

Jia Xuezhi, Jin Guang, Jia Jiqiang, An Yuan, Xu Zhen. Topology optimization design for main board of lightweight space camera. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 395-400

轻型空间相机主承力基板结构拓扑优化设计^{*}

贾学志^{1,2} 金光¹ 贾继强¹ 安源¹ 徐振¹

1(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 针对目前轻型空间相机主承力基板在结构设计过程中难于同时保证重量轻且刚度高的问题, 提出了采用拓扑优化设计思想进行设计的方案. 通过建立基于变密度方法的拓扑优化设计数学模型, 运用 Nastran 软件对相机主承力基板进行拓扑优化设计, 给出了主承力基板的最优设计方案. 经过拓扑优化后相机主承力基板质量从初始的 36.8 kg 降低到 15.4 kg, 轻量化程度达 58.2%. 采用有限元分析方法对拓扑优化的结果进行了模态分析, 以验证主承力基板刚度分布是否合理. 通过 0.5 g 扫频振动试验对有限元分析结果进行验证, 振动试验结果表明, 主承力基板结构一阶自然频率理论分析与试验结果偏差 1.86%, 充分证明理论分析结果的正确性和准确性. 整个优化设计过程证明, 采用拓扑优化设计方法大大提高了研制效率, 增强了空间相机主承力基板结构的性能, 有效降低了基板的重量, 满足系统设计要求.

关键词 空间相机, 主承力基板, 拓扑优化

中图法分类号 V 475.2

Topology Optimization Design for Main Board of Lightweight Space Camera

JIA Xuezhi^{1,2} JIN Guang¹ JIA Jiqiang¹ AN Yuan¹ XU Zhen¹

1(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun* 130033)

2(*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract In order to obtain a lightweight and high-stiffness main board structure for lightweight space camera, a topologic optimization design method was presented. FE (Finite Element) based topology optimization which is created with the variable-density method is executed to find the optimum material distribution of initial design main board of space camera by maximizing the stiffness. Compared with that before the optimization, the main board structure reduces weight from 36.8 kg to 15.4 kg, loses 58.2 percent weight with the first-order natural frequency above 400 Hz. In order to check whether the main board's distributing of stiffness is rational, the Finite Element Method (FEM) is used to analyze the model of the main board. Finally, the 0.5 g vibration test shows that the first natural frequency of main board is 479.2 Hz, which is very close to the result of the FEM,

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (2007AA12Z113)

2009-12-29 收到原稿, 2010-10-20 收到修定稿

E-mail: xuezhi0817@163.com

the error is 1.86%. The numerical results indicate that after adopting the topologic optimization design method, not only the design course is shortened, but also the main board structure weight is effectively reduced and the capability of the main board structure is enhanced also, which shows that optimized board structures can meet the system design requirements well.

Key words Space camera, Main board, Topology optimization design, Finite element analysis

1 引言

科学技术的发展, 人们对资源探测的迫切要求以及用户对信息精度及实时性的要求, 使得遥感器的设计日趋复杂, 要求越来越苛刻, 在这种情况下对相机结构件的设计采取最优化的方法显得非常重要.

空间相机在发射过程中要经受严峻的力学环境考验, 同时在轨工作为微重力状态, 为确保相机在发射和运载过程中不受破坏, 不产生残余变形, 且在空间环境下保持良好的光学性能, 正常工作, 要求相机结构具有足够高的刚度和强度. 空间相机主承力基板是相机各结构组件和光学组件的承载体, 所承受的力学环境非常恶劣. 因此, 保证空间相机主承力基板具有较轻的重量、足够的强度和刚度一直是空间相机结构设计所面临的重大课题^[1].

拓扑优化的基本思想是在特定的设计空间、载荷以及边界条件的前提下, 寻求材料的最优分布. 近年来, 拓扑优化的概念受到越来越广泛的关注. 本文针对空间相机主承力基板的结构, 采用拓扑优化设计方法对其进行方案设计. 数值计算结果和振动试验结果表明, 采用拓扑优化设计方法对提高研制效率, 降低空间相机主支撑基板结构重量、提高其刚度具有明显效果.

2 结构拓扑优化理论基础

结构优化设计是用系统的、目标定向的过程与方法代替传统设计, 其目的在于寻求既经济又适用的结构形式, 以最少的材料、最低的造价实现结构的最佳性能. 结构优化设计分为三个层次: 尺寸优化、形状优化、拓扑优化. 目前, 尺寸优化和形状优化相对成熟, 在工程设计中得到了广泛应用. 而拓扑优化设计是继结构尺寸优化设计和形状优化设计后, 在结构优化领域出现的一个新的研究方向. 拓扑优化的目的是寻求结构的刚度在设计空间最佳的分布形式, 或在设计空间寻求结构最佳的传力路径, 以优化

结构的某些性能或减轻结构的重量. 在结构的初始拓朴形式未知的情况下, 寻求结构最优的拓朴关系, 在整个产品的初始设计阶段具有重要意义^[2-5].

变密度法是连续体结构拓扑优化中常用的一种优化方法, 其基本思想是人为引进一种假想的密度可变材料, 其相对密度(伪密度)和弹性模量之间的关系也是假定的, 每个单元的伪密度为设计变量, 将结构拓扑优化问题转化为材料最优分布设计问题. 应用优化准则法或数学规划法求解材料最优分布设计, 优化过程中每个单元对应一个优化变量, 通过改变优化变量的取值, 结构中单元的弹性模量发生变化, 从而调节结构总体刚度矩阵的变化, 使结构布局趋于最优, 优化后的结果以表示材料分布的伪密度(材料分布率)来显示. 变密度法中的伪密度是指材料密度和材料特性之间的一种对应关系. 变密度法中的常见插值模型有: 固体各向同性微结构/材料惩罚模型(Solid Isotropic Microstructures/Material with Penalization, SIMP)和材料属性的合理近似模型(Rational Approximation of Material Properties, RAMP). SIMP或RAMP模型通过引入惩罚因子对中间密度值进行惩罚, 使中间密度向0或者1聚集, 拓扑优化设计结果能很好地逼近实体和孔洞分明的优化结果. 变密度法具有程序实现简单, 计算效率高, 应用相对简单等优点^[2].

基于变密度法的材料等效弹性模量可以表示为^[6]

$$E_p(x_i) = E_{\min} + f(x_i, p)(E_0 - E_{\min}). \quad (1)$$

令

$$\Delta E = E_0 - E_{\min},$$

则式(1)可以表示为

$$E_p(x_i) = E_{\min} + f(x_i, p)\Delta E. \quad (2)$$

式中, ΔE 为插值后的等效弹性模量, E_0 为实体材料的弹性模量, $E_{\min}$ 为孔洞部分材料的弹性模量, $f(x_i, p)$ 为密度插值函数.

当第 i 个单元的相对密度为 1 时, 则表示该单元处为实体材料, 当相对密度为 0 时, 表示为空域. 通过引入惩罚因子 p , 使中间密度值向两端聚集, 使连续变量的拓扑优化模型很好地逼近离散变量的优化模型.

采用变密度法结构刚度矩阵和柔度函数可以分别表示为

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^N [E_{\min} + f(x_i, p)\Delta E] \mathbf{K}_i, \quad (3)$$

$$C(x) = \sum_{i=1}^N [E_{\min} + f(x_i, p)\Delta E] \mathbf{U}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{U}_i. \quad (4)$$

式中, x_i 为优化过程中第 i 个单元所对应的优化变量, $\mathbf{K}_i$ 为优化过程中第 i 个单元所对应的单元刚度矩阵, $\mathbf{U}_i$ 为优化过程中第 i 个单元所对应的位移矢量, N 为优化域离散后单元的数目.

基于刚度约束的体积最小化结构拓扑优化模型

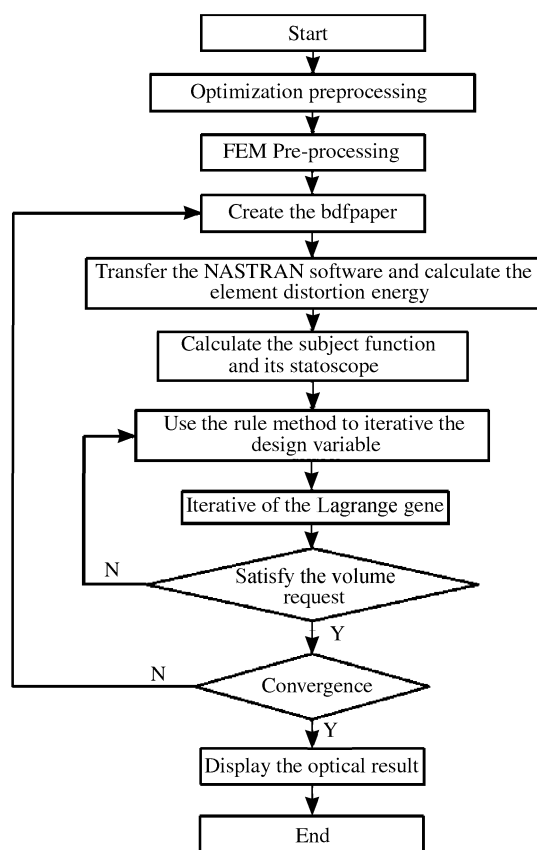


图 1 基于 NASTRAN 的变密度法优化流程
Fig. 1 Optical design course of the topology based on NASTRAN

可以描述为:

目标函数 $V(x)$,

位移矢量 $\mathbf{KF} = \mathbf{U}$.

$$d_{\min} \leq d_j \leq d_{\max},$$

$$0 \leq x_{\min} \leq x_i \leq 1.$$

上述表达中, $V(x)$ 为优化中材料体积, x 为优化变量, $x_{\min}$ 为避免优化过程中出现数值计算奇异问题而允许采用的优化变量最小值, d_j 为节点 j 处的位移量, $d_{\max}$ 为位移约束中的最大值, $d_{\min}$ 为位移约束中的最小值.

基于 NASTRAN 的变密度法拓扑优化流程如图 1 所示.

3 轻型空间相机主承力基板结构优化设计

相机主承力基板是整个轻型相机结构件和光学件的承载体, 对其结构设计的主要考察指标是重量和刚度. 合理的结构是既保证主承力基板有较高的刚度, 提高一阶自然频率, 避免与外界激励发生耦合共振, 又有较轻的重量, 满足相机总体提出的质量要求, 降低发射成本. 根据设计经验和相机总体提出的刚度和强度指标, 所设计的相机主承力结构质量不超过 20 kg, 一阶自然频率不小于 400 Hz.

3.1 主承力基板结构

由于轻型相机采用同轴三反光学系统, 因此, 主承力基板结构中间需开足够大的圆孔 (直径 220 mm)

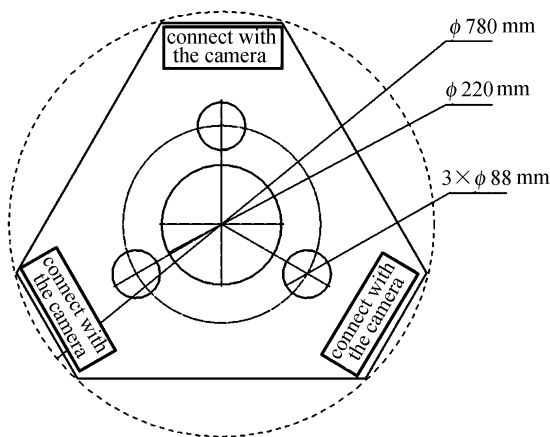


图 2 轻型相机主承力结构外形
Fig. 2 Initial design of the main board structure

以满足光学系统要求;底部需留出足够大的空间来安装三镜以满足成像要求;此外,为了装调方便,主承力结构需开3个均布的圆孔(直径88 mm)来满足装调要求。主承力基板承受的载荷为主镜组件的重力载荷,约为600 N,方向平行于中心孔轴线。主承力基板与相机卫星连接位置如图2所示。

3.2 主承力基板结构拓扑优化过程及结果分析

为了在相机主承力基板具有足够高的刚度的前提下降低结构质量,需要对相机主承力基板结构进行优化设计。具体步骤如下^[3]。

第1步 定义可设计区。由于相机主承力基板承受的外载荷位置固定,且其约束位置固定,根据加工工艺将主承力基板分为上、下面板和夹层三部分,将中间的夹层部分设定为优化区域。

第2步 定义响应。为取得较高的一阶自然频率,同时又有较轻的重量,分别将体积和一阶自然频率作为响应函数。

第3步 定义约束。取体积的20%作为上限,并作为等效约束,使得材料的分布满足设计要求。当不能满足优化设计时,可以适当增加等效约束的量值,使其得到较为合理的结果。

第4步 定义目标函数。优化设计的最终目标是最小柔度,即结构刚度最大,所以将其作为最终的优化目标。

第5步 定义载荷。由于相机在发射过程中要承受15g过载,因此,在定义载荷时除了要施加主承力基板本身的自重和承载外,还要把15g的加速度转化为力施加到结构整体上。

此结构的优化经过12次迭代后收敛,并不断改变优化的约束数值,最终得到满足设计要求的结果,拓扑优化后材料密度分布如图3所示。单元密度大的编号⑧~⑬部分为应保留的材料,单元密度小的①~⑦部分为可以去除的材料^[2]。

从图3可以看到,优化后的模型内部是中空的,中间夹层部分竖筋的布局可以参考图3。为了能够取得比较满意的质量分布,将伪密度值小于0.7的材料定义为可去除的部分,伪密度值大于0.7的材料定义为保留部分。

由图3可知,①~⑦所示部位对主承力基板结构的动态刚度贡献不大,可以减少其材料的使用,⑧~⑬所示部位(左右对称)对动态刚度的贡献最

大,必须加强。优化结束以后,可以依据结果重新进行性能分析,以验证优化的有效性。

拓扑优化的主承力基板体积变化曲线如图4所示。从图4可以看出目标函数(结构最小柔度)经过12次循环优化后降低了40%,而设计变量,即材料的分布则分别向0和1趋近,充分显示出优化程序的有效性和可靠性,这一点也可以从图3明显看出。

根据拓扑优化结果,对轻型相机主承力基板结构进行轻量化设计,合理布置竖筋的位置,在保证满足使用要求的刚度和强度的前提下,大大减轻了主承力基板结构件的质量。设计的轻型相机主承力基板结构如图5所示。主承力基板外接圆直径为780 mm,厚度130 mm,质量15.4 kg,体密度仅为0.313 g/cm³,轻量化程度达58.2%,满足了相机对主承力基板结构提出的质量要求。

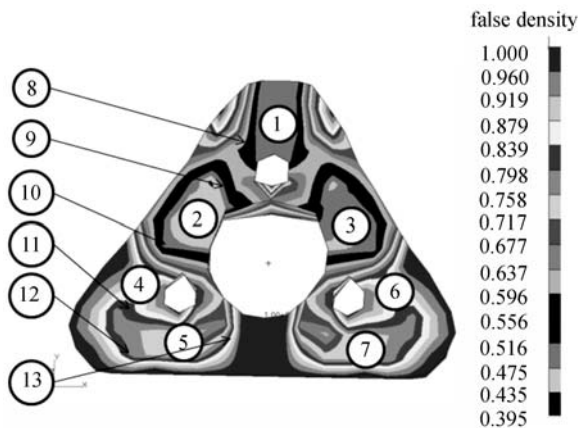


图3 主承力基板结构拓扑优化结果

Fig. 3 Topology optimization result of the main board

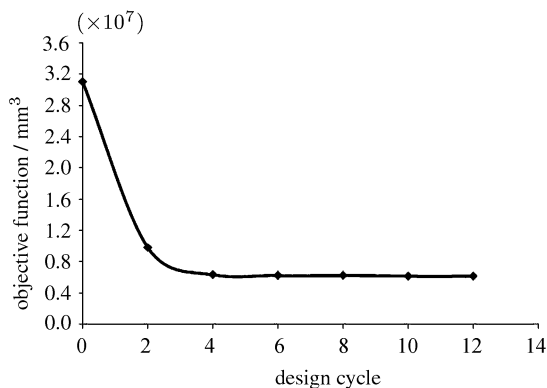


图4 主承力基板体积变化曲线

Fig. 4 Convergence curve of the main board volume



图 5 根据拓扑优化结果设计的相机主承力基板
内部竖筋布局

Fig. 5 Structure of the main board after topology
optimization analysis

4 拓扑优化后主承力基板结构的 模态分析及振动试验验证

模态分析主要用于求解结构的自然频率和相应的振动模态, 是空间相机各部件及整机研制工作的重要组成部分. 利用模态分析结果, 可以合理地分配刚度和质量, 避免由于固有频率相近引起的动力耦合. 对相机主承力基板进行模态分析是检验其设计是否合理、是否满足设计要求以及能否正常工作的重要指标, 也可以为后续的力学环境试验提供理论参考数据 [7-10].

通过有限元分析所得到的主承力结构一阶自然频率振型如图 6 所示. 前 5 阶自然频率值列于表 1.

为了验证主承力基板结构设计的合理性和优化分析的正确性, 对设计出的主承力基板进行 0.5 g 扫频试验. 图 7 所示为主承力基板水平方向振动的试验状态. 振动试验得出的主承力基板一阶自然频率为 479.2 Hz, 理论分析误差为

$$\Delta = \frac{487.8 - 479.2}{487.8} \times 100\% = 1.76\%.$$

0.5 g 扫频振动试验充分说明, 主承力基板结构设计合理, 满足使用要求, 证明了拓扑优化分析结果的正确性和准确性. 将拓扑优化设计应用于空间相机主承力基板结构设计不仅缩短了研制周期, 有效地降低了重量, 而且提高了主承力基板结构的性能, 满足了系统的设计要求.

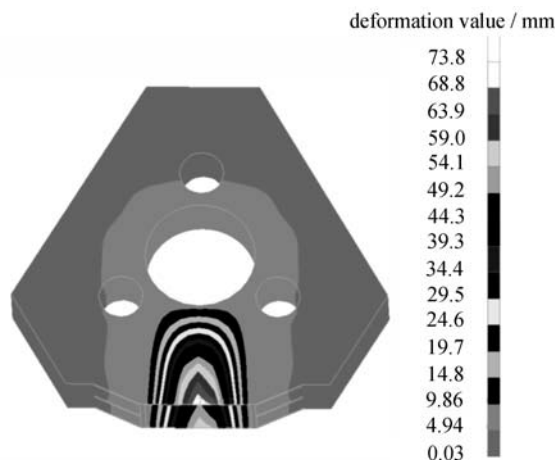


图 6 优化后主承力基板一阶自然频率阵型

Fig. 6 First natural frequency of the main board after
topology optimization analysis

表 1 优化后主承力基板前 5 阶自然频率

Table 1 Modes of the main board

模态数	1	2	3	4	5
频率/Hz	487.8	542	583.6	794.5	802.6

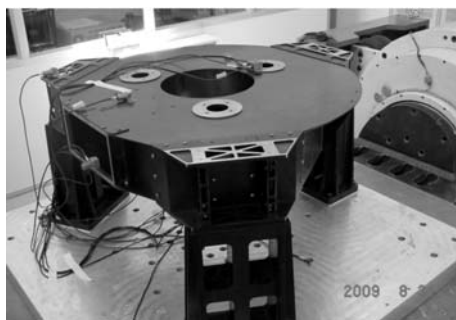


图 7 主承力基板水平方向振动试验状态

Fig. 7 State of the main board on the test-bed

5 结论

将基于密度插值法的连续体结构拓扑优化方法应用到轻型空间相机主承力基板结构设计中, 通过设定相应的约束条件和目标函数来优化获得结构中材料的合理分布, 设计出刚度高、重量轻的最佳结构. 轻型空间相机对相机主承力基板提出了苛刻的质量和刚度要求. 采用有限元拓扑优化的方法可以在保证刚度的情况下大大减少主承力基板的质量. 在满

足主承力基板一阶自然频率不小于 400 Hz 的条件下, 优化后相机主承力基板质量从初始的 36.8 kg 降低到 15.4 kg, 轻量化程度达 58.2%。通过有限元分析和 0.5 g 扫频振动试验结果可知, 该相机主承力基板内部的布局是合理的。采用拓扑优化设计方法可以避免设计过程中的盲目性和主观性, 极大地提高设计效率, 对生产实践具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Jia Xuezhi, Jin Guang, Zhang Lei. Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2008, **16**(8):1561-1565. In Chinese (贾学志, 金光, 张雷. 空间相机外遮光罩结构设计与优化 [J]. 光学精密工程, 2008, **16**(8):1561-1565)
- [2] Guo Zhongze, Zhang Weihong, Chen Yuze. An overview on the topological optimization design of structures [J]. *J. Mach. Design*, 2007, **24**(8):1-5. In Chinese (郭忠泽, 张卫红, 陈裕泽. 结构拓扑优化设计综述 [J]. 机械设计, 2007, **24**(8):1-5)
- [3] Wang Wei, Yang Wei, Chang Nan, Zhao Meiyang. The topological optimization system of variable density method based on MSC PATRAN/NASTRAN [J]. *J. Mach. Design*, 2008, **22**(5):5-8. In Chinese (王伟, 杨伟, 常楠, 赵美英. 基于 MSC PATRAN/NASTRAN 的变密度法拓扑优化系统 [J]. 机械设计, 2008, **22**(5):5-8)
- [4] Waqas S, Fan Yuqing, Lu Hu, Qasim Z. Topology optimization for manufacturable configuration design of aircraft [J]. *Tail. Rib. CADDM*, 2009, **19**(1):94-101
- [5] Wen Shijie, Long Kai. Light-weight design on engine support based on structural topology optimization method [J]. *Comp. Aided Eng.*, 2008, **17**(4). In Chinese (温世杰, 龙凯. 基于结构拓扑优化方法的发动机支架轻量化设计 [J]. 计算机辅助设计, 2008, **17**(4):51-54)
- [6] Guan Yingjun, Xin Hongwei, Zhao Guijun. Topologic optimization design for main supporting structure of space camera [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2008, **15**(8):1157-1163. In Chinese (关英俊, 辛宏伟, 赵贵军. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计 [J]. 光学精密工程, 2008, **15**(8):1157-1163)
- [7] Rietz A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) method [J]. *Struc. Multidis. Optim.*, 2001(21):159-163
- [8] Chen Changzheng, Zhao Lingling, Liu Lei, et al. Modal calculation and test of truss in space remote sensor [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2007, **15**(8):1164-1169. In Chinese (陈长征, 赵玲玲, 刘磊, 等. 空间遥感器支撑桁架的模式计算与试验 [J]. 光学精密工程, 2007, **15**(8):1164-1169)
- [9] Yang Jian, Zhang Pu. FEM Instances Tutorial of MD Nastran [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. In Chinese (杨剑, 张璞. 新编 MD Nastran 有限元实例教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008)
- [10] Du Haizhen, Rong Jianhua. Topology optimization of truck frame structure [J]. *Mach. Design Res.*, 2007, **23**(1):116-119. In Chinese (杜海珍, 荣见华. 汽车车架结构的拓扑优化设计 [J]. 机械设计与研究, 2007, **23**(1):116-119)