

文章编号 1004-924X(2010)01-0118-08

室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用

韩旭^{1,2}, 吴清文¹, 董得义¹, 陈立恒¹, 吴雪峰^{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:对透射镜结构中室温硫化(RTV)胶层建模方法进行了研究。给出了节点相连(忽略胶层材料)、各向同性材料(三层体单元和一层体单元)和各向异性材料建立胶层材料模型的方法,分别采用3种方法对透射镜镜组建立了有限元模型,并进行了仿真模态分析。搭建了模态试验装置,测试了它的模态参数。结果表明,各向异性胶层材料的建模方法得到的一阶自由模态频率与试验测试的一阶自由模态频率误差只有0.3%,而各向同性材料的三层单元和一层单元建模方法、节点相连建模方法的误差分别达到1.8%,1.2%和13.9%。分析与测试结果表明,胶层材料在有限元分析当中是不可以被忽略的;综合分析显示,各向同性材料一层单元的建模方法减少了模型单元数量,且达到了工程应用的精度要求。

关键词:室温硫化胶;有限元分析;模态分析;模态试验

中图分类号:V475.3;TH703 **文献标识码:**A

Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror

HAN Xu^{1,2}, WU Qing-wen¹, DONG De-yi¹, CHEN Li-heng¹, WU Xue-Feng^{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 modeling methods for Room Temperature Vulcanization(RTV) adhesive in a reflective mirror structure were investigated. The modelling methods of node-connection(ignoring RTV adhesive), isotropy (three elements and one element) and anisotropy materials were introduced, respectively. The Finite Element Analysis(FEA) models of lens sets were established by three methods and the simulated mode was analyzed. Furthermore, the mode test equipment was setup and the mode parameters were tested for lens sets. The results show that the error of the first-order free mode frequency between the modeling method of anisotropy and the test method is only 0.3%, and the errors obtained from the three modeling methods of the isotropy of three elements, isotropy of one element and node connecting by are 1.8%, 1.2% and 13.9%, respectively. From the analysis and test, it is concluded that the RTV adhesive can not be ignored in FEA and the modeling method of isotropy of one element is a best choice to reduce number of models and to satisfy engineering requirements.

Key words: Room Temperature Vulcanization(RTV) adhesive; Finite Element Analysis(FEA); modal analysis; modal test

1 引 言

近年来,室温硫化(Room Temperature Vulcanization, RTV)胶作为粘结剂被广泛地应用在航天、航空、汽车制造中。在透射式光机结构系统中,透镜与镜框的连接就是采用 RTV 胶接方式来连接和定位的^[1-3]。与其它连接方式相比,采用胶接方式具有无应力装配、重量轻、寿命长、工艺简单和成本低等优点^[4],因此越来越多的工程师选择胶接的连接方式来固定光学元件。同时,选择合适的胶接材料^[5]还可消除由于镜筒和光学元件的热弹性变形引起的光学元件的面形变化。

由于胶层厚度薄且材料特性难以通过试验完全获得,RTV 胶层在有限元建模中常常被简化处理甚至完全忽视。杨恽等人^[6]认为胶合材料只起到了固定作用,对主镜热光学特性影响不大,所以在有限元模型中不予考虑;赵鹏^[7]等人也认为胶合材料只起到固定作用,对主镜的热特性影响不大,在有限元模型中不予考虑;傅丹鹰^[8]等人对镜子和镜框间的胶层进行了热刚度等效处理。

由于胶接工艺在空间相机中应用越来越广泛,RTV 胶层作为结构中的一部分在有限元分析中的作用逐渐被重视起来。李福^[9]等人对胶固平面镜进行了详细分析,建立了详细的胶层有限元模型,讨论了胶层的形状对光机结构面形的影响;赵伶丰^[10]等人对胶接头进行了分析研究,得到了胶层应力大小及分布情况;Keith^[11]对胶层进行了无热化设计,指出 RTV 胶层设计必须采用高的形状因子,他同时还总结了胶层厚度的计算公式。

胶层的研究逐渐成为光机结构设计与分析的一个热点问题,它的建模方法对于结构动力学以及热光学分析计算精度的影响在透镜结构分析中倍受关注。本文基于有限元法对 RTV 胶层的不同建模方法进行了研究,并对透射镜镜组进行了模态仿真分析和试验研究。

2 RTV 胶层建模方法

一个典型的透射镜结构镜组由镜框、透射光

学镜片和镜头挡圈构成,如图 1 所示,在镜框与光学镜片之间采用 RTV 胶胶接方式。

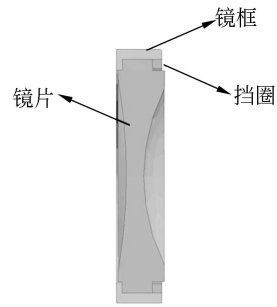
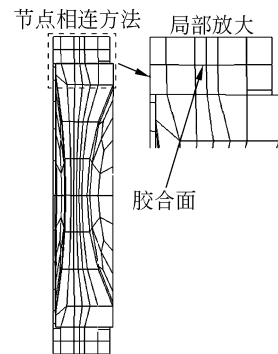


图 1 透射镜结构示意图

Fig. 1 Structure scheme of reflective mirror

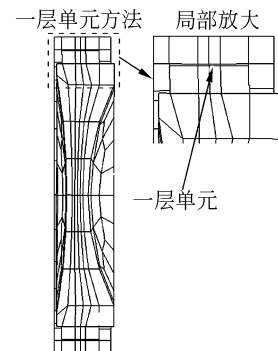
2.1 节点相连

由于胶层的厚度仅为 0.1~0.5 mm,与镜框和光学元件尺寸比起来非常小,对胶层有限元模型会产生非常多的细小单元,因此,RTV 胶层在有限元建模的过程中常常被忽略。节点相连法就是建模时在胶层的位置直接用一个共用的节点来传递镜框和光学元件之间的力和位移,如图 2(a)所示,这是结构分析工程师通常采用的方法。



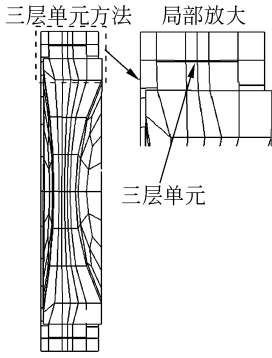
(a) 节点相连

(a) Node connection



(b) 一层单元

(b) One element



(c)三层单元

(c) Three elements

图2 不同 RTV 胶层建模方式的透射镜镜组有限元模型

Fig. 2 FEM of reflective mirror sets for different modeling of RTV adhesive

2.2 各向同性材料 RTV 胶层

2.2.1 各向同性材料 RTV 胶层(一层单元)

考虑到胶层与光学镜头和镜框的尺寸比起来非常小,根据工程的实际应用,只用一层体单元来描述胶层的真实应力应变关系,如图 2(b)所示。

2.2.2 各向同性材料 RTV 胶层(三层单元)

各向同性材料假设在 3 个方向的胶层材料特性是相同的,根据有限元理论使用体单元描述材料特性至少用三层体单元来反应胶层真实的应力应变关系,详细的各向同性材料胶层的有限元模型如图 2(c)所示。

2.3 各向异性材料 RTV 胶层

三维线性材料的应力应变关系如公式(1)所示

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

对于低 D/t 值的试样(D 为试样的直径, t 为试样的厚度),可以把 $\epsilon_{11} = -\nu\epsilon$, $\epsilon_{22} = -\nu\epsilon$, $\epsilon_{33} = \epsilon$ 和 $\sigma_{33} = \sigma$ 代入公式(1),简化得到

$$\sigma = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(-\nu\epsilon) + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(-\nu\epsilon) + \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\epsilon) = \epsilon E, \quad (2)$$

因此对于长的拉伸试样, σ/ϵ 就是它的杨氏模量 E 。但是对于薄层状的拉伸试样,由于其

具有很高 D/t 值,假设 $\epsilon_{11} = 0$, $\epsilon_{22} = 0$, $\epsilon_{33} = \epsilon$ 和 $\sigma_{33} = \sigma$ 代入公式(1),简化得到

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = mE = M, \quad (3)$$

式中, M 为薄层状材料的最大模量,它和材料的泊松比有很大的关系。

Gregory^[12] 根据薄层材料的以上特点,针对环状的 RTV 胶层提出了等效的三维应力应变方程,如方程(4)所示

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}M & \frac{k_{12}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & \frac{k_{13}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{12}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & k_{11}M & \frac{k_{12}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{12}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & \frac{k_{12}k_{11}\nu M}{(1-\nu)} & k_{33}M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

式中, M 为胶层材料的最大模量, $k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{33}$ 分别是不同方向上的修正系数, 对于不同材料的 b/t (b 为胶层的宽度, t 为胶层的厚度), 可以根据表 1 进行插值计算得到。

表 1 不同 b/t 和泊松比环状胶层的刚度修正系数

Tab.1 Correction factors for ring bonds with various combinations of b/t ratio and Poisson's ratio

$\nu=0.45$				
b/t	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{33}
1	0.403 6	0.671 7	0.270 4	0.143 3
2	0.510 2	0.786 6	0.525 7	0.375 0
5	0.752 1	0.926 7	0.837 2	0.851 8
10	0.878 60	0.968 5	0.930 1	0.990 7
20	0.938 3	0.985 4	0.967 5	0.999 4

各向异性模型仅需要一层体单元就可以把 RTV 胶层描述出来, 有限元模型如图 2(b) 所示。

3 仿真计算

为了比较几种不同方法计算的优劣, 在 MSC. Patran 仿真环境中建模, 利用 MSC. Nas-tran 进行计算, 采用上述 3 种方法对透射镜镜组

结构(两个镜头)进行有限元计算, 结构有限元剖视图如图 3 所示。

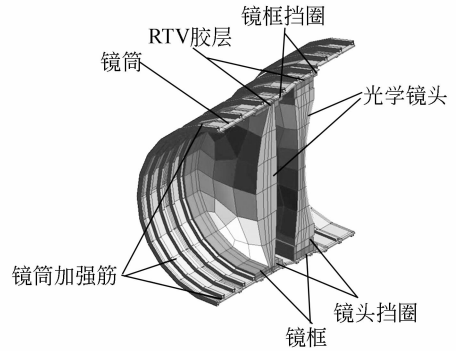


图 3 透射镜结构镜组有限元模型

Fig.3 FEM of reflective mirror sets

其中, 加强筋(铸钛合金)采用一维梁单元, 镜筒(铸钛合金)采用二维四边形单元, 镜框(铸钛合金)、光学镜头(光学玻璃)、挡圈(铸钛合金)采用三维六面体单元, RTV 胶层采用三维六面体单元, 它的厚度采用平均厚度 0.3 mm, 并且假设它均匀分布在光学镜头的圆周上, 同时假设胶层是小变形, 是在线性范围内变化的。透射镜结构材料参数如表 2 所示。

表 2 透射镜结构材料参数表

Tab.2 Material parameters for reflective mirror structure

材料名称	弹性模量 E (MPa)	密度 ρ (10^{-9} kg/mm ³)	泊松比 μ	热膨胀系数 (10^{-6} / $^{\circ}$ C)
铸钛合金 ZTC4	114 000	4.4	0.29	8.9
光学玻璃	56 000	3.14	0.279	0.87
RTV(适用方法 2)	696	1.15	0.45	236
RTV(适用方法 3)	$\begin{bmatrix} 1 & 623.86 & 1135.97 & 901.60 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 135.97 & 1 & 623.86 & 901.60 & 0 & 0 \\ 901.60 & 901.60 & 1 & 623.86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 910.34 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 910.34 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 910.34 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \text{刚度矩阵}$			

分别利用上述 3 种不同建模方法计算透射镜结构镜组的自由振动时的固有频率, 去除刚体位移后第一阶模态分别如图 4、图 5、图 6、图 7 所示。可以看到, 忽略 RTV 胶层直接把镜框与光学镜头连接起来后, 其模态振型与建立 RTV 胶

层有很大的不同, 忽略 RTV 胶层其模态振型仅仅在开口位置有位移的变化, 而建立胶层后, 由于胶层的模量非常低, 会使其模态表现为整个镜筒的位移, 而不仅仅是开口处。表 3 是去除了 6 个刚体模态后的一阶固有频率数值, 从表 3 可以看

出,不同建模方法对模态计算的结果是有一定的差异的。

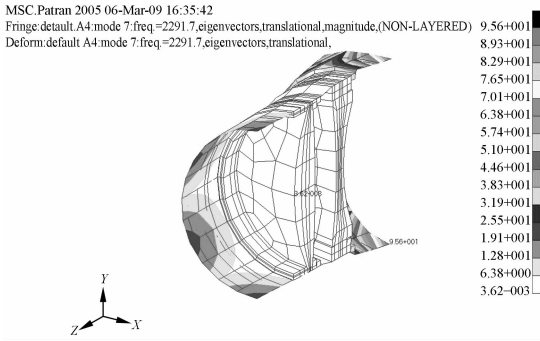


图 4 节点相连建模方法去除刚体模态后一阶模态
Fig. 4 The first-order natural frequency after eliminating rigid mode for modeling method of node connecting

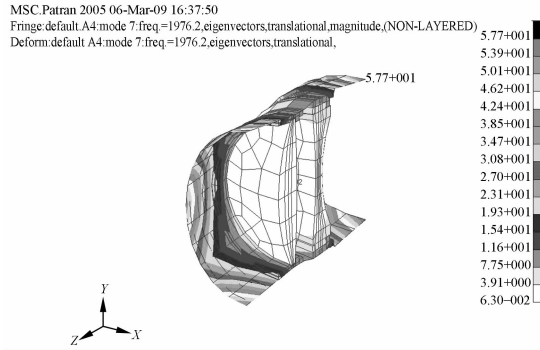


图 5 各向同性材料三层单元方法去除刚体模态后一阶模态
Fig. 5 The first-order natural frequency after eliminating rigid mode for modeling method of isotropy (three elements)

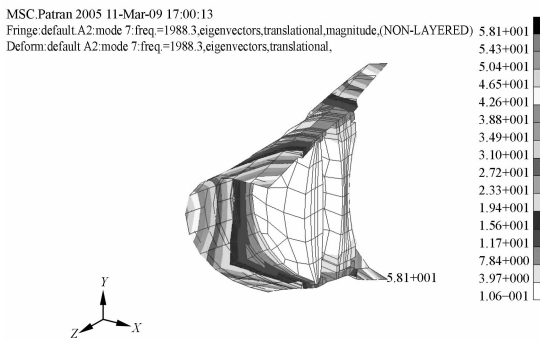


图 6 各向同性材料一层单元方法去除刚体模态后一阶模态
Fig. 6 The first-order natural frequency after eliminating rigid mode for modeling method of isotropy (one element)

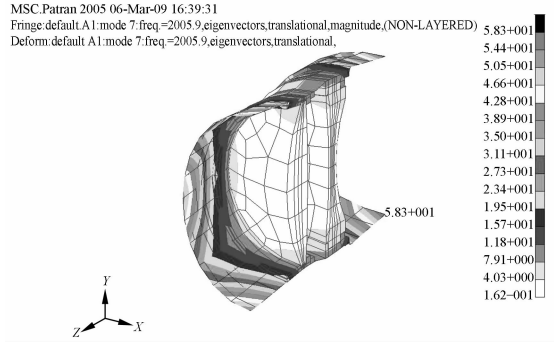


图 7 各向异性材料方法去除刚体模态后一阶模态
Fig. 7 The first-order natural frequency after eliminating rigid mode for modeling method of anisotropy (one element)

表 3 不同方法计算的固有频率

Tab. 3 Natural frequencies with different methods

	模型 1	模型 2		模型 3
		三层单元	一层单元	
去除刚体位				
移后的一阶	2291.7	1 976.2	1 988.3	2 005.9
固有频率/Hz				

4 试验验证

使用 m+p 模态测试仪对透射镜镜组结构进行模态测试,试验装置如图 8 所示,该装置采用两根弹簧悬挂结构来模拟自由边界条件。使用单点激励多点响应的方法,在镜筒的最上端平均选取 4 个激励点,加速度传感器粘贴在镜筒的最上端。结构的稳定框图和频率响应图分别如图 9 和图 10 所示。

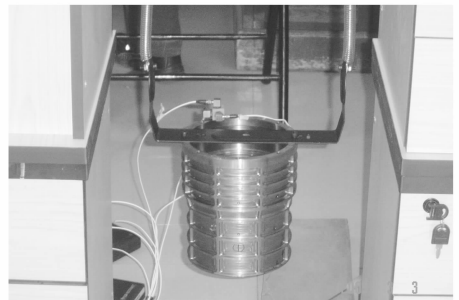


图 8 透射镜镜组结构模态测试装置图
Fig. 8 Mode test equipment of reflective mirror sets

在稳定框图中,系统的真实模态是真正的物理极点,而虚假极点是不稳定的,是零星出现的。

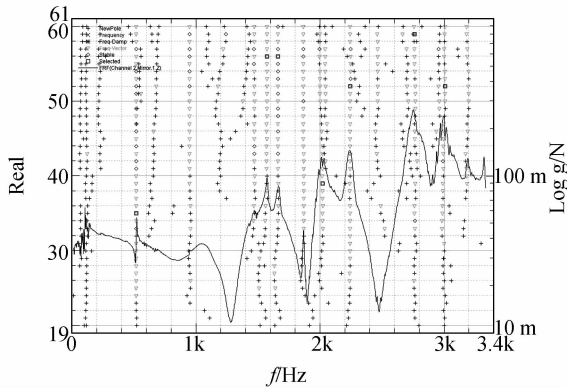


图 9 透射镜镜组结构稳定框图

Fig. 9 Stability diagram of reflective mirror sets

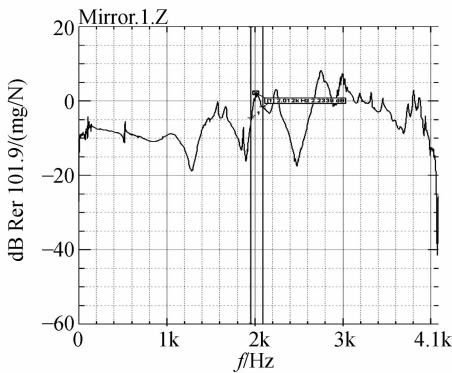


图 10 透射镜镜组结构响应图

Fig. 10 Frequency response of reflective mirror sets

因此,稳定框图是辨识系统真实极点和虚假极点的有力工具。从试验得到的稳定框图和响应图可以看出,透射镜镜组的第一阶模态频率为 2 012 Hz,分析认为,小于它的频率为试验卡具引起低阶固有频率,不是关心的频率。试验结果与模拟结果比较如表 4 所示。

表 4 不同方法计算的固有频率与试验测试值的比较

Tab. 4 Comparison between test and calculation for the first natural frequency

	模型 1	模型 2	模型 3
与试验比较			
误差/Hz	279.7	-35.8	-13.7
相对误差/%	13.9	-1.8	-0.68

本实验装置是模拟结构的自由模态,试验的误差源可能来自模拟自由边界的弹簧以及胶结加速度传感器带来的质量误差等。

5 结果讨论

(1) 模型 1 与试验结果的误差达到 13.9%,这主要是由于建模的过程中光学镜头与镜框直接相连,忽略 RTV 胶层从而导致镜头与镜框之间产生了较大的刚度,因此,计算结果偏大,这种方法在建模的过程中应尽量避免。

(2) 模型 2 的两种建模方法直接用各向同性材料来描述 RTV 胶层,没有考虑胶层在另外两个方向的变形。

(3) 模型 3 的建模方法充分考虑了胶层的各向异性的特点,能够精确地模拟出胶层的边界效应,这种方法的计算精度是最高的。

对比分析和试验结果表明,模型 2 和模型 3 的计算精度都可以满足工程的要求,即小于 $\pm 3\%$,但从建模的角度来说,模型 2 的一层体单元的建模方法可以迅速地达到建模的目的,同时它的材料参数的输入也比模型 3 方便。因此,模型 2 的一层体单元方法更易被工程所采用。

RTV 胶层的弹性模量由于胶层的粘弹特性是很难具体的得到的,因此有必要对弹性模量 E 进行优化计算,得到它在精度允许的取值范围。针对模型 2 一层体单元的建模方法,对弹性模量 E 的取值进行了优化,如图 11 所示。

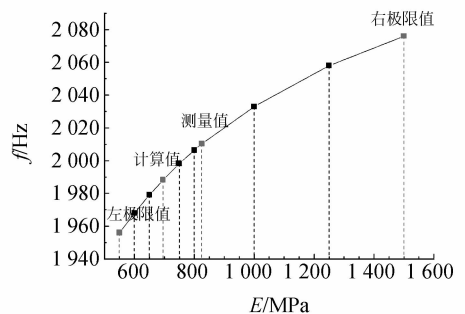


图 11 弹性模型 E 的取值计算

Fig. 11 Calculation of scope of elasticity module

从图 14 可以看出,弹性模量 E 在 550~1 500 MPa 取值都可以达到工程精度的要求,模态频率对其取值不敏感。

6 结 论

本文分析了 RTV 胶层不同的建模方法,通

通过对透射镜镜组的动力学仿真计算和试验验证,得到各向异性胶层材料建模方法的一阶自由模态频率与试验测试的一阶自由模态频率误差只有 0.3%,而与各向同性材料的三层单元和一层单元建模方法、节点相连建模方法的误差分别达到 1.8%,1.2%和 13.9%。综合来看,胶层在模型

中是不可以被忽略的,采用一层体单元各向同性的建模方法不但可以减少单元数量,同时其精度也可以满足工程需要。通过计算各向同性一层单元建模 RTV 胶层的弹性模量在比较宽的范围内取值,都可以得到满足精度要求的模态频率。

参考文献:

- [1] 苗健宇,张立平,吴清文,等.测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J].光学精密工程,2008,16(9):1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, et al.. Designing, manufacturing, and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1648-1653. (in Chinese)
- [2] 王俊.空间光学镜筒结构参数的探讨[J].光学精密工程,1998,6(6):51-55.
WANG J. An investigation scheme on structural parameters of a space optical tube [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(6):51-55. (in Chinese)
- [3] 杨洪波.空间遥感相机镜筒主要参数工程分析与计算[J].光学精密工程,1994,2(4):23-28.
YANG H B. Engineering analysis and calculation of the primary parameters for mirror drum of space remote-sensing camers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994,2(4):23-28. (in Chinese)
- [4] 程时远,李盛彪,黄世强.胶黏剂[M].北京:化学工业出版社,2008.
CH SH Y, LI SH B, WU SH D. *Adhesive* [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [5] HATHEWAY A E. Analysis of adhesive bonds in optics [J]. *SPIE*, 1993, 1998:2-7.
- [6] 杨恽,张伟,陈时锦.空间望远镜主镜的热光学特性分析[J].光学技术,2006,32(1):144-147.
YANG Y, ZHANG W, CHEN SH J. Study on the thermal optics property of primary mirror applied on a space telescope [J]. *Optical Technique*, 2006,32(1):144-147. (in Chinese)
- [7] 赵鹏,吴清文,卢铎,等.航天相机主镜热特性研究[J].光学精密工程,1997,5(6):64-68.
ZHAO P, WU Q W, LU E, et al.. A study of the thermal response of a primary mirror in spatial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(6):64-68. (in Chinese)
- [8] 傅丹鹰,殷纯永,乌崇德.空间遥感器的热/结构/光学分析研究[J].宇航学报,2001,22(3):105-110.
FU D Y, YIN CH Y, WU CH D. A study of thermal/structural/optical analysis of a space remote sensor [J]. *Journal Of Astronautics*, 2001,22(3):105-110. (in Chinese)
- [9] 李福,阮萍,赵葆厂,等.胶固紧平面反射镜的有限元分析[J].光学技术,2006,32(6):896-899.
LI F, RUAN P, ZHAO B CH, et al.. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive [J]. *Optical Technique*, 2006,32(6):896-899. (in Chinese)
- [10] 赵伶丰,白光明.复合材料胶接头分析研究[J].航天器环境工程,2007,24(6):393-396.
ZH L F, BAI G M. Analysis of adhesive bonded composite joints[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007,24(6):393-396. (in Chinese).
- [11] DOYLE K B. Athermal design of nearly incompressible bonds [J]. *SPIE*, 2002, 4771:296-303.
- [12] MICHELS G J, GENGERG V L. Finite element modeling of nearly incompressible bonds [J]. *SPIE*, 2002, 4771:287-295.

作者简介:



韩 旭(1974—),男,吉林长春人,博士研究生,工程师,1997年于长春工业大学获得学士学位,2000年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间遥控器的热光学研究及电器设备的振动和噪声故障诊断的研究。E-mail: frequency126@126.com



吴雪峰(1980—),男,吉林市人,博士研究生,2002年、2005年于长春工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航空相机热控制技术方面的研究。E-mail: ccutwu@126.com

通讯作者:



董得义(1979—),男,助理研究员,2002年、2005年于北京工业大学分别获得学士、硕士学位,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

导师简介:



吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士生导师,研究员,1991年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994年、1997年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn



陈立恒(1979—),男,吉林农安人,博士,2002年、2005年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,2008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器热控制技术方面的研究。E-mail: chenliheng3@163.com

●下期预告

Shack-Hartmann 波前传感器图像自适应阈值的选取

夏明亮^{1,2},李 抄^{1,2},刘肇南^{1,2},李大禹^{1,2},胡立发¹,宣 丽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)

Shack-Hartmann (S-H) 波前传感器光斑图像阈值的选取对质心探测精度有较大的影响。为了提高 S-H 波前传感器的质心探测精度,合理有效的阈值选取方法是有必要的。本文分析研究了 S-H 波前传感器光斑图像的特点,在此基础上提出了一种基于灰度直方图原理的多峰法自适应阈值选取方法。实验结果表明,对于信噪比 >4 的 S-H 波前传感器光斑图像,本方法能够比较有效的自动选取每帧图像的阈值。我们将使用本阈值算法的 S-H 波前传感器应用到自适应光学系统中,进行闭环校正实验。经过校正后,系统波前误差从 10.41λ (PV 值, $\lambda=632.8\text{ nm}$)降低到 0.12λ ,基本达到了衍射极限水平。研究表明,本方法可以满足 S-H 波前传感器的实用要求。