

空间相机主反射镜结构拓扑优化设计

刘 磊¹, 高明辉¹, 李丽富¹, 谭子昂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. 长春设备工艺研究所, 吉林 长春 130022)

摘 要: 随着空间光学的发展, 遥感器的口径越来越大, 分辨率越来越高, 这就导致遥感器的主反射镜口径和质量越来越大。主反射镜的设计是否合理, 将直接影响遥感器的质量和成像质量。因此采用拓扑优化方法与有限元计算方法相结合, 以 NASTRAN 为有限元解算器, 以 PATRAN 为前处理器, 在空间光学遥感器主反射镜外形、载荷、环境工况确定的情况下, 对其结构进行拓扑优化, 得到最优结构形式。通过对优化前后结构进行有限元分析, 结果表明: 优化后的反射镜镜面面形比传统的镜面面形减小或相当, 质量减轻 32%, 动力学性能改善。优化后的主反射镜结构能够满足加工、工艺和装配的技术要求。这种优化与有限元分析技术的结合将为以后的光学反射镜的设计提供有效的帮助。

关键词: 拓扑优化; 反射镜; MSC.NASTRAN

中图分类号: TQ171.68 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2010)06-1066-04

Primary mirror topological optimum design of space camera

LIU Lei¹, GAO Ming-hui¹, LI Li-fu¹, TAN Zi-ang²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Equipment and Technology Research Institute, Changchun 130022, China)

Abstract: Large diameter and higher resolution of remote sensor are acquired with the development of space optics. This leads to the increase of diameter and weight for the primary mirror of remote sensor. The design of the primary mirror will have a direct effect on the weight of the remote sensors and imaging quality. Therefore, topology optimization method and finite element calculation method were combined, taking NASTRAN as finite element solver and PATRAN as pre-processor. The primary mirror structure of space optical remote sensor was topologically optimized under the condition of determined shape, load and environment. And the optimal structure was obtained. The structures before and after optimization were analyzed by the finite element. Results show that the optimized figure reduces 8 nm, quality reduces 32% compared with traditional shape. Property of dynamics is improved. Optimized primary mirror structure can meet the technical requirements of processing, technology and assembly. This combination of optimization and finite element analysis technology will provide effective help for the future design of optical mirror.

Key words: Topology optimization; Mirror; MSC.NASTRAN

收稿日期: 2010-02-02; 修订日期: 2010-03-26

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (863-2-5-1-13B)

作者简介: 刘磊 (1972-), 男, 吉林长春人, 副研究员, 硕士, 主要从事空间相机结构设计。Email: ccliul@163.com

导师简介: 任建岳 (1952-), 男, 吉林长春人, 研究员, 硕士, 主要从事空间光学遥感器总体设计。Email: ccgaomh@163.com

0 引言

空间光学传感器要经历发射时的冲击、振动以及外层空间的微重力等力学环境,这就要求空间光学传感器具有足够刚度来克服其所要经历的力学环境。

反射镜是空间光学传感器的重要组成部分,在空间环境中受到微重力、温度梯度等因素影响,如果反射镜镜面变形超过光学系统允许范围,就会影响光学系统成像质量^[1]。另外,反射镜的尺寸、质量也决定了光学传感器整体的结构尺寸、质量。为了获得最佳的像质、降低空间光学传感器整体质量,反射镜需要具有足够的刚度、最小的质量、良好的导热性能。

文中应用拓扑优化技术,通过对反射镜优化设计,在保证反射镜具有最大刚度的前提下,去除反射镜自身多余的质量,保留住筋骨,使其自身质量趋向最小,进而降低反射镜质量对镜面面形的影响,减轻对空间光学传感器主支撑结构的负担,实现空间光学传感器整体质量最优化。

在确定反射镜外形尺寸、支撑方式、位置后,建立反射镜立体几何模型及有限元模型,对反射镜施加垂直镜面重力加速度 g ,以反射镜获得最大刚度(镜面最小位移量)作为优化目标,反射镜轻量化率作为优化约束,规定镜面、支撑部位不作为优化对象,经过优化,反射镜轻量化率达到 73%,镜面位移 42 nm,不仅满足光学系统要求,而且优于传统反射镜结构方式^[2]。

1 优化理论

结构优化设计一般由设计变量、约束条件和目标函数 3 要素组成。根据设计变量的选取可以分为尺寸、形状与拓扑优化设计 3 个层次。拓扑优化就是选取结构元件的有无作为设计变量,为 0-1 型逻辑变量;而形状优化是选取结构的内部形状或者是节点位置作为设计变量;尺寸优化是选取结构元件的几何尺寸作为设计变量。

拓扑优化的方法主要有均匀化法、变厚度法和变密度法。变密度法是一种比较流行的力学建模方式,与采用尺寸变量相比,它更能反映拓扑优化的本质特征。所以,文中采用该方法对反射镜进行优化^[3]。

变密度法是由 Bendsoe 等人提出的一种拓扑优化方法,该算法通用性好,文中将该拓扑优化方法与

有限元计算软件 MSC.PATRAN/NASTRAN 相结合,并用于空间相机反射镜结构的拓扑优化设计,取得了良好的效果。在优化过程中,通过材料变密度的分布可以确定材料的分布情况。这种方法将拓扑优化的 0-1 组合问题转化为连续变量优化问题,通常以伪密度为设计变量,以结构总柔顺性为目标函数,以保留体积比例为约束函数,通常采用准则法、数学规划法来求解^[4]。

对于任何优化设计,首先给出具体优化问题的数学模型,然后根据问题的性质与其中的目标函数、约束函数的信息,采用合适的优化算法进行求解。对于变密度思想的拓扑优化问题,一般要进行结构有限元离散,这样,便于改变结构各个部分的属性。其数学模型可以描述为:

$$\text{最小化 } c(x) = U^T K U = \sum_{e=1}^N (x_e)^p u_e^T k_0 u_e$$

$$\text{满足 } \frac{V(x)}{V_0} = f$$

$$K U = F$$

$$0 < x_{\min} \leq x_e \leq 1$$

式中: c 为结构的总柔顺性,即总应变能; U 为结构的位移向量; K 为结构的刚度矩阵; x_e 为单元的虚拟密度; p 为常数; k_0 为单元刚度矩阵; u_e 为单元位移向量; V 为要保留的材料体积; V_0 为结构总体积; f 为优化体积比。

变密度法的一个重要特征就是假定材料的属性(如弹性模量)与伪密度有着某种关系,在具体优化过程中,变密度方法将 0-1 离散变量的优化问题变为一个(0,1)之间取值的连续变量的优化问题。为了消除中间密度材料,变密度法通过惩罚因子对设计变量在(0,1)之间的中间密度值进行惩罚,使连续变量的拓扑优化模型能很好地逼近传统的 0-1 离散变量的拓扑优化模型。中间密度单元对应很小的弹性模量,对结构刚度矩阵的影响很小,可以近似地认为将该单元处的材料删除。

拓扑优化是与参数化形状优化和尺寸优化不同的非参数化形状优化方法。在产品概念设计阶段提供初始建议的设计方案,以有限元单元为设计变量,在满足结构设计区域的剩余体积(质量)比的约束条件下,对静力进行分析以满足最小平均柔度或最大刚度^[5]。

2 优化示例

文中研究的对象是空间光学遥感器中长方形反射镜的优化分析^[6]。该反射镜面形精度在通光孔径内要求优于 $\lambda/4$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 同时在系统所处空间微重力环境和地面试验及发射的力学环境中, 在保证面形精度的前提下, 质量应尽可能小。

该反射镜长 660 mm, 宽 220 mm, 厚 65 mm, 采用碳化硅材料, 密度 $3.05 \times 10^3\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 400 GPa, 泊松比 0.16, 实体质量 28.5 kg。采用底部 3 点支撑方式, 实体模型如图 1 所示, 优化前反射镜有限元模型如图 2 所示。



图 1 优化前反射镜实体模型
Fig.1 Model of mirror before optimization



图 2 优化前反射镜有限元模型
Fig.2 FEM of mirror before optimization

首先, MSC.PATRAN 环境下建立有限元模型, 选取 8 节点 HEX8 单元, 共有 11 060 个单元, 12 085 个节点, 在模型背部 3 个连接孔端部实施位移约束, 在垂直镜面方向施加 1 个 g 加速度的惯性载荷。优化程序将获得最小反射镜质量作为优化目标, 镜面最大位移小于 $\lambda/8$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 作为约束条件, 对有限元模型各单元的密度、弹性模量作为设计变量, 对分析结果进行优化。由于反射镜面整体参与光学系统成像, 将其有限元模型节点冻结, 不作为优化对象。

采用 MSC.NASTRAN 解算器对有限元模型进行

分析后, 计算出节点的位移及单元的应变能。优化程序软件对设计变量进行迭代, 迭代式中需要的单元应变能可从 MSC.NASTRAN 分析结果中得到。迭代后更新的单元材料属性(密度、刚度)对有限元输入文件(#.bdf)进行相应修改, 再由 MSC.NASTRAN 分析软件重新分析, 为下一次的优化迭代做准备。第 5、10、15 次迭代如图 3(a)~(c)所示。优化流程如图 4 所示。

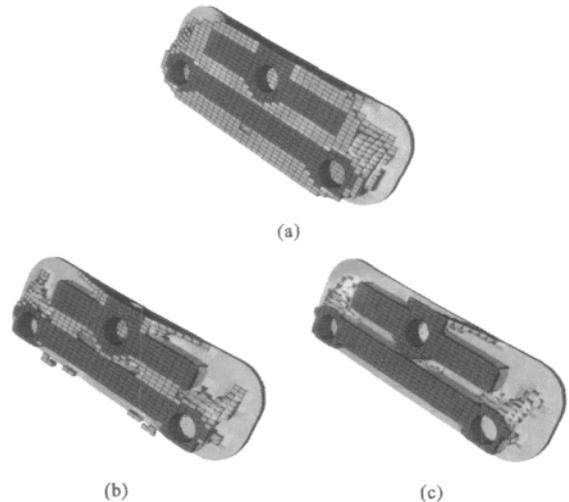


图 3 第 5、10、15 次迭代图
Fig.3 Iteration map of No.5, No.10, No.15

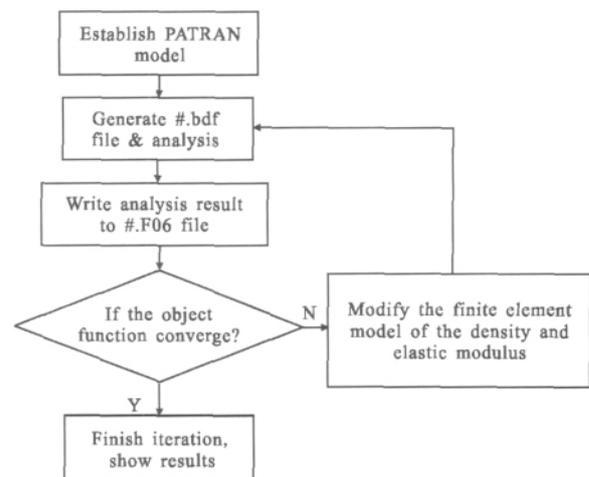


图 4 优化流程图
Fig.4 Flow chart of optimization

优化结束后利用 MSC.PATRAN 的前后处理功能, 对拓扑优化后保留的单元进行整体显示, 得到结构的最终拓扑形式。反射镜最终优化结构如图 5 所示。反射镜最终优化后的质量为 7.8 kg, 轻量化率 73%。

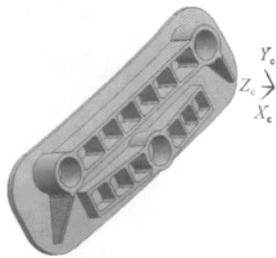


图 5 反射镜最终优化结构
Fig.5 Final optimized structure of mirror

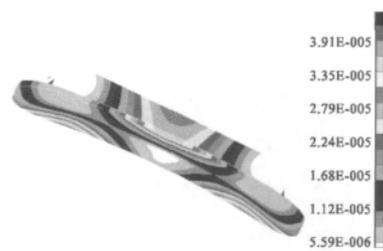


图 8 优化后反射镜垂直镜面重力载荷作用下变形图
Fig.8 Deformation of optimized mirror under gravity load

3 效果比较

传统反射镜结构形式常采用镜背部开方形轻量化孔的形式^[7],如图 6 所示。镜体质量为 11.5 kg,轻量化率 60%。传统反射镜在垂直镜面的重力载荷作用下镜面最大位移为 50 nm,变形如图 7 所示。

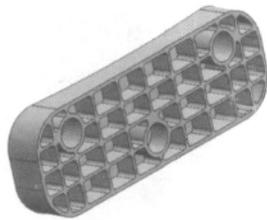


图 6 传统反射镜结构形式
Fig.6 Conventional mirror structure

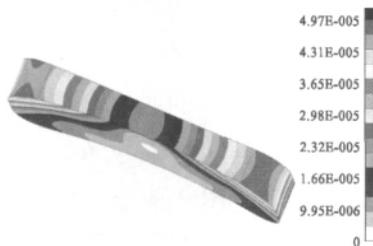


图 7 垂直镜面重力载荷作用下传统反射镜的变形图

Fig.7 Deformation of conventional mirror under gravity load

优化后,利用优化结果对反射镜模型进行修改,其轻量化率达到 73%,而传统反射镜的轻量化率仅为 60%。为了满足反射镜加工工艺的要求,模型需要增加相应的圆角^[8]。优化后的反射镜由 MSC.NASTRAN 软件重新分析,得到镜面最大位移仅为 42 nm。反射镜在垂直镜面的重力载荷作用下变形图如图 8 所示。

通过有限元分析可知:在垂直镜面的重力载荷作用下,传统反射镜镜面最大位移为 50 nm,优化后的

最大位移仅为 42 nm,减少了 8 nm,质量减轻了 32%,优化效果十分明显。

在平行镜面沿反射镜长度方向重力载荷作用下,传统反射镜与优化反射镜镜面最大位移分别为 31.1 nm 和 33 nm。虽然优化反射镜镜面变形量略大于传统反射镜变形量,但二者变形量均小于设计要求。

在平行镜面沿反射镜宽度方向重力载荷作用下,传统反射镜与优化反射镜镜面最大位移分别是 46.4 nm,41.9 nm。优化反射镜镜面变形量小于传统反射镜变形量,二者变形量均小于设计要求。

在动力学方面,优化反射镜组件一阶模态达到 280 Hz,明显大于传统反射镜组件一阶 249 Hz 模态。

碳化硅材料具有较高的导热系数及较低的线胀系数,在热稳定性方面具有较高的优越性。经过整机系统验算,在 4℃ 温度变化下,优化后反射镜镜面最大变形小于 30 nm,满足使用要求。

4 结 论

反射镜在垂直镜面的重力载荷作用下,经过优化软件的多次迭代优化,目标函数收敛于一个最小位移值。利用优化结果修改反射镜模型,并利用有限元软件再次分析,在质量方面,优化的反射镜比传统反射镜减轻了 32%,优化效果明显,在空间相机领域,相机减重具有非常重要的意义。优化后反射镜在 2 个方向重力载荷作用下的变形量小于传统反射镜,1 个方向上的变形量与传统镜相当,3 个方向的变形量均小于设计要求。在动力学方面,优化反射镜性能明显优于传统反射镜。热稳定性方面,优化后反射镜可以满足设计要求。优化后的反射镜模型不仅完全可以替代传统反射镜模型,而且可以指导类似的反射镜建模及轻量化工作。

(下转第 1074 页)

值。通过试验件确定组件的力学性能;并在正式件近似球面抛光完成后进行力学实验,对比实验前后的反射镜面形,最终判定该支撑结构能有效减小反射镜因外界环境及自身重力引起的面形变化。

参考文献:

- [1] FU Liang-liang, HE Xin, LIAN Feng-hui. Design and analysis of minitype reflector mirror supporting structure project [J]. **Optical Technique** (付亮亮, 何欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案设计与分析. 光学技术), 2008, **30**(4): 532-534.
- [2] WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, YANG Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. **Infrared and Laser Engineering** (王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析. 红外与激光工程), 2007, **36**(6): 877-880.
- [3] XU Hong, WANG Xiang-jun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. **Infrared and Laser Engineering** (许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用. 红外与激光工程), 2007, **36**(1): 13-17.
- [4] CHEN Xiao-juan. Design and stability study of the reflector mirror support for the large large facility [J]. **Optics and Precision Engineering** (陈晓娟. 大口径反射镜支承设计. 光学精密工程), 2008, **16**(2): 179-183.
- [5] YAN Yong, JIA Ji-qiang, JIN Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. **Optics and Precision Engineering** (闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计. 光学精密工程), 2008, **16**(8): 1533-1539.
- [6] GUO Jiang, HE Xin. Design on support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. **Optics and Precision Engineering** (郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计. 光学精密工程), 2008, **16**(9): 1642-1647.
- [7] WANG Zhong-su, ZHAI Yan, MEI Gui, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. **Optics and Precision Engineering** (王忠素, 翟岩, 梅贵. 传感器反射镜柔性支撑的设计. 光学精密工程), 2010, **18**(8): 1833-1841.
- [8] YODER Jr P R. **Opto-Mechanical System Design** [M]. 3rd ed. US: SPIE Press, 2006: 557-561.

(上接第 1069 页)

将拓扑优化软件与 NASTRAN 的结构分析功能相结合,对空间光学遥感器结构进行拓扑优化,并将拓扑优化的结果用软件 MSC.PATRAN 显示,结果直观,容易掌握。

参考文献:

- [1] WU Qing-wen. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. **Optics and Precision Engineering** (吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用. 光学精密工程), 1997, **5**(6): 69-80.
- [2] WU Qing-wen, YANG Hong-bo, YANG Jin-song, et al. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera [J]. **Optical Technique** (吴清文, 杨洪波, 杨近松, 等. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法. 光学技术), 2004, **30**(2): 152-156.
- [3] GUAN Ying-jun, XIN Hong-wei, ZHAO Gui-jun, et al. Topologic optimization design for main supporting structure of space camera [J]. **Optics and Precision Engineering** (关英俊, 辛宏伟, 赵贵军, 等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计. 光学精密工程), 2007, **15**(8): 1157-1163.
- [4] WANG Wei, YANG Wei, CHANG Nan, et al. Based on MSC. PATRAN/NASTRAN variable density method Topology optimization system [J]. **Mechanical Design** (王伟, 杨伟, 常楠, 等. 基于 MSC.PATRAN/NASTRAN 的变密度法拓扑优化系统. 机械设计), 2008, **5**: 5-8.
- [5] SUI Yun-kang, DU Jia-zheng, PENG Xi-rong. **MSC. Nastran Finite Element Dynamic Analysis and Optimal Design and Practical Tutorial** [M]. Beijing: Science Press (隋允康, 杜家政, 彭细荣. **MSC.Nastran** 有限元动力分析与优化设计实用教程. 北京: 科学出版社), 2004.
- [6] CHANG Jun, WENG Zhi-cheng. Design of optical system in wide cover, abaxial space camera [J]. **Optics and Precision Engineering** (常军, 翁志成. 宽覆盖离轴空间相机光学系统的设计. 光学精密工程), 2003, **11**(1): 55-57.
- [7] ZHANG Xue-jun, LI Zhi-lai, ZHANG Zhong-yu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. **Infrared and Laser Engineering** (张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计. 红外与激光工程), 2007, **36**(5): 577-582.
- [8] YAN Yong, JIN Guang, YANG Hong-bo. Lightweight structural design of space mirror [J]. **Infrared and Laser Engineering** (闫勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计. 红外与激光工程), 2008, **37**(1): 97-101.