

文章编号 1004-924X(2010)10-2199-07

圆形反射镜无隙支撑方法的应用

沙 巍^{1,2}, 张星祥¹, 陈长征¹, 许艳军¹, 任建岳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:针对空间光学遥感器圆形反射镜在安装过程中会由于采用间隙配合胶接方法在温度变化时产生非对称应力从而引起非对称像差(主要表现为像散),以及使用的胶层为非线性材料使反射镜面形变化不可逆从而降低结构可靠性等问题,提出了基于过盈配合的无隙支撑方法。该方法依据最小势能原理,使用柔性块以过盈配合的方式固定反射镜。采取线性搜索方法分析得到了适当的过盈量(0.03 mm),利用有限元方法模拟实际工况,得到镜面面形变化情况。对反射镜组件进行温度循环试验,并利用干涉仪对反射镜进行检测。试验显示,温度变化 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,镜面面形 RMS 值最大为 0.018λ ,符合设计要求(RMS 值 $\leq 0.02\lambda$),干涉图表明反射镜受力均匀、无像散;在温度循环试验中,反射镜面形变化可逆。这些结果表明,对于圆反射镜,采用无隙支撑方法能够很好地解决温度变化对镜面面形的不利影响。

关键词:空间光学遥感器;圆形反射镜;无隙支撑;过盈配合;镜面面形

中图分类号:TP73;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101810.2199

Application of zero clearance support method based on circle mirrors

SHA Wei^{1,2}, ZHANG Xing-xiang¹, CHEN Chang-zheng¹, Xu Yan-jun¹, Ren Jian-yue¹

- (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: In the secondary mirror mounting procedure of a space-borne remote sensor, the method of clearance fixation with auxiliary adhesive is used to fix the mirror usually, which will cause the asymmetric aberration and influence on the imaging quality when the temperature is changed. Moreover, variation of the surface shape is irreversible due to the adhesive layer come from nonlinear materials. To improve the imaging quality and structure reliability, this paper proposed a zero clearance support method based on the lowest potential energy principle. Via the method of interference fixation with flexible blocks, the astigmatism aroused by non-symmetrical stress was avoided theoretically, and the irreversible problem was solved. The appropriate interference value (0.03 mm) was obtained by the finite element analysis. By using the interference value, both gravity and temperature variation($\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) were considered and the surface shape test was performed using an interferometer. Experiments show that the RMS value of the surface shape is 0.018λ , which meets the design requirements (RMS

收稿日期:2009-12-01;修订日期:2010-02-04.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

value $\leq 0.02\lambda$). obtained results demonstrate that the zero clearance support method for the circle mirrors can relieve the adverse effect of the surface shape caused by temperature variation.

Key words: spaceborne remote sensor; circle mirror; zero clearance support; interference fit; surface shape

1 引言

次镜是空间光学遥感器中重要的组成部分,其镜面面形直接影响成像质量。小型凸面圆反射镜通常用作光学系统中的次镜,在工程中,由于其直径小,通常采用柔性块配合点胶的边缘支撑方式进行固定。柔性块和反射镜的配合方式为间隙配合,人为安放反射镜时会不可避免地引入反射镜和镜框的中心偏差。在点胶固定的过程中,中心偏差会使点胶位置胶层厚度不均。温度恒定时,反射镜组件力平衡状态不变,反射镜和柔性块的固定位置无应力变化,镜面面形稳定。但光学遥感器在轨工作时,在空间热环境下^[1]热控系统不能保证反射镜组件恒温,所以各个点胶位置会因为温度变化产生应力。胶层厚度的不均匀会导致应力大小不等,即等效于一组非对称的应力作用于反射镜。

经过干涉仪检测,可以清楚发现反射镜干涉图存在非对称应力引起的非对称像差。试验证明,在镜面面形值(PV 值或 RMS 值)相同的情况下,对称像差对成像质量影响较小,非对称像差对成像质量的影响很明显。由于胶层属于非线性材料,温度变化引起胶层厚度非线性变化,故在温度循环中,反射镜镜面面形随温度的变化不可逆,导致系统整体可靠性降低。

本文针对空间光学遥感器次镜安装过程中由于采用间隙配合胶接的方法产生的像散和使用的胶层为非线性材料易降低结构可靠性等问题,提出了基于过盈配合的无隙支撑方法,避免了胶层厚度不均匀带来的不对称应力,消除了像散并解决了反射镜面形变化不可逆的问题。

2 反射镜组件结构

如图 1 所示,反射镜组件由反射镜、镜框、柔性块和压片 4 个部分组成。根据某型可见光相机光学设计,反射镜由 $\phi 136$ mm 的碳化硅材料(SiC)制成。镜框采用高体分铝基复合材料(Al/

SiC),与相机框架通过螺栓连接。反射镜与镜框之间由柔性块作为过渡,采用钛合金材料(TC4)。柔性块以牺牲支撑刚度为代价,使其具有一定柔性,吸收反射镜和镜框变形产生的应变能保证镜面面形^[2]。压片采用钛合金材料(TC4),用于限制反射镜在光轴方向的自由度。

根据光学设计要求,反射镜镜面面形应达到 RMS 值 $\leq 0.02\lambda$,而且反射镜组件应具有适应性,即温度在的一定范围内变化时,镜面面形依然满足设计要求。

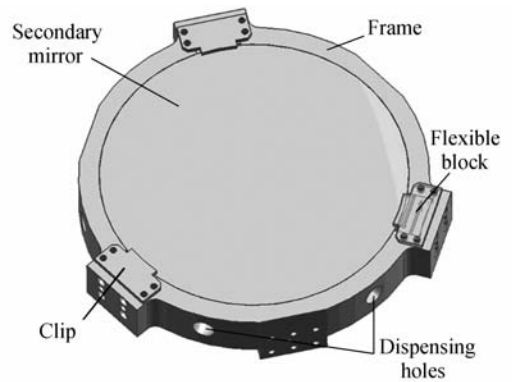


图 1 反射镜组件结构

Fig. 1 Structure of mirror component

3 间隙配合试验验证

柔性块与镜框固定后与反射镜接触的 3 个接触面同时加工,以保证 3 个面在同一个圆柱面上。接触面与反射镜配做,保证单侧间隙在 $0.007 \sim 0.01$ mm。装配后,反射镜轴向的自由度由压片限制。反射镜和柔性块间存在间隙,所以有 3 个自由度,即以光轴为轴线的转动和与光轴垂直平面中的水平、竖直 2 个方向的窜动。为保证光学系统的成像质量和可靠性,需要限制这 3 个自由度。在镜框的边缘,与柔性块成 30° 的位置上留有点胶孔(如图 1),在反射镜安装完毕后,自这 6 个孔点入硅橡胶(D04),经 144 h 胶完全固化,从而完全限制反射镜的自由度。

反射镜和柔性块存在间隙($0.007 \sim 0.01$ mm),所以反射镜与镜框不可避免有偏心,从而

引起 3 个点胶位置胶层薄厚不均。根据单侧间隙的工艺要求,胶层最厚和最薄位置之间的厚度差为 0~0.02 mm。反射镜组件所处的环境温度恒定的情况下,胶层厚度不均不会影响镜面面形。但空间光学遥感器在轨工作所处的空间环境恶劣,热控系统不能使反射镜组件恒温。温度变化时,固化的胶层厚度随温度变化,3 处点胶位置胶层厚度不同,所以厚度变化量也不相同,导致胶层对反射镜作用的应力不对称,引起非对称像差,主要表现为像散。

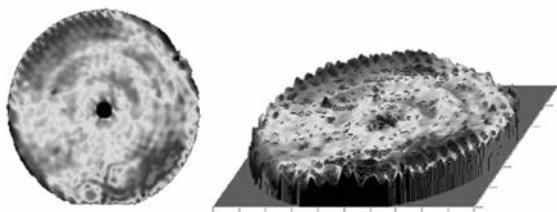


图 2 升温试验反射镜干涉图

Fig. 2 Interferogram of temperature increasing test

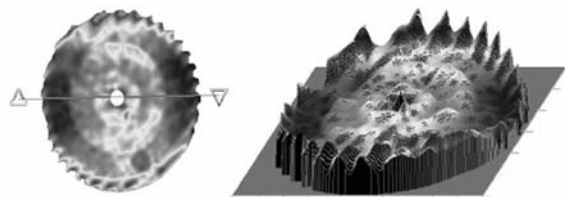


图 3 降温试验反射镜干涉图

Fig. 3 Interferogram of temperature decreasing test

利用干涉仪检测反射镜在温度变化下的面形,温度升高 4 ℃时的干涉图如图 2 所示,温度降低 4 ℃时的干涉图如图 3 所示。从图中可以明显发现面形非对称变化,引起像散。

为了确定反射镜面形随温度的变化趋势,需要对反射镜组件进行温度循环试验。在升温循环试验中,反射镜组件温度由 20 ℃升到 27 ℃再降到 20 ℃,反射镜面形变化趋势如图 4 所示,从图中可发现反射镜面形变化不可逆。随后将反射镜组件各部分拆下重新安装,进行降温循环试验,反射镜组件温度由 20 ℃下降到 14 ℃再升到 20 ℃,反射镜面形变化趋势如图 5 所示。图 5 的变化趋势与图 4 的变化趋势类似,镜面面形变化不可逆。镜面面形不可逆引起成像质量下降,降低了系统可靠性。

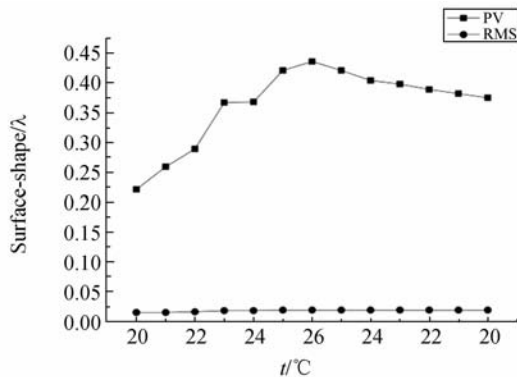


图 4 升温循环试验面形变化趋势

Fig. 4 Trend of surface shape variation during heating up cycling test

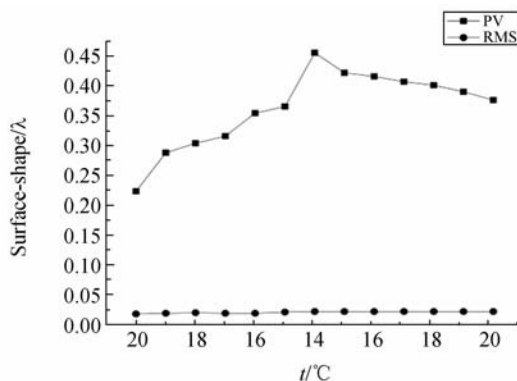


图 5 降温循环试验面形变化趋势

Fig. 5 Trend of surface shape variation during cooling down cycling test

4 无隙支撑方法

4.1 原理

反射镜与柔性块之间采用过盈配合的无隙固定方法可以避免使用胶作为固定媒介,从而在原理上消除了胶带来的非对称应力。反射镜和柔性块的过盈配合原理上可以简化为 3 根弹簧固定质量块的问题,如图 6 所示。温度的升/降对应弹簧与反射镜之间产生压力/拉力。在温度恒定和变化的情况下,反射镜都保持力平衡的稳定状态,根据最小势能原理,整个弹性系统在平衡状态下所具有的势能,恒小于其他可能位移状态下的势能。3 根弹簧在变形量相同的时候总势能最小,所以在反射镜稳定的状态下,3 个柔性块对反射镜作用的应力大小相等,避免了不对称应力对反射镜面形的影响。

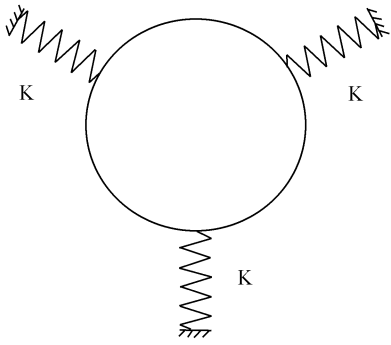


图 6 无隙固定方式原理图

Fig. 6 Theoretical illustration of zero clearance fixation

4.2 过盈量分析

间隙配合固定,反射镜和柔性块之间没有应力,安装后的反射镜面形和自由状态的面形一致。过盈配合的预应力会使反射镜发生面形变化^[3],预应力的和过盈量有关,为了使反射镜面形满足设计要求,应合理选择过盈量的大小。

反射镜的边缘支撑固定方式并非典型的全圆周的过盈配合,且柔性块形式比较复杂,所以用常规的理论分析^[4-6]或经验公式都不能有效地分析出过盈量。利用有限元方法可实现过盈配合的仿真计算,从而选取合适的过盈量。本文选用 ABAQUS 模拟过盈配合的接触问题。

对于光学结构系统来说,通常所允许的各零部件变形非常小,而且存在应力集中的地方大多不会对成像造成严重影响,即对面形精度的影响很小,所以不需要模拟非常大的应变,因此,本文均采用 ABAQUS 单元库中的线性减缩积分单元。

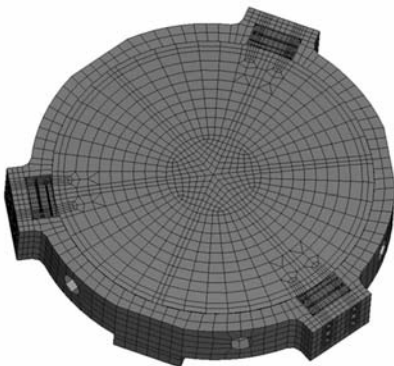


图 7 反射镜组件有限元模型

Fig. 7 FEM model of secondary mirror component

在建模过程中,将反射镜与柔性块的接触位置适当细化网格,可以较小的计算代价获得较高的计算精度^[7]。压片对反射镜自由度的限制则通过归一化,以限制反射镜背面节点在光轴方向自由度的方法来实现。反射镜组件有限元模型如图 7,各个部分材料属性如表 1 所示。

表 1 反射镜组件材料属性

Tab. 1 Material properties of secondary mirror components

Material	Density / (kg/m ³)	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Linear expansion coefficient (1×10 ⁻⁶)
SiC	3 200	400	0. 18	2. 4
TC4	4 400	114	0. 34	9. 1
Al/SiC	3 000	180	0. 28	8. 0

以 0.01 mm 开始逐渐加大过盈量,经分析,计算得到各个过盈量对应的镜面面形^[8],镜面面形随过盈量增大变化结果如表 2。如图 8 所示,伴随过盈量的增加,反射镜面形基本呈线性变化。

表 2 面形随过盈量变化结果

Tab. 2 Surface shape variation following interference values

Interference value			Interference		
value /mm	PV(λ)	RMS(λ)	value /mm	PV(λ)	RMS(λ)
0.01	0.020	0.001	0.06	0.066	0.003
0.02	0.026	0.001	0.07	0.075	0.003
0.03	0.036	0.002	0.08	0.085	0.004
0.04	0.046	0.002	0.09	0.095	0.004
0.05	0.056	0.002	0.10	0.105	0.005

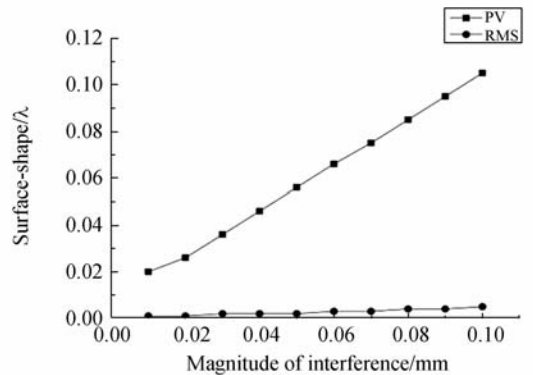


图 8 反射镜面形随过盈量变化趋势

Fig. 8 Surface shape variation trend along with interference values

过盈量的选取准则是在镜面面形符合要求的前提下,选择尽量大的过盈量。如表 1 所示,反射镜组件中镜框选用的高体分铝基复合材料(Al/SiC)的线性膨胀系数大于反射镜使用的碳化硅(SiC),同样的温度变化量,两个膨胀幅度不同,所以过盈量越大,反射镜由于膨胀幅度不同产生窜动的可能性越小,结构可靠性越高^[9]。在反射镜的实际工作状态中,还存在重力回弹、反射镜自身温度变化和加工误差影响面形的情况,根据试验数据总结,这些影响综合后引起面形变化为 $0.03\lambda \sim 0.05\lambda$ (PV 值)。为了保证过盈配合下各种工况都能满足面形要求,并留有一定的设计余量,确定过盈量为 0.03 mm,此时过盈引起的面形变化和其他因素可能引起的镜面面形总和 PV 值 $\leq 0.1\lambda$ 。

4.3 温度变化情况下的分析验证

在轨道环境下,热控系统能控制反射镜组件的温度在 $(20 \pm 4)^\circ\text{C}$,为了保证在此温度反射镜面形符合要求,对 0.03 mm 过盈量下的反射镜组件进行了分析。

4.3.1 温度升高 4 °C

在此工况下,考虑重力回弹,在 4 °C 温升变形和过盈 0.03 mm 的综合情况下进行仿真,得到的反射镜面形 $PV=0.085\lambda$, $RMS=0.018\lambda$,反射镜变形云图如图 9。

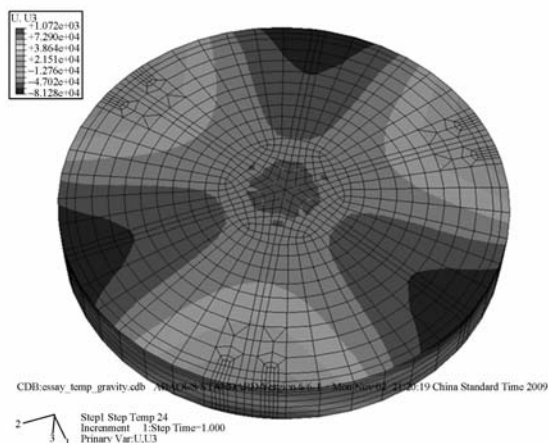


图 9 温度升高 4 °C 镜面变形

Fig. 9 Deformation of secondary mirror when temperature increases 4 °C

4.3.2 温度降低 4 °C

在此工况下,考虑重力回弹,在 4 °C 温降变形和过盈 0.03 mm 的综合情况下进行仿真,得到的

反射镜面形 $PV=0.081\lambda$, $RMS=0.017\lambda$,反射镜变形云图如图 10。

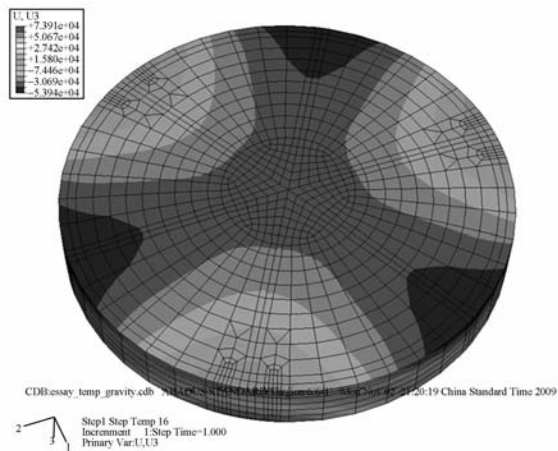


图 10 温度降低 4 °C 镜面变形

Fig. 10 Deformation of secondary mirror when temperature decreases 4 °C

经过有限元方法的分析,结果说明选择 0.03 mm 的过盈量,在实际工作环境下(重力回弹、温升膨胀),反射镜面形精度符合设计要求。

4.4 试验验证

图 11 为镜面面形检测系统,干涉仪为 4DTechnology 公司的 PhaseCam 4020。经过检测,在 0.03 mm 过盈量,4 °C 温升情况下,反射镜干涉条纹如图 12,4 °C 温降情况下,反射镜干涉条纹如图 13。与图 2、3 对比,镜面面形呈对称形式,不发生像散。

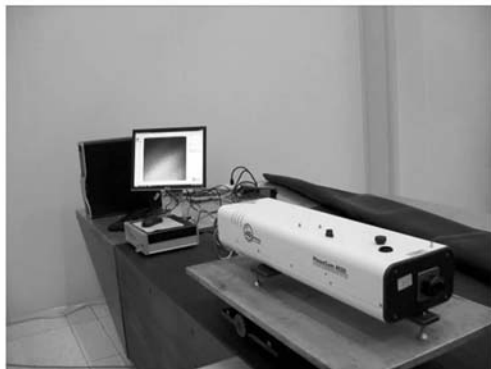


图 11 镜面面形检测系统

Fig. 11 Surface shape testing system

为了得到无隙配合时反射镜面形随温度的变化趋势,对反射镜组件进行温度循环试验。升温循环中反射镜面形变化趋势如图 14,将反射镜组件拆下重新组装进行降温循环试验,反射镜面

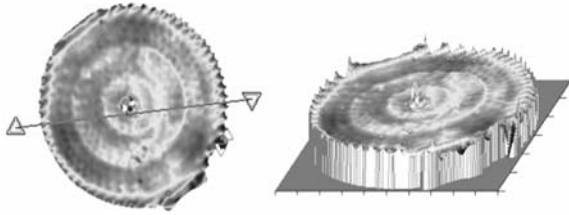


图 12 升温 4 °C 面形验证

Fig. 12 Surface shape verification while temperature increases 4 °C

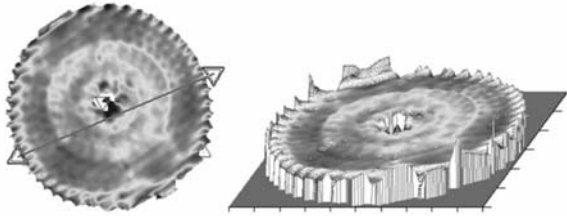


图 13 降温 4 °C 面形验证

Fig. 13 Surface shape verification while temperature decreases 4 °C

形变化趋势如图 15。由图 14、15 可以判断,在温度变化时,反射镜镜面面形变化可逆。对照图 4、5,可以发现反射镜面形在温度环境下变化不可逆的问题得到了解决。在温度变化 ± 4 °C 时,反射

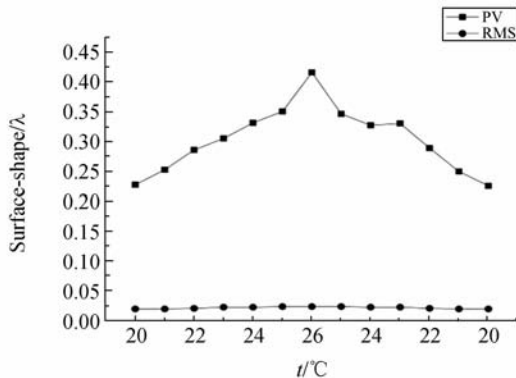


图 14 升温循环试验面形变化趋势

Fig. 14 Trend of surface shape variation during heating up cycling test

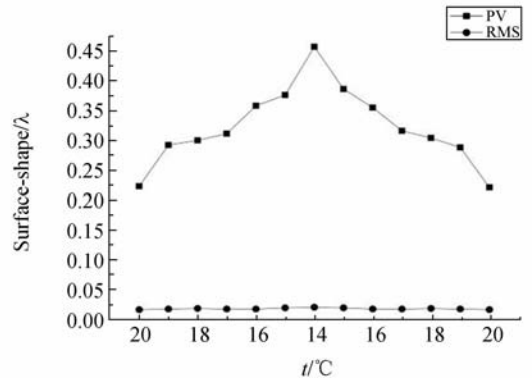


图 15 降温循环试验面形变化趋势

Fig. 15 Trend of surface shape variation during cooling down cycling test

镜面形 $PV_{\text{Max}}=0.382\lambda$, $RMS_{\text{Max}}=0.018\lambda$, 满足设计要求的 $RMS \leq 0.02\lambda$ 。

5 结 论

针对采用间隙配合胶接方法安装反射镜会产生像散,以及由于胶层为非线性材料,使反射镜面形随温度变化不可逆,从而降低结构可靠性等问题,本文提出了采用过盈配合的无隙支撑方法代替间隙配合。该方法从原理上避免胶层厚度不均匀带来的不对称应力,避免了像散,并解决了反射镜面形变化的不可逆问题。通过有限元方法,确定了合理的过盈量(0.03 mm)。在此过盈量下进行了试验验证,从干涉图可以发现没有产生像散;在温度变化 ± 4 °C 的情况下,反射镜面形 PV 值最大为 0.382λ , RMS 值最大为 0.018λ , 满足设计要求的 $RMS \leq 0.02\lambda$ 。

无隙支撑方法同样适用于其他光学系统,如卡塞格林系统中的次镜等。该方法很好地解决了温度变化对镜面面形的影响,适用于小直径圆反射镜的边缘固定,为其支撑方式提供了新思路。

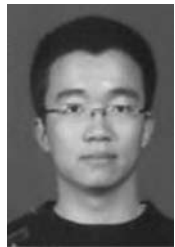
参考文献:

[1] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:39-42.
HUANG B C, MA Y L. *Space Environment Test*

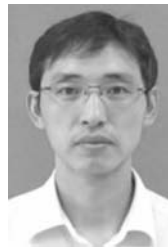
Technology of Spacecraft [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:39-42. (in Chinese)
[2] 张志杰, 袁怡宝. 单边导角形柔性铰链的计算与性能分析 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):384-389.
ZHANG Z J, YUAN Y B. Design calculation and

- analysis of half corner-filletted flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 384-389. (in Chinese)
- [3] 齐迎春,金光,许艳军. 空间薄膜反射镜面形设计及优化 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 818-823. QI Y C, JIN G, XU Y J. Design and optimization for shape of space membrane mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 818-823. (in Chinese)
- [4] 陈连. 基于可靠性优化技术的计算和选择过盈配合的新方法 [J]. *机械强度*, 2003, 25(5): 519-522. CHEN L. New method to calculate and choose interference fit based on the reliability and optimization technology [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2003, 25(5): 519-522. (in Chinese)
- [5] PAULI PEDERSEN. On shrink fit analysis and design [J]. *Comput Mech*, 2006, 37: 121-130.
- [6] KOVACS A. Thermal stresses in a shrink fit due to an inhomogeneous temperature distribution [J]. *Acta Mechanica*, 1994, 105: 173-187
- [7] 魏延刚,宋亚昕,李建,等. 过盈配合接触边缘效应与应力集中 [J]. *大连铁道学院学报*, 2003, 24(3): 4-8. WEI Y G, SONG Y X, LI J, et al.. Study of stress concentration and edge-effect of interference fit joints [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2003, 24(3): 4-8. (in Chinese)
- [8] 王栋,杨洪波,陈长征. 光学表面面形的计算机仿真 [J]. *计算机仿真*, 2007, 24(2): 298-301. WANG D, YANG H B, CHEN C Z. Computer simulation of the optical surface [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(2): 298-301. (in Chinese)
- [9] KULCHYTSKY-ZHYHAILO R D, OLESIAK Z S, YEVTUSHENKO O O. On thermal contact of two axially symmetric elastic solids [J]. *Journal of Elasticity*, 2001, 63: 1-17.

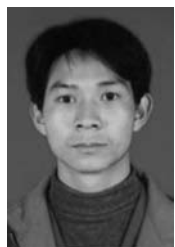
作者简介:



沙 巍(1984—),男,天津人,博士研究生,2007年于上海交通大学获学士学位,主要从事空间光学遥感器结构设计及CAD/CAE工程分析的研究。E-mail: sha_phe@gmail.com



许艳军(1976—),男,内蒙古赤峰人,助理研究员,2001年、2006年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为空间光学遥感热控制技术的研究。E-mail: xuyj@2008.sina.com



张星祥(1977—),男,云南大理人,副研究员,2000年于吉林工业大学机械学院获学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学测试和空间相机光机结构的研究。E-mail: zxx_jan@163.com



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。E-mail: reny@sohu.com

通讯作者:



陈长征(1976—),男,山东德州人,副研究员,2000年哈尔滨工业大学获学士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要研究方向为光机热集成仿真。E-mail: may328@163.com