

文章编号: 1002-1582(2011)04-0438-04

主动光学薄镜支撑及驱动研究^{*}

刘磊, 高明辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 随着光学遥感器分辨能力的不断提高和口径的不断增大, 导致遥感器的重量越来越重, 使得载体无法承受。针对此问题, 提出了对薄反射镜进行主动支撑的方式, 以解决口径大、重量重的问题。利用有限元分析和数学理论相结合的方法在对反射镜施加垂直镜面 $1g$ 加速度 ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度) 和 10°C 的温升载荷情况下, 对薄反射镜的位移驱动器数量及分布是否合理进行了分析计算, 得出了反射镜变形最小时的各驱动器的位移量, 然后把位移量输入到有限元中相应的节点, 计算出了校正后反射镜的面形指标能够达到光学成像要求。具体对 $\Phi 500\text{mm}$ 、厚 3mm 的反射镜进行了分析, 初步计算的 3 点和 9 点支撑的变形值分别为 $26\mu\text{m}$ 和 $2.4\mu\text{m}$, 不能满足系统的成像要求。当运用数学方法计算支撑驱动器的间距为 72mm 时, 得出支撑点数为 107 个, 由此再进行有限元分析, 得出薄反射镜的面形值, PV 值和 RMS 值分别为 119nm 和 31nm , 满足系统的成像要求。分析结果表明, 利用数学理论与有限元仿真分析相结合的方法, 在薄反射镜变形控制中是可行性的, 并为主动光学实验提供了数值依据。

关键词: 主动光学薄镜; 支撑技术; 驱动

中图分类号: V254; TQ342.742 文献标识码: A

Support and drive of the active optical thin mirror

LIU Lei, GAO Minghui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,
Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: With the resolving power of optical remote sensor improving, aperture increasing, the carrier can not afford because of heavier remote sensors. To solve this problem, the way of active support thin mirror is provided to solve large aperture and weight problems. Whether number of displacement actuators and distribution is reasonable for thin mirror support through adopting finite element analysis and mathematical method of combining theory under $1g$ vertical acceleration imposed on mirror surface and 10°C temperature rise is calculated. The actuator's displacement is gained when the mirror deformation is smallest. Mirror surface shape corrected is calculated to achieve the optical imaging requirements when the displacements are entered into the finite element displacement of the corresponding node. $\Phi 500\text{mm}$, 3mm thick mirror is analyzed. Mirror deformation is $26\mu\text{m}$ and $2.4\mu\text{m}$ with 3 and 9-point support through preliminary calculation, the imaging system can not meet the requirements. Support actuators' space calculated is 72mm using mathematical method. Number of support obtained is 107. Mirror surface shape is analyzed through finite element analysis method. PV value is 119nm , RMS value is 31nm . The results meet the system imaging requirements. The results show that the way is feasible to apply mathematical theory and simulation to deformation control of thin mirror. A numerical basis is provided for active optics experiment.

Key words: active optical thin mirror; support technique; actuator

* 收稿日期: 2010-11-30; 收到修改稿日期: 2011-04-23

E-mail: ccliul@163.com

作者简介: 刘磊(1972-), 男, 副研究员, 主要从事空间相机结构设计的研究。

0 引言

随着对光学遥感器分辨能力的要求不断提高,遥感器的口径也不断的增加。例如在 36000 km 地球静止轨道高度实现 3 m 的地面像元分辨率,光学系统主镜的直径需要大于 10 m。由于受到发射卫星承受载荷能力、大口径光学镜加工能力、大口径光学镜支撑技术的限制,目前单镜直径很难突破 3m。可展开主动光学镜是目前解决以上问题的唯一途径。

可展开光学系统是由若干块直径较小的子镜拼成直径较大的主镜,卫星发射时各子镜收拢,入轨后展开。在主动光学系统的控制下,通过镜面下驱动器调整各子镜的面型、焦距、共焦,最终达到一个共相位主镜。

可展开光学系统具有以下突出优点:小口径光学子镜“拼接”成大口径光学反射镜后可实现大口径光学系统的性能;可克服大口径高精度反射镜在加工上的困难;整个光学系统折叠发射,缩小了体积,同时各子镜采用的是薄镜,大大降低了发射质量,能够满足发射卫星的要求。

目前,世界上许多国家已将超薄主动反射镜技术作为未来发展空间技术的重要任务,并开展与之相应的研究和开发工作。称为 NGST 的下一代空间望远镜具有大口径、高分辨率、超轻重量的特点。

马歇尔太空飞行中心已成功研制出直径为 53cm、厚度为 2cm 的 NGST 空间望远镜样品,经测试由自重引起的镜面变形的 RMS 值为 53nm;法国的光学望远镜阵列(OVAL),其薄主镜的直径厚度比为 63:1,由一套闭环系统控制的 27 个面形控制器组成,不仅可校正由重力和温差引起的变形,而且也可以补偿像散等低阶像差。

本文对薄镜主动支撑技术进行了计算机仿真计算,对驱动器排布方式和驱动器校正由于重力和温差引起的变形能力在理论上进行了分析,以确保镜面面型能满足光学成像的要求。采用有限元分析方法在对其中一块薄反射镜的位移驱动器数量及分布进行合理选择后,对反射镜施加垂直镜面 $1g$ ($g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度) 加速度和 10°C 的温升载荷,待有限元计算出镜面变形后,通过数学方法计算出能够最小化反射镜变形的各驱动器的位移量,然后把位移量输入到有线元中的相应节点,计算出了校正后的反射镜面形指标能够达到光学成像要求。从理论上证明了该套主动光学系统是可调的,并且满足光学成像的要求。

1 问题的论述

本文所研究的反射镜如图 1 所示,其直径为 $\Phi 500\text{mm}$,厚度为 3mm,曲率半径为 30000mm。反射镜材料采用微晶玻璃,弹性模量为 90GPa,密度为 $2.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.24,线胀系数为 $0.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。对该反射镜在重力及温度载荷作用下的面形误差要求是: $PV = (1/5)\lambda$, $RMS = (1/20)\lambda$,其中 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 。

2 支撑及驱动分析

控制反射镜面形的驱动器分为位移驱动器和力驱动器,从数学的角度来看,两种位移驱动器均可以达到相同的校正镜面面形的效果。单个力驱动器影响反射镜的范围要大一些,参与整体面形校正的数量要少一些,控制力的大小比较困难;单个位移驱动器的影响范围是局部的,参与整体面形校正的数量要多一些,比较容易地控制位移的大小。综合以上分析,本文决定采用位移驱动器调控反射镜的面形。

利用 CAD 软件建立反射镜的几何模型,由 Patran 软件建立 CAD 几何模型后进行网格划分,将反射镜划分成为有限的节点和单元,全部采用壳单元划分,网格划分较密,共有 396 个单元,397 个节点,有限元模型示意图如图 1 所示。

在反射镜下部支撑点中有 3 点是刚性位移支撑点(图 1),用来校正反射镜整体刚性位移。在对反射镜施加垂直镜面 $1g$ 加速度和 10°C 的温升载荷后,提交给 Nastran 有限元分析软件进行分析,计算出反射镜变形结果。首先通过数学方法计算出能够使反射镜变形最小化时各驱动器的位移量,然后把位移量输入到有限元中的相应节点,计算出校正后的反射镜面形指标是否达到光学成像要求。若不能,则需重新设计支撑方案,直到满足要求为止。

镜面在外载荷的作用下产生位移,镜面变形图如图 2 所示。最大位移量为 $26\mu\text{m}$ 。

在反射镜面下初步加入 9 个位移驱动器,用于校正如图 2 所示的反射镜变形。驱动器位置如图 3 所示。

每个驱动器单独产生一个镜面变形,将所有驱动器所产生的变形叠加后,会产生反射镜面最终的面形图。主动模拟的目标是找到驱动器控制输入量 x_1, x_2, \dots, x_n ,能够最大限度地减少镜面面形。通过数学上的最小二乘法求出驱动器的位移输入量 x_1, x_2, \dots, x_n 来校正镜面面形误差。

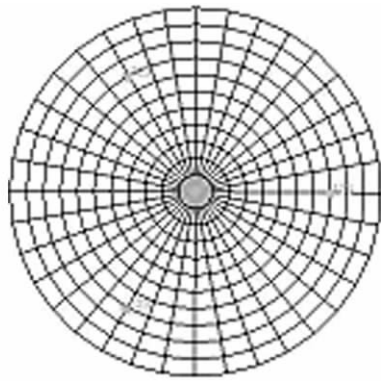


图 1 反射镜有限元模型

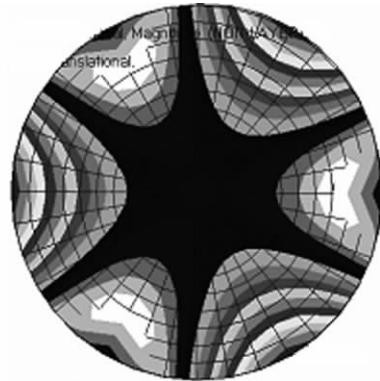


图 2 3 点支撑下外载荷作用变形图

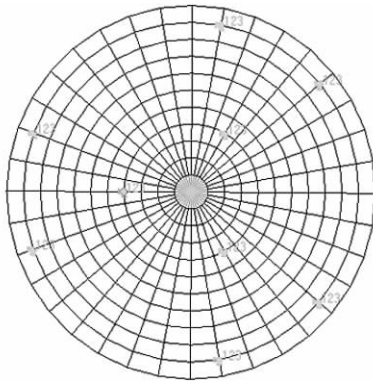


图 3 9 个位移驱动器位置图

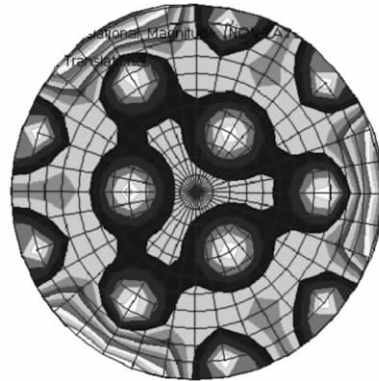


图 4 9 个位移驱动器矫正后变形图

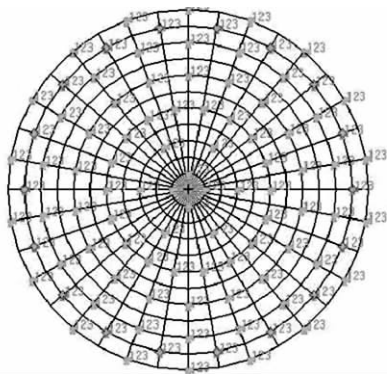


图 5 反射镜最终校正图

在有限元中,校正后节点 i 的位移等于未校正节点 i 的位移与各驱动器在节点 i 产生的位移和。

$$ds_i^{corr} = ds_i + \sum_j x_j dx_{ji}$$

式中: x_j 是第 j 个驱动器的输入量; dx_{ji} 是第 j 个驱动器在第 i 个节点处产生的位移。

$$E = \sum_i w_i (ds_i + x_j dx_{ji})^2$$

式中 w_i 是节点 i 的权数。

通过最小二乘法公式求出 x_j 值,使得镜面面形残差值 E 最小。

通过数学方法求出驱动器的输入量 x_j ,带入有限元模型后,求出校正后的反射镜最大位移为 $2.4\mu\text{m}$,PV 值为 $2.7\mu\text{m}$; RMS 值为 $0.4\mu\text{m}$ 。该反射镜

面形较差(图 4),不能达到光学成像的要求,需要增加位移驱动器数量,重新布置位移驱动器的位置。

由薄板的变形理论可知,随着支撑点数目的增多,由镜体自重等产生的变形随之减小。镜面面形的保持主要取决于驱动器的数量与位置。虽然支持点的数目越多越好,但会给加工、安装带来很多的麻烦,会大大增加制造成本。

本文通过弹性力学中周边简支的圆形板壳在均布载荷作用下,利用板面下挠公式来确定有限元模型中的支撑点的合理间距,使支撑点内的节点变形对反射镜面形的影响小于光学指标的要求,从而确定模型中支撑点的数量。

根据周边简支的圆形板壳在均布载荷作用下板

面下挠公式

$$f = \frac{0.7qR^4}{Eh} \leq \frac{1}{10}\lambda$$

来确定简支点间距 $2R$ 。式中: f 是板面最大下挠; q 是在自重作用下的均布载荷; R 是圆形板壳的半径; E 是材料的弹性模量; h 是板厚; $\lambda = 632.8\text{nm}$ 为波长。根据计算结果得知 $2R = 72\text{mm}$, 即支撑点间距为 72mm 。

上述结果是板壳在单跨工况下的计算结果, 而与单跨间距相同的连续多跨的板面下挠要小于单跨工况的下挠, 把反射镜布置成支撑点间距为 72mm 的连续多跨的板壳形式, 其板面最大下挠要小于 $\frac{1}{10}\lambda$ 。

通过上述分析后, 当位移驱动器的数量增至 107 个时, 校正后的反射镜面形的 PV 值为 119nm , RMS 值为 31nm (图 5), 可以满足光学使用要求。

3 结论

本文应用有限元法和数学方法对主动薄反射镜在重力、温度载荷作用下, 在合理确定驱动器的数量及位置后, 通过驱动器调整镜面面形, 使校正后的反

射镜面形指标达到光学成像要求。分析结果证明, 该支撑及调整方案应用于薄反射镜变形控制具有可行性, 并为主动光学实验中的调节提供了数值依据。当然, 要达到实际应用还有很多工作要做, 例如大口径薄镜制坯、光学加工、光学检测、装调等诸多环节还需要做进一步的研究。目前仅仅在支撑、调整环节上进行了研究, 迈出了探索性的一步, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 高明辉, 刘磊, 等. 超薄反射镜的加工技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38: 88—90.
Gao Minghui, Liu Lei, et al. Fabrication technique of ultra thin mirror[J]. Infrared and laser engineering, 2009, 38: 88—90.
- [2] 高明辉, 杨近松, 等. 超薄反射镜支撑技术[J]. 光学技术, 2003, 29(5): 611—613.
Gao Minghui, Yang Jingsong, et al. Support technique of ultra thin mirror[J]. Optical Technique, 2003, 29(5): 611—613.
- [3] 陈晓丽, 杨秉新, 等. 空间可展开光学系统主镜分块方案研究[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 28—33.
Chen Xiaoli, Yang Bingxin, et al. Segmentation of Primary M mirror for the Space Deployable Optical System[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(1): 28—33.