第 3 卷　第 6 期　　中国光学与应用光学　　Vol. 3　No. 6
2010 年 12 月　　Chinese Journal of Optics and Applied Optics　　Dec. 2010

文章编号　1674-2915(2010) 06-0580-06

温差条件下组合色散棱镜支撑结构的实验分析

赵　博[1,2], 颜昌翔[1], 汪逸群[1], 王永猛[1,2]
(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: 介绍了超光谱成像仪采用的组合色散棱镜的支撑结构形式, 讨论了温度变化对成像的影响。根据使用需求选择了支撑座的材料, 模拟了 5 ～10 ℃温差条件下棱镜组件的变形情况。利用有限元法解决材料线膨胀系数不同所引起的棱镜反射面变形, 并分析了采用聚四氟乙烯垫片做温度补偿后垫片的厚度及接触面积对石英棱镜面型的影响。实验结果表明, 在支撑座和棱镜之间增加聚四氟乙烯垫片后, 石英棱镜的面型达到了 λ/6 的指标要求。本文提出的优化方法为组合色散棱镜支撑结构的设计提供了参考依据。

关　键　词: 棱镜; 支撑结构; 线膨胀系数; 面型; 有限元法
中图分类号: TP73;　TH744　　**文献标识码**: A

Experimental analysis of support structure for combined dispersing prisms at temperature difference

ZHAO Bo[1,2],　YAN Chang-xiang[1],　WANG Yi-qun[1],　WANG Yong-meng[1,2]

(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: The support structure of the combined dispersing prisms used in a hyper-spectrum imager is introduced, and the influence of the temperature changing on the image quality is discussed. The material of the clamping support is chosen according to the requirments, and the deformation of prism assemblies is simulated with the Finite Element Method(FEM) at the temperature differences of 5 ℃ to 10 ℃. It resolves emphatically the deformation of a prism reflector caused by the different linear expansion coefficients and analyzes the effect of the thicknesses and contact areas of the gaskets on the surface profiles of prism assembiles after the PTEE gaskets are used as a temperature compensation. Experimental results show that the surface profile of the quartz prism meets the requirement of λ/6 when the gaskets are added between the clamping support and the prism. The optimal result provides a reference for the support structure design of the combined dispersing prism.

Key words: prism; support structure; linear expansion coefficient; surface type; Finite Element Method(FEM)

收稿日期: 2009-08-15; **修订日期**: 2009-10-23

1　引　言

超光谱成像仪是一种新型遥感器, 它能够在连续光谱段上对同一目标同时成像, 直接反映出被观测物体的光谱特征, 甚至物体表面的物质成分[1]。在光谱仪中采用棱镜进行分光具有多种优点, 如只有单级光谱, 不存在叠级问题; 经棱镜色散后的光谱是连续性的且透过率极高等[2]。由于不同波长的光在同一介质中具有不同的折射率, 在棱镜分光系统中, 复色光入射到色散棱镜主截面上, 在棱镜内部会被分成各种颜色的光谱。棱镜色散分光具有非线性, 光谱成像时会造成像元大小不均, 本文选用两种不同玻璃材料的组合棱镜来减轻色散非线性的不利影响。色散元件由一块石英棱镜和一块 F4 棱镜组成, 石英棱镜的一个面为反射面。

根据瑞利判据, 当镜面变形量为 λ/8 时, 人眼即可观察出光学系统像质发生的变化, 也就是说只要棱镜表面发生微小的变形即会引起成像质量的变化[3]。光谱仪处于太空环境时, 采用温控措施来保证各部件的正常运作, 棱镜组件所处的温度环境一般为(20 ±5) ℃, 并且随时会发生变化。由于玻璃的线膨胀系数是金属的 1/10 ～ 1/100, 这种悬殊的差异, 使仪器所用材料收缩量相差很大, 尤其是冷却时, 金属材料和玻璃材料变形的不一致会使支撑面上产生的应力作用在棱镜成像面上, 进而损坏像质。

为解决温度变化对系统成像质量的影响问题, 本文在充分考虑棱镜使用环境的基础上, 讨论了温度变化时棱镜与支撑结构线膨胀系数不同引起的应力变形, 力求整个组合棱镜反射面光程差 PV < λ/6, 以保证光学系统的成像质量。

2　组合棱镜支撑设计

2.1　棱镜支撑座结构形式

光谱仪分光采用双棱镜形式, 棱镜的支撑结构既要提供足够的刚度与强度, 又要经受应用中存在的激烈冲击、振动和温度变化, 使棱镜能保持位置的正确并正常使用。

图 1 为单个棱镜的支撑结构, 弹性衬垫和螺钉能为棱镜保持正确位置提供必要的预载[4]。

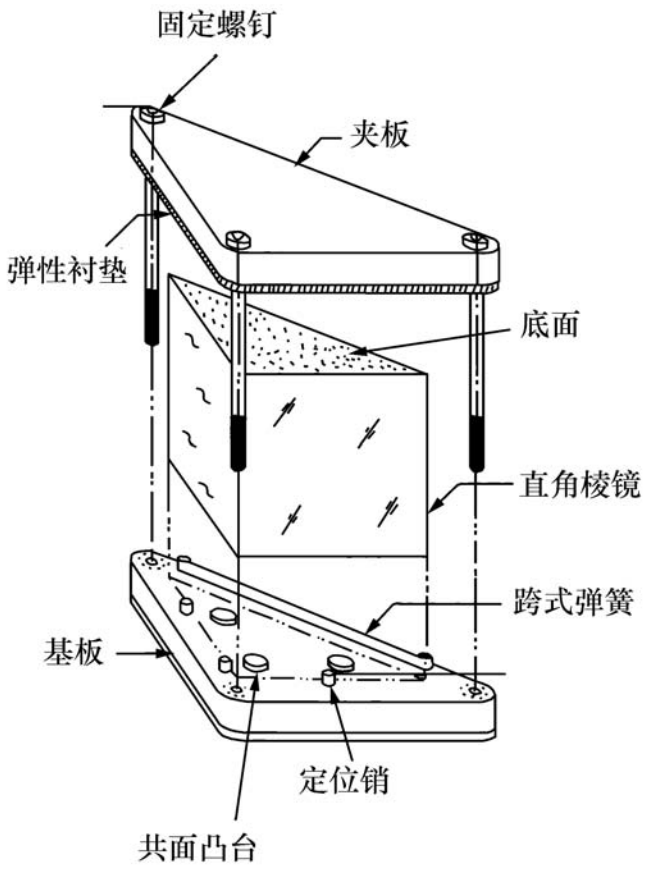


图 1　棱镜支撑结构

Fig. 1　Support structure of prism

文中棱镜的支撑座采用整体设计, 通过精密铸造成型, 由数控加工获得所需的外形尺寸。每一块棱镜都通过 3 颗顶丝压紧, 然后调整顶丝的预紧力来消除棱镜加工误差的影响, 保证棱镜位置的正确。

棱镜支撑座如图 2 所示。底板有 4 个共面凸台, 每个棱镜都与其中 3 个凸台接触, 保证结构的紧凑和简化; 侧挡板各有 3 个共面圆环形凸台, 与棱镜小面积接触并设置加强筋以保证整体结构的

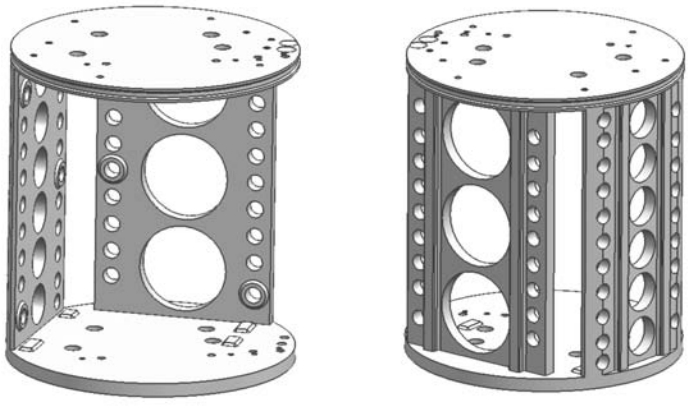


图 2　棱镜支撑座模型

Fig. 2　Model of prism clamping support

强度,在挡板上打通孔以使结构轻量化。

棱镜支撑结构整体模型如图 3 所示。其棱镜侧面设置了挡块,用螺钉紧固在底板上,使棱镜夹持在棱镜座中以保证棱镜位置的固定,同时不遮挡通光孔。

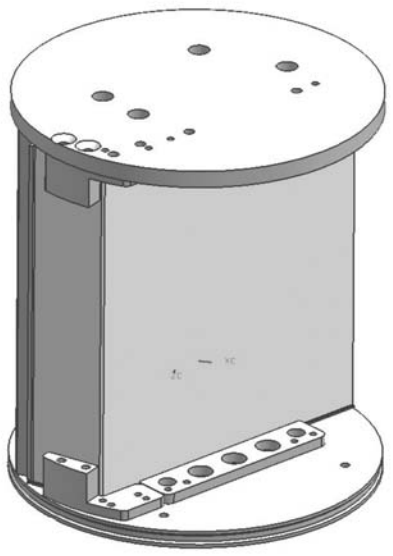


图 3 棱镜支撑结构整体模型

Fig. 3 Whole model of prism support structure

2.2 材料的选择

在工作温度载荷作用下,棱镜及其支撑结构的变形会导致棱镜光学面型及其它光学参数的变化,从而影响光学系统的成像质量。为缓解温度对棱镜带来的不利影响,在材料选择上可采用以下两种方法:

(1) 温度补偿法

前苏联光学和天文学家马克苏托夫提出的温度补偿法,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,放在棱镜和支撑框架之间,利用补偿块的大收缩量补偿棱镜收缩量的不足[5]。

(2) 用低膨胀系数材料制作支撑结构

若支撑结构的材料与玻璃的线膨胀系数接近,在环境温度变化时,支撑座与棱镜的变化率基本一致,线膨胀系数的影响就会较小。

在实际应用中,必须从密度、抗拉强度以及热稳定性 3 个方面来选择棱镜支撑框架的材料。从表 1可以看出,殷钢具有较小的线膨胀系数,然而密度过大,不利于减重;铝合金密度最低,但线膨胀系数过大;钛合金则具有较好的综合性能。

表 1 材料属性表

Tab. 1 Properties of different materials

材料	密度/(10^{-6}kg·mm^{-3})	线膨胀系数/(10^{-6}·℃$^{-1}$)	抗拉强度/MPa
殷钢	8.1	1.5	470
铝合金	2.8	23.6	490
铸钛合金	4.4	8.9	872.2
聚四氟乙烯	2.13	123	-

钛合金是一种广泛应用的高性能材料,它强度高,密度约为钢的 60%,抗蚀性好,低温性能好,比铝的线膨胀系数小,因此,棱镜支撑座的材料多选用钛合金。

3 有限元分析及验证

3.1 有限元分析步骤

对于一种给定的棱镜安装形式,使用有限元分析法可以计算其力学和热学特性[4]。接触问题是一种典型的边界条件非线性问题,其特点是:边界条件不是在计算的开始就可以全部给出,而是在计算过程中确定的,接触体之间的接触面积和压力分布随外载荷变化,同时还可能考虑接触面间的摩擦行为和接触传热[7]。模型中在多个部位有接触发生,所以选用接触分析较好的 Abaqus 软件进行有限元分析[8]。给定棱镜组件的工作温度为(20 ±5) ℃,分析时设定初始分析步温度为 25 ℃,最终分析步温度为 15 ℃。石英棱镜反射面的面型关系到整个光学系统的成像质量,在分析结束后对其面型进行计算验证,PV 值要求 < λ/6。有限元分析步骤如下:

首先,将 UG 模型导入到 Hypermesh 中,对模型进行简化,去除多余的圆孔和倒角,采用

C3D8R 六面体单元进行网格划分, 并附加材料属性, 如图 4 所示。

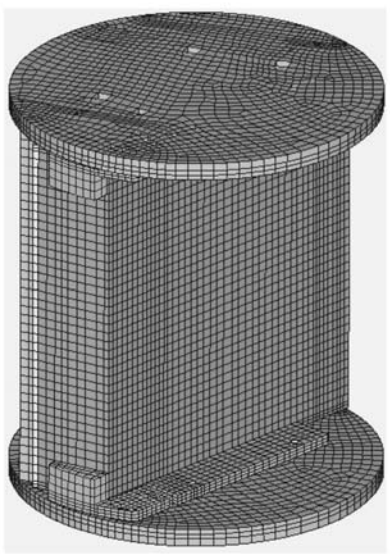


图 4　Hypermesh 有限元模型

Fig. 4　Finite element model in Hypermesh

其次, 将 Hypermesh 有限元模型导入到 Abaqus 中, 设置接触对、附加边界和温度场条件并进行有限元分析。

最后, 将有限元分析结果导入到 Patran 中进行数据后处理, 导出石英棱镜反射面的初始坐标及变形, 并用面型计算程序计算棱镜反射面的面型。

3.2　基于原模型的分析

棱镜夹持在镜座中, 并与镜座凸台直接接触, 受温度下降的影响, 棱镜组件各部分产生不同程度的变形, 如图 5 所示, 镜座出现了明显的变形,

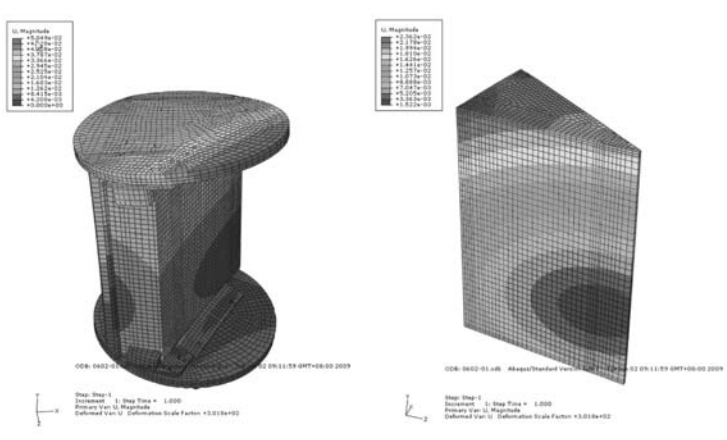


图 5　棱镜组件原模型位移变形云图

Fig. 5　Displacement cloud photos of original prism assembly

上部圆板边缘产生了翘曲, 石英棱镜在与凸台接触处也产生了位移变形。经计算得出反射面面型: PV 为 8.77 ×10^{-4} mm, RMS 为 1.37 ×10^{-4} mm, PV 值约为 1.4 λ, 此结果必然会造成像质的下降。由此可见, 随着温度的下降, 棱镜组件各部分线膨胀系数的不同对整个组件的变形会产生较大的影响。

3.3　基于增加垫片后模型的分析

聚四氟乙烯是一种很常用的塑料, 线膨胀系数很大[6], 所以采用聚四氟乙烯作为温度补偿的材料。由于整个棱镜组件较复杂, 各部分收缩情况不同, 因此增加的聚四氟乙烯垫片的厚度、大小及布置都要予以充分考虑。温度下降时, 假定棱镜组件中各部分均向中心收缩, 根据棱镜座与棱镜的收缩量之差可大致计算出温度补偿所需的垫片厚度为 1 mm 左右。经计算比对, 可概述为 3 种情况:

(1) 凸台改为聚四氟乙烯

将支撑座中的凸台改为聚四氟乙烯垫片, 厚度为 1 mm, 接触面积不变;

(2) 聚四氟乙烯垫片面积增大

垫片的厚度不变, 面积增大, 使垫片对棱镜在接触处形成包覆;

(3) 聚四氟乙烯垫片厚度调整

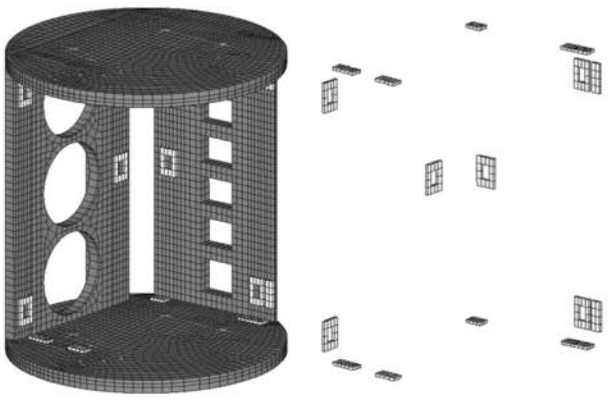
在第二种情况的基础上, 侧面垫片改为长条状, 根据位移变化情况改变各部位垫片的厚度, 底面垫片为小面积接触, 石英棱镜对应的垫片增加适当的厚度并嵌入镜座中。

垫片布置如图 6 所示, 分析结果云图如图 7 所示, 石英棱镜反射面面型数据如表 2 所示。由表 2 可以看出, 增加垫片后, 石英棱镜的面型明显改善。由于另一块棱镜与支撑座的线膨胀系数接近, 在两者接触处不设置垫片, 这种情况的计算结果并不理想, 接触处也应添加垫片; 此外, 不改变垫片的小面积接触, 只改变厚度的情况下, 计算结果也不够理想。因此, 应在保证垫片大面积接触

表 2　石英棱镜反射面面型数据

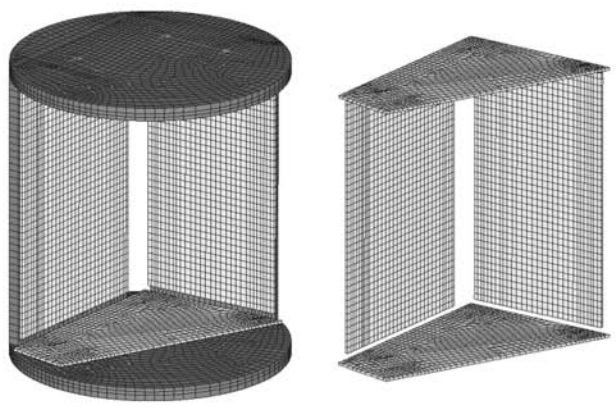
Tab. 2　Surface type data of quartz prism reflector

调整情况	调整前	1	2	3
光程差 PV(10^{-4} mm)	8.77	1.56	1.29	1.18
光程均方根 RMS(10^{-5} mm)	13.7	2.98	2.93	2.90



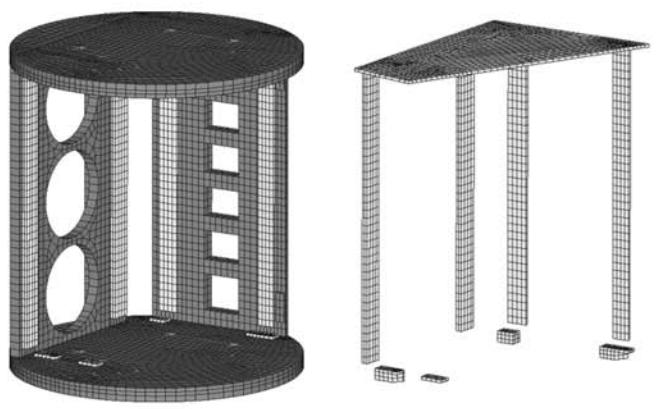
(a) 凸台改为聚四氟乙烯垫片

(a) Boss changed into PTFE gasket



(b) 增大聚四氟乙烯垫片面积

(b) Increasing area of PTFE gasket



(c) 调整聚四氟乙烯垫片厚度

(c) Adjusting thickness of PTFE gasket

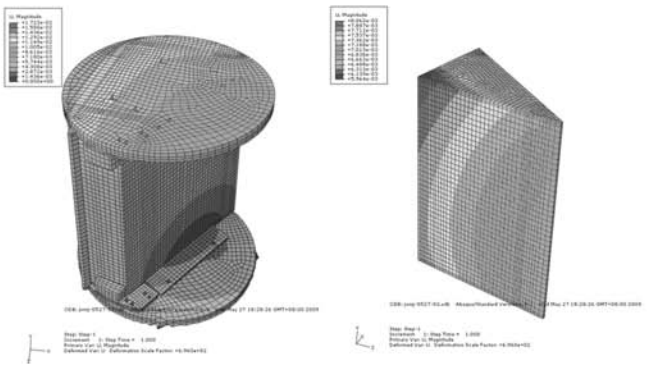
图 6 聚四氟乙烯垫片布置

Fig. 6 Arrangements of PTFE gasket

的同时，适当改变垫片的厚度以达到降低棱镜反射面光程差的目的。在第三种情况下，石英棱镜反射面的光程差 PV 为 1.18 $\times 10^{-4}$ mm，接近 $\lambda/6$。

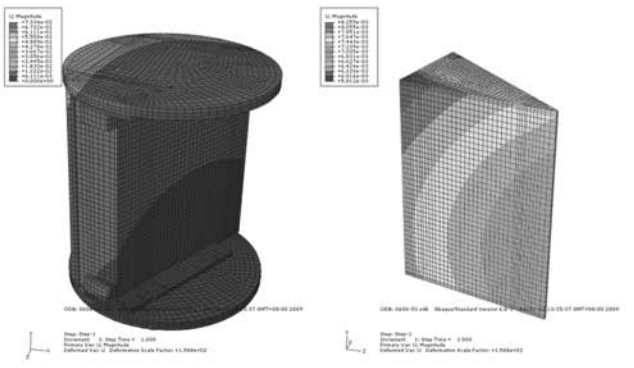
3.4 实验结果验证

实验选用第二种情况，使聚四氟乙烯垫片对棱镜进行大面积包覆。由于实验条件限制，温度为从室温降至 15 ℃，温差为 5 ℃，使用 Zygo 干涉仪检测出石英棱镜面型结果如图 8 所示，PV 为 0.163 λ，RMS 为 0.021 λ。其中 PV < $\lambda/6$，结果符合指标要求。



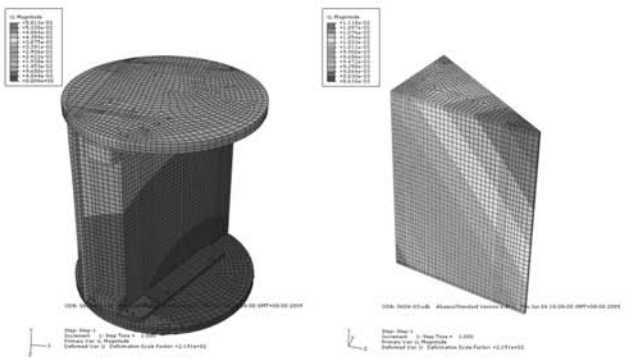
(a) 凸台改为聚四氟乙烯垫片

(a) Boss changed into PTFE gasket



(b) 增大聚四氟乙烯垫片面积

(b) Increasing area of PTFE gasket



(c) 调整聚四氟乙烯垫片厚度

(c) Adjusting thickness of PTFE gasket

图 7 调整后棱镜组件位移变形云图

Fig. 7 Displacement cloud photos of prism assembly after adjustment

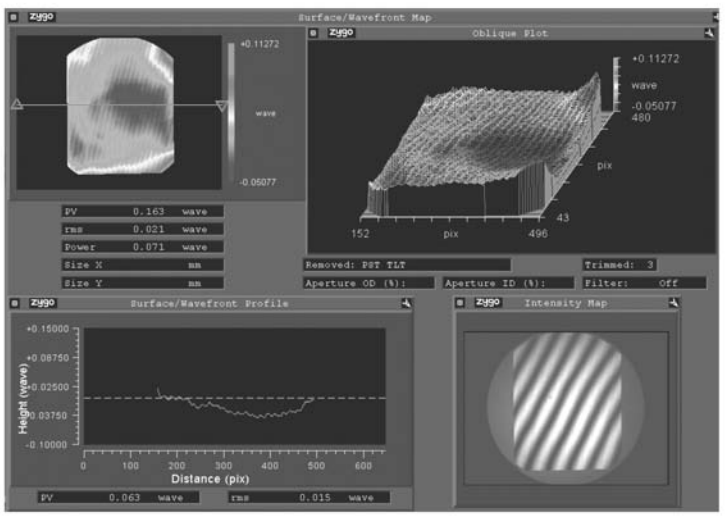


图 8 Zygo 干涉仪结果

Fig. 8 Result of Zygo interferometer

4　结　论

对于较复杂的空间光学系统, 温度的影响是不可忽略的, 尤其是温度变化引起材料线膨胀系数不同所带来的像质的损坏, 解决该问题的方法之一是合理选择光学支撑结构形式和光学系统所用的材料。

本文重点分析了 5 ~10 ℃温差条件下棱镜组件的变形情况, 提出了采用聚四氟乙烯垫片做温度补偿的方法, 给出了几种设计形式, 并提出通过增大接触面积的同时在特定部位改用适当的垫片厚度来减少棱镜组件变形的方法。实验结果显示, 石英棱镜面型达到了 λ/6 的指标要求。此外, 本文结果还表明, 利用有限元软件进行模拟分析可节约成本、提高效率, 并为实验提供参考依据。

参考文献:

[1] 沈中, 葛之江, 张连台. 航天超光谱成像技术原理及其发展现状[J]. 航天器工程, 2001, 10(4): 45-52.
SHEN ZH, GE ZH J, ZHANG L T. Technical theory and present situation of the hyper-spectrum imager in space[J]. *Spacecraft Eng.*, 2001, 10(4): 45-52. (in Chinese)

[2] 孙燕萍, 高军. 棱镜成像光谱仪色散特性研究[J]. 航天返回与遥感, 1999, 20(4): 23-26, 45.
SUN Y P, GAO J. Research on the dispersing character of the prism in spectrometer[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1999, 20(4): 23-26, 45. (in Chinese)

[3] THORBUM E K. Tolerance and techniques in high precision optical assembly[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 3: 113-118.

[4] PAUL R, YODER Jr. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed, Boca Raton: CRC Press, 2006.

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

[6] 工程材料使用手册(2 版) 第 7 卷 塑料 透明材料 绝缘材料[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
Manual of the Engineering Materials Vol.7 Plastic, Transparent Materials, Insulation Materials[M]. 2nd ed, Beijing: China Standards Press, 2001. (in Chinese)

[7] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SHI Y P, ZHOU Y R. *Examples and Solutions of the ABAQUS Finite Element Analysis*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)

[8] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
CAO J F, SHI Y P. *Resolution of Common Problems in ABAQUS Finite Element Analysis*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)

作者简介: 赵　博(1983—), 男, 河南巩义人, 硕士研究生, 主要从事光机结构设计及优化方面的研究。
E-mail: zhao_bo@126.com
颜昌翔(1973—), 男, 湖北洪湖人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。
E-mail: yancx@ciomp.ac.cn