

重力作用下平面反射镜变形研究*

李 福^{1,2} 阮 萍¹ 赵葆常¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 应用有限元方法对干涉仪的装配前后的平面反射镜进行了静力学分析, 对其在重力作用下水平和垂直放置时进行了分析, 通过计算镜面变形的 PV 值和 RMS 值来评价是否超差及固定反射镜的结构是否合理. 并通过 Zernike 多项式拟合进行了数据处理, 分解出了引起的像差成分, 并相应地提出了提高像质的措施.

关键词 平面反射镜; 变形; Zernike 多项式; 有限元分析

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

0 引言

由于空间光学仪器的特殊要求和特定任务, 决定了光学仪器必须在恶劣的空间环境下具有可靠的光学性能; 这些严酷的空间环境体现在运载阶段的动力学环境以及空间轨道热环境, 在发射阶段要经历过载冲击的作用, 在入轨后, 处于空间微重力环境的特殊工作环境, 引起应力释放^[1]. 这些都将引起光学元件发生面形变化, 引起光学系统的同心度变化及波前畸变, 从而影响成像质量.

干涉成像光谱仪由于高的光谱分辨率和能量利用率, 应用广泛等优点^[2] 而越来越受到人们的青睐, 干涉仪作为其中的核心部件显得尤为重要, 平面反射镜部件作为干涉仪的一个重要部分, 它的面形变化直接影响着成像质量的好坏, 因此不仅要满足光学系统设计的各种要求, 而且还要满足力学计算上的技术要求, 由于一个好的固紧结构可以有效的改善光学件的面形^[3,4], 因此本文着重研究装配前

后的平面反射镜在自重作用下是否满足系统的要求及进一步改进的要求.

1 有限元模型的构造及工况

用三维建模软件 Solidworks 生成平面反射镜装配前后的实体模型, 并可获得模型的几何量(体积、重心、表面积、惯性张量)和物理量(重量、转动惯量). 平面反射镜的材料为 K9 玻璃, 支撑结构的材料为钛合金 TC4, 其参数见表 1, 平面反射镜重量为 654.40 g, 装配后的总重量为 1540.72 g. 通过分析仿真软件 visualNastran 对模型进行了网格划分, 并进行有限元分析. 为了方便进行比较, 装配前后的反射镜都采用四面体单元, 其网格大小都为 8×10^{-3} m (最初选用网格大小为 2×10^{-3} m, 而计算结果却与 8×10^{-3} m 的结果基本相当, 但前者计算时间要长的多, 因此选用 8×10^{-3} m 的网格), 有 5882 个节点, 反射镜座采用四面体单元, 其网格大小为 2.5×10^{-2} m, 节点为 10722, 反射镜盖板也采用四面

表 1 材料特性

Name of materials	E/Pa	G/Pa	μ	ρ (Kg/m ³)	$\sigma_{0.2}$ /Pa	σ_b /Pa
K9	8.132×10^{10}	3.346×10^{10}	0.209	2530	7.000×10^7	1.000×10^7
TC4	11.3×10^{11}	4.35×10^{11}	0.30	4450	8.600×10^8	9.500×10^8

体单元, 其网格尺寸为 1.0×10^{-2} m, 节点 8846 个. 在这里考虑如图 1 所示的三种工况, 工况 1 的重力方向与光轴垂直, 工况 2 的重力方向为 -Z 方向, 工况 3 的重力方向为 Z 向(工况 2 中注明了本文分析使用的坐标系统, Z 轴与光轴方向重合, X, Y 轴在平面反射镜的反射面内), 其中标有“▽”的面为约束面.

图 2 为平面反射镜装配后的组件图. 为了不发生装配干涉, 在设计时反射镜周面与反射镜座内侧留有余量; 在装配过程中, 保证平面反射镜框、平面

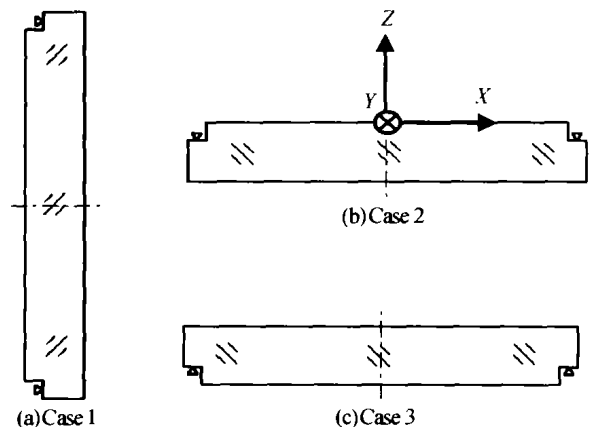


图 1 平面反射镜的三种工况

Fig. 1 Three cases of flat reflector

* 国家高技术 863 资助项目

Tel: 029-88484669 Email: lifu1214@163.com

收稿日期: 2003-10-28

反射镜和平面反射镜盖板同轴,平面反射镜的凹台与平面反射镜框接触,并通过平面反射镜盖板压紧,

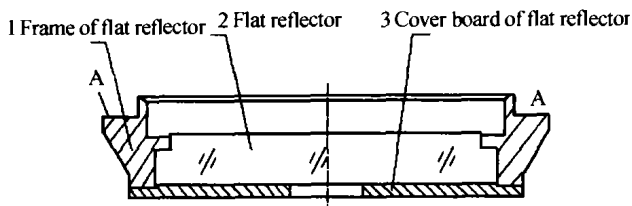


图2 平面反射镜组件图
Fig. 2 Subassembly of flat reflector

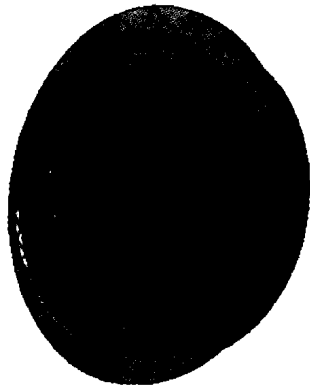


图3 有限元网格图
Fig. 3 Mesh of finite element

A 面为组件的固定面. 图3为反射镜组件的有限元网格图.

2 有限元分析结果及数据处理

2.1 平面反射镜在重力作用下的变形

由于所有空间光学仪器都是在地面加工和制造,从设计到最后检测的各阶段均受到地球引力的影响. 空间遥感器在工作时虽然不再受到重力作用,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. 考虑平面反射镜的装配引起的面形变化,这里将分别分析平面反射镜装配前只受一个约束情况下的有限元分析和装配后的有限元分析. 图4给出了平面反射镜装配前在三种工况下的变形. 图5显示了反射镜装配后组件在三种工况下的变形图,在 case1 情况下,变形最大值为 $4.86e-9m$,而平面反射镜的最大变形为 $5.86e-10m$;在 case2 和 case3 中,变形最大值在平面反射镜盖板中心处,为 $8.6e-8m$,而平面反射镜反射面的变形最大值仅为 $5.90e-9m$,在图中对比不明显.

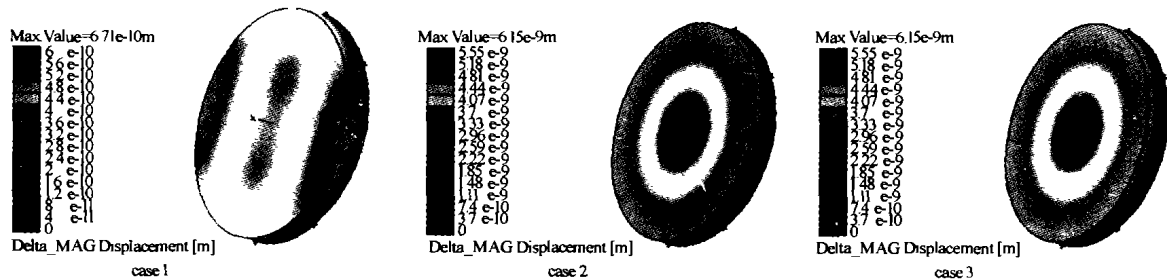


图4 装配前平面反射镜在三种工况下的变形
Fig. 4 Deformation of unassembled flat reflector in three cases

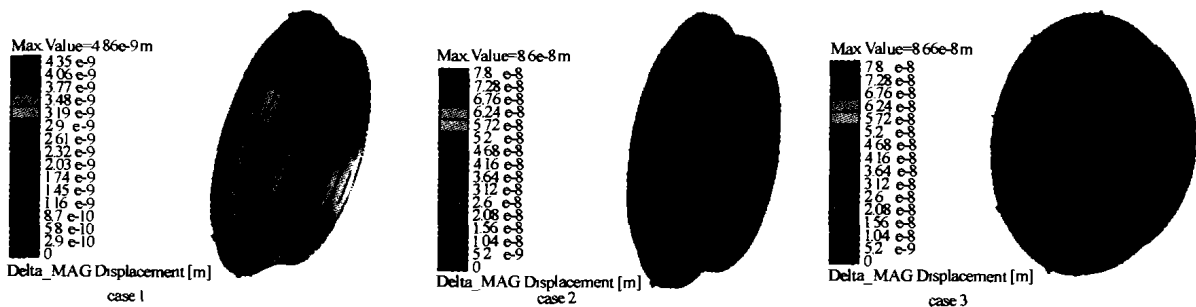


图5 装配后平面反射镜在三种工况下的变形
Fig. 5 Deformation of assembled flat reflector in three cases

表2给出了装配前平面反射镜有限元分析结果的PV(Peak to Valley)值和RMS(Root Mean Square)值;从装配后的组件中提取出平面反射镜的变形值,得到了装配后平面反射镜有限元分析结果的PV值和RMS值,如表3. 在表中所有数值都为与波长的比值($1/\lambda$),波长为 $632.8nm$.

不管是表2还是表3,虽然在工况2和工况3下的PV值和RMS值在数值上是一样的,但由于重力方向相反,因此它们的面形变化刚好相反. 比较表

表2 装配前平面反射镜有限元分析结果的PV值和RMS值 (单位: $1/\lambda$)

载荷工况	误差项	平面反射镜		
		X	Y	Z
工况1	PV	$1.1362e-4$	$8.3597e-4$	$5.6890e-4$
	RMS	$1.5548e-5$	$2.5472e-4$	$1.4077e-4$
工况2	PV	$3.7e-3$	$3.7e-3$	$9.6e-3$
	RMS	$1.1e-3$	$1.1e-3$	$2.9e-3$
工况3	PV	$3.7e-3$	$3.7e-3$	$9.6e-3$
	RMS	$1.1e-3$	$1.1e-3$	$2.9e-3$

表3 装配后平面反射镜有限元分析结果的PV值和RMS值(单位:1/λ)

载荷工况	误差项	平面反射镜		
		X	Y	Z
工况1	PV	6.0525e-4	5.5626e-4	1.8e-3
	RMS	1.6458e-4	1.3480e-4	4.7466e-4
工况2	PV	7.9488e-4	7.9962e-4	1.9e-3
	RMS	2.4192e-4	2.4509e-4	5.8511e-4
工况3	PV	7.9488e-4	7.9962e-4	1.9e-3
	RMS	2.4192e-4	2.4509e-4	5.8511e-4

2和表3的结果发现,平面反射镜装配前和装配后有限元分析结果的PV值和RMS值在工况1基本接近,但在工况2和工况3下装配后的结果要比装配前好得多,可见固紧结构的设计还是合理的。

2.2 平面反射镜的变形对光学性能的影响

由于Zernike多项式^[5]的相互正交和线性无关性,而且可以唯一的、归一化描述系统圆形孔径的波前边界。另外,Zernike多项式很容易与Seidle像差项对应,为有选择地单独处理各像差系数、优化系统性能提供了有效的方法^[6],因此采用Zernike多项式拟合进行数据处理。

表4 装配前平面反射镜变形数据处理结果(单位:1/λ)

载荷工况	误差项	处理前	去掉彗差	去掉倾斜	去掉像散	去掉离焦
工况1	PV	5.7011e-4	4.5179e-4	5.4630e-4	5.7011e-4	5.6988e-4
	RMS	1.4568e-4	1.4568e-4	1.4568e-4	1.4568e-4	1.4514e-4
工况2	PV	1.626e-1	1.626e-1	1.626e-1	1.626e-1	1.532e-1
	RMS	6.55e-2	6.55e-2	6.55e-2	6.55e-2	6.35e-2
工况3	PV	1.626e-1	1.626e-1	1.626e-1	1.626e-1	1.532e-1
	RMS	6.55e-2	6.55e-2	6.55e-2	6.55e-2	6.35e-2

表5 装配后平面反射镜变形数据处理结果(单位:1/λ)

载荷工况	误差项	处理前	去掉彗差	去掉倾斜	去掉像散	去掉离焦
工况1	PV	1.80e-3	1.80e-3	1.70e-3	1.80e-3	1.80e-3
	RMS	4.3690e-4	4.3690e-4	4.3690e-4	4.3691e-4	4.3688e-4
工况2	PV	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2
	RMS	1.87e-2	1.87e-2	1.87e-2	1.87e-2	1.83e-2
工况3	PV	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2	4.59e-2
	RMS	1.87e-2	1.87e-2	1.87e-2	1.87e-2	1.83e-2

反射镜的PV值和RMS值均小于装配前的,说明固紧结构对平面反射镜的面形有改善作用。但在工况1中,装配后的PV值和RMS值反而增大了,可能是装配时引入了额外的装配应力所致,但面形仍要比工况2和工况3好得多。

3 结论

本文结合在研的工程实际任务,建立了平面反射镜的有限元模型,就装配前和装配后的平面反射镜在重力作用下进行了分析,通过比较装配前后平面反射镜在重力作用下的PV值和RMS值,发现在工况2和工况3产生的变形均大于工况1产生的变

通过调节光学系统,可以减小或消除镜面面形的球差、倾斜和离焦等成分^[7],所以进一步采用Zernike多项式对变形后的平面反射镜的镜面面形进行拟合处理。将平面反射镜镜面上的节点归一化到单位圆上,并作为自变量,以光轴方向(Z向)的变形(Disz)为函数因变量进行Zernike多项式的拟合,分离变形引入的像差项,并分别做去除平移、偏转、离焦、像散等像差数据处理,得到数据处理后的PV值和RMS值,结果如表4和表5所示。可见在工况1平面反射镜的变形较小,其像差主要表现为彗差,在不影响系统光能量的前提下,可以考虑在平面反射镜前加一光阑以减小彗差,考虑本系统是对称式结构可以消除彗差,PV值和RMS值满足工程任务的 $[PV] = \lambda/20$, $[RMS] = \lambda/50$ 的要求;工况2和工况3下的像差主要表现为离焦,所以在进行光机系统的设计过程中,保证系统的结构刚度的同时还应重点考虑如何提高检焦、调焦系统的灵敏度和可靠度,以便提高空间遥感器的自身调节能力。比较表4和表5发现,在工况2和3下,装配后平面

形。通过Zernike多项式拟合对有限元分析数据进行处理,使反射镜的面形变化与像差直接建立了联系,正确的评价了反射镜是否满足光学系统的设计要求。从文中计算数据可以看出,在重力作用下,反射镜的变形在容许范围之内。

参考文献

- 1 丁延卫,刘剑,卢镔. 空间环境对光学成像传感器尺寸稳定性的影响. 光学精密工程,2002,10(1):106~109
Ding Y W, Liu J, Lu E. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(1):106~109
- 2 王丽霞,王慧,高军. 星载超光谱成像技术应用及现状分析. 航天返回与遥感,2000,21(1):40~47
Wang L X, Wang H, Gao J. *Spacecraft Recovery & Remote*

- Sensing, 2000, **21**(1):40 ~ 47
- 3 David W. Robinson. Minimizing Gravity Sag of a Large Mirror with an Inverted Hindle-mount, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering. SPIE, Current Development in Lens Design and Optical Systems Engineering, 2000, **4093**: 142 ~ 150
- 4 丁福建, 李英才. 反射镜浮动支撑应力与变形分析及支撑参数的优化. 光子学报, 1998, **27**(11):1041 ~ 1045
Ding F J, Li Y C. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11):1041 ~ 1045
- 5 波恩 M, 沃耳夫 E 著, 杨葭荪 等译校. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978. 610 ~ 616, 1020 ~ 1028
Born M, Wolf E. Principles of Optics. Beijing: Scientific Press, 1978. 610 ~ 616, 1020 ~ 1028
- 6 单宝忠, 牛淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用. 光学精密工程, 2002, **10**(3):318 ~ 323
Shan B Z, Niu S Y, Niu H B, et al. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3):318 ~ 323
- 7 吴清文, 卢镔, 王家骥, 等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究. 光学精密工程, 1996, **4**(4):23 ~ 28
Wu Q W, Lu E, Wang J Q, et al. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4):23 ~ 28

Study on the Surface Deformation of Flat Reflector Under Gravity Load

Li Fu^{1,2}, Ruan Ping¹, Zhao Baochang¹

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2003-10-28

Abstract The static analysis for the flat reflector of interferometer in unassembled and assembled is studied by finite element method, horizontal and vertical placement under gravity load is analyzed. The calculated PV and RMS values are used to determine whether the distortion and the structure of fixation are reasonable or not. The datum processing is done by Zernike polynomial fittings, the aberration composition in this way is found, some corresponding approaches to improve image quality are carried out.

Keywords Flat reflector; Deformation; Zernike polynomial; Finite element analysis

Li Fu was born in January, 1980, in Shanxi Province. He received his Bachelor degree in Applied Physics from Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi in 2001. Currently, he is a postgraduate student at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. He is devoted to the engineering analysis of the structure of the optical instrument.