson R C, et al. Image Stability Requirements For A Geosychronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS)
 [J].SPIE, 2001, 4151: 11–20.
- [5] 张德江, 刘立人, 徐荣伟, 等. 透镜自重变形引起波像 差的有限元分析 [J]. 光学学报, 2005, 25(4):538-541.
- [6] 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形 研究 [J].**光子学报**,2005,**34**(2):272–275.
- [7] 彭元静, 袁吕军. 有限元在大口径镜面研制中的应用 [J].光学技术, 2009,35(4):506-509.