空间二维转台照准架的结构优化设计

张永强[1,2],刘朝晖[1],李治国[1],谢友金[1]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘　要:空间二维转台是空间相机等光电设备的主要承载机构,照准架作为转台的关键支撑部件,其刚度特性对于整个转台的刚度性能至关重要。为在减轻照准架重量的同时提高刚度性能,采用基于变密度法的拓扑优化理论,利用有限元软件 MSC.Patran/Nastran 对照准架进行拓扑优化设计。将照准架模态振型等效为推力作用下的模型变形,以结构刚度最大化为目标函数,剩余体积比为约束条件进行优化。结果表明:与经验模型相比,优化后的模型质量减小了 1.32 kg,且一阶固有频率提高了14.5 Hz。在 Z 方向的重力作用下,最大变形量相对减小了 22.4%,最大应力值相对减小了 22.6%,而且模型在其他方向的静力学特性都有显著提高。可见,优化后的照准架模型在质量减轻的情况下,动态特性得到了显著的改善。通过对优化模型进行试验模态分析,结果证明了有限元分析的正确性。因此,采用拓扑优化方法对照准架进行结构优化设计是切实可行的。

关键词:拓扑优化;　空间二维转台;　照准架;　有限元分析

中图分类号:V241.02　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201746.S113003

Optimum structural design for collimation frame of space-based two-dimensional turntable

Zhang Yongqiang[1,2], Liu Zhaohui[1], Li Zhiguo[1], Xie Youjin[1]

(1. Xi′an Institute of Optics Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Space-based two-dimensional turntable is the main load-bearing structure of space photoelectric detection equipment, and the collimation frame is the key support component of turntable, so its stiffness characteristics are vital for the performance of turntable. In order to decrease the mass and improve the stiffness performance, the structure of collimation frame was topologically optimized based on the variable density theory by finite element software –MSC. Patran/Nastran. Modal shape of collimation frame was regarded as the deformation of model under the thrust. The model was optimized with stiffness maximization as the objective function, the ratio of residual volume as the constraints. The results show that the model weight after optimization is lighten 1.32 kg and the first-order natural frequency increases 14.5 Hz compared with the model of experience design. The maximum deformation is relatively reduced by 22.4% and the maximum stress value is relatively reduced by 42.6% under the action of gravity in the *Z* direction and the

收稿日期:2017-06-20;　**修订日期**:2017-07-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(2015AA7045039)

作者简介:张永强(1991-),男,硕士生,主要从事光学工程方面的研究。Email:zhangyongqiang@opt.cn

导师简介:刘朝晖(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事空间稳瞄方面的研究。Email:lzh@opt.ac.cn

statics characteristic of model are increased significantly in the other directions. The dynamic characteristics of the collimation frame are improved significantly with the weight reduction. Modal experiment was done for the optimization model and the results indicate that the finite element analysis is correct. Therefore, it is feasible to use the method of topology optimization to design the structure of collimation frame.

Key words: topology optimization; space-based two-dimensional turntable; sighting frame; finite element analysis

0 引 言

空间二维跟踪转台是目标捕获和跟踪的执行单元。作为卫星的有效载荷,转台从发射到在轨工作,需要经历振动、冲击、空间微重力等力学环境,这些力学环境对空间转台的刚度提出很高的要求。转台分为方位轴系和俯仰轴系,照准架是转台俯仰轴系、光电设备的关键支撑部件,也是方位轴系回转的主要结构件,其刚度特性在很大程度上决定了转台的刚度,并且其质量占据了转台很大的份额。因此,有必要对照准架进行结构优化设计,使其在质量减轻的前提下提高结构的刚度和动态特性,从而使整机的动态特性满足使用要求[1]。

对于照准架的结构设计,以往都是按照设计者的设计经验来确定结构中加强筋、轻量化孔等形式的位置、尺寸、数量等,具有一定的盲目性,缺乏理论依据。拓扑优化设计方法为结构设计提供了理论依据,使设计者在概念设计阶段就有目的地添加或删除材料[2]。近年来,拓扑优化作为结构优化设计的一个重要方法,已经广泛应用到结构的优化设计当中。李畅[3]等人利用拓扑优化对空间相机框架进行了优化设计。刘仲宇[4]等人对红外引导头稳定平台主框架进行了拓扑优化设计。齐光[5]等人应用拓扑优化对空间相机反射镜进行了轻量化设计。

文中采用基于变密度法的拓扑优化技术,利用有限元分析软件 MSC.Patran/Nastran 对照准架进行拓扑优化设计,去除对结构刚度贡献较少的单元,实现结构质量的最优化分布,改善结构的动态特性,并通过静力学分析和模态分析检验优化模型的优劣。

1 拓扑优化理论

拓扑优化是指根据负载分布设定相应约束条件,对结构材料分布进行优化,使目标函数达到最优的设计方法[6]。

拓扑优化实际上就是材料在设计空间的分布优化问题。连续体结构拓扑优化最常见的方法是均匀法和变密度法。Nastran 早期版本采用的是均匀法,目前版本采用的是变密度法。变密度法是 Mlejnek 在均匀法的基础上提出的,其核心思想是先假设密度分布为 0~1 的伪密度材料,同时假设伪密度与材料弹性模量之间存在某种函数关系,通过密度插值函数将 0~1 分布的离散变量优化问题转变为(0,1)之间连续分布的优化问题。将每个单元的相对密度作为设计变量,在求解过程中逐步删除密度值低于下限的单元,即将结构优化问题转变为材料密度分布优化问题[7]。为了使中间密度材料迅速向边界收敛,变密度法引入惩罚因子对中间密度值进行惩罚,从而得到材料密度非零即一的理想拓扑优化模型[8]。由于伪密度与材料弹性模量之间存在假设函数关系,中间密度值对应的单元弹性模量很小,对结构总体刚度的影响很小,因此在优化过程中将该单元删除,从而得到理想的优化拓扑结构。材料插值模型决定着结构单元弹性模量与伪密度之间的函数关系,对拓扑优化结果至关重要。变密度法中常用的插值模型包括 SIMP (Solid Isotropic Microstructures with Penalization) 模型和 RAMP (Rational Approximation of Material Properties)模型。

SIMP 材料插值模型为:

$$E=\rho^{p}E_{0} \tag{1}$$

RAMP 材料插值模型为:

$$E=\frac{\rho}{1+P(1-\rho)}E_{0} \tag{2}$$

模型假设材料的弹性模量 E 随密度变量 ρ 变化而变化,材料泊松比为与 ρ 无关的常量。式中 p 为惩罚因子,通过合理地选取惩罚因子,可以使材料中间密度迅速向 0~1 收敛。二者相比之下,SIMP 模型对中间密度单元的惩罚效果更好。

结构拓扑优化的数学模型包括三个要素：设计变量、目标函数和约束条件。变密度法中，设计变量为材料的密度分布；目标函数通常为结构质量最轻或结构刚度最大化(即柔顺度最小化)等；约束函数通常选择优化的体积百分比。

刚度优化的数学模型为[9-10]：

$$\text{find: } \rho=\rho_1,\rho_2,\cdots,\rho_n \tag{3}$$

$$\text{min: } C=F^{\mathrm{T}}U=U^{\mathrm{T}}KU \tag{4}$$

$$\text{subject: } \frac{V(\rho)}{V_0}\leqslant f \tag{5}$$

$$KU=F \tag{6}$$

$$0<\rho_{\min}<\rho_i<1 \tag{7}$$

式中：C 为柔顺度值；K 为结构总体刚度矩阵；U 为结构总位移向量；V_0 为初始结构体积；V 为优化后的结构体积；f 为体积比；$\rho_{\min}$ 为拓扑密度变量下限，用于避免有限元分析奇异性，通常设置 $\rho_{\min}=0.001$。

2 照准架拓扑优化设计

照准架是俯仰轴系的支撑结构件，也是方位轴系回转的主要结构件。照准架的初始形状如图 1 所示，其主要受力区域为左右两臂的根部，所以将根部设计为斜面[11]，外形尺寸为：800 mm×250 mm×700 mm。根据以往设计经验，照准架的模态振型主要为两臂的摆动和扭转，因此在设计时应尽量使两臂的刚度最大化。

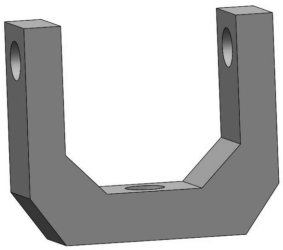


图 1 照准架毛坯图

Fig.1 Rough shape of collimation frame

2.1 照准架的有限元模型

采用 Patran 软件对照准架进行有限元模型的建立，然后提交 Nastran 软件对有限元模型进行计算。由于照准架为左右对称结构，为节省计算成本，只对其一半进行优化分析。模型采用六面体网格划分，六面体单元的有限元分析误差较小，因此在一定程度上可以克服棋盘格现象[12]。有限元模型如图 2 所示。模型包括：节点 24 784 个，单元 21 294 个。结构材料采用航天结构常用的钛合金(ZTC4)，弹性模量为118 GPa，泊松比为 0.33，密度为 4 550 kg/m^3。

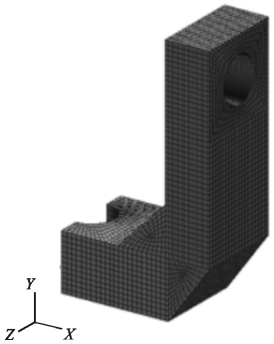


图 2 照准架网格模型

Fig.2 Mesh model of collimation frame

2.2 照准架拓扑优化过程

拓扑优化过程主要包括优化区域、约束条件、目标函数、边界条件的确定。具体过程如下：

(1) 优化区域：照准架支撑位置固定，为方位轴孔，受力区域为俯仰轴孔，因此设定优化区域为除轴孔附近一圈单元的所有实体单元；

(2) 约束条件：变密度法中通常以剩余体积百分比作为等效约束。取体积比 40%为上限，使材料的分布满足连续分布的要求，如果不能满足设计要求，可以适当增加体积比的量值，使其得到合理的结果；

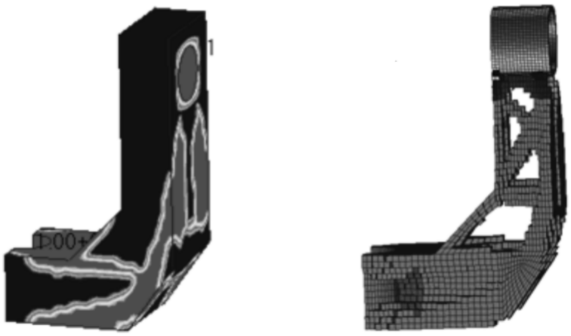
(3) 目标函数：为得到照准架结构刚度的最大化，以刚度为优化目标，在 Patran 中即选择结构柔顺度的最小化为目标函数；

(4) 定义位移载荷边界条件：照准架支撑位置为方位轴孔，因此在方位轴孔位置施加固定约束。此照准架支撑的俯仰轴系重量约为 300 N，因此在俯仰轴孔处施加 150 N(1/2 模型)竖直向下的力。由设计经验得知，照准架的一阶模态振型是两臂异向摆动，因此提高两臂刚度是提高照准架整体刚度的关键。在此将模型两臂异向摆动的振型模拟为模型在沿振动方向的推力作用下发生的变形情况，推力的量值设计为 150 N。模型受重力作用，整体施加重力 g。

2.3 分析优化结果

图 3 为模型在承受各个激励作用下的优化结果。图 3(a)中，灰色部分为主要材料分布区，伪密度值为 1，即对静载荷起主要支撑作用的区域，在优化设计时应合理保留。黑色区域为对静载荷支撑作用很小的区域，伪密度值为 0，即在优化时应合理删除

的区域。图 3(b)为模型删除伪密度值为 0 的单元之后的形状。根据分析结果可见,照准架前后两侧面和中间部分的单元被优化掉, 内部形成了两平行的竖直的筋板结构。由于加工工艺的限制,拓扑优化后的模型不能直接应用,需要进行适当的修改。根据模型拓扑优化结果, 结合加工工艺和模型整体性的要求对照准架进行重新建模,几何模型如图 4 所示。



(a) 颜色显示 (b) 单元显示

(a) Color display (b) Element Display

图 3 优化模型材料密度分布

Fig.3 Density distribution of optimal model

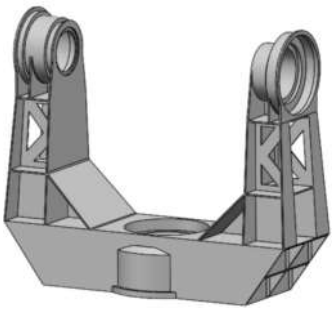


图 4 照准架优化模型

Fig.4 Optimal model of collimation frame

3 优化设计与经验设计对比分析

根据经验设计的照准架轻量化结构如图 5 所示。该模型为某航天项目中空间二维转台所应用的照准架。为了衡量拓扑优化的优劣,将拓扑优化模型与经验设计模型进行对比分析。

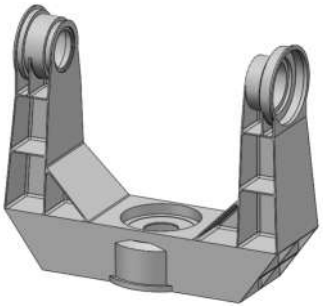


图 5 经验设计模型

Fig.5 Model of experience design

3.1 模态分析

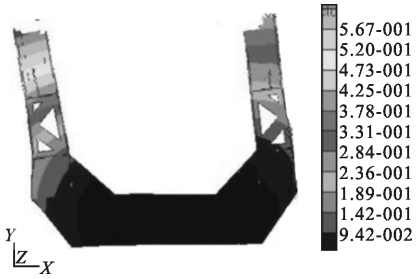
模态分析的主要目的是获取结构的动态特性,即系统的固有频率、阻尼、振型等[13],为结构优化提供参考,避免结构受所处动力学环境的影响,保证结构良好的动态响应特性。模态分为自由模态和约束模态,根据照准架的工作环境,在此分析其约束模态。

分别将两个几何模型导入 Patran 软件中, 网格划分、材料参数赋值之后进行约束模态分析。约束方位轴孔的所有位移来模拟转台底座的对照准架的约束。两种结构形式的对比结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,拓扑优化模型与经验模型相比,一阶约束频率由 255.5 Hz 提高到 270 Hz, 提高了 14.5 Hz,其他各阶频率都有显著提高。两种结构的一阶模态振型如图 6 所示,二者一阶振型不一致。从振型图得知,经验模型的一、二阶振型与优化模型的三、四阶振型对应, 从对应模态频率来看提高了 30 Hz 以上。同样,经验模型的三、四阶振型与优化模型的一、二阶振型对应,模态频率也有一定提高。可见优化模型与经验模型相比大大提高了结构的刚度, 实现了照准架的优化设计。

表 1 两种结构设计的模态分析结果

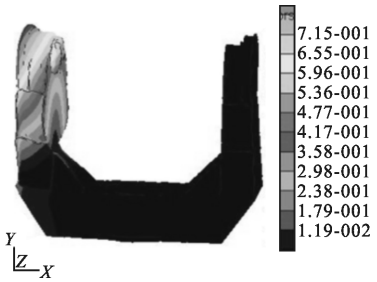
Tab.1 Modal analysis results for two kinds of structure forms

Mode order	1	2	3	4
Optimal design/Hz	270.0	272.3	287.2	288.8
Experience design/Hz	255.5	258.0	267.1	269.1
Change rate	5.7%	5.5%	7.5%	7.4%



(a) 优化设计

(a) Optimal design



(b) 经验设计

(b) Experience design

图 6 照准架一阶振型图

Fig.6 First order modal vibration of collimation frame

对优化模型进行试验模态分析，验证拓扑优化结果的正确性。

试验模态采用德国 M+P International 公司生产的 32 通道数据采集系统和 Smart Office Analyzer 数据处理分析软件进行数据的采集、处理与分析。试验现场如图 7 所示，试验采用锤击法激励，加速度传感器测试响应，采集各个测点的频响函数数据曲线来识辨模态参数。

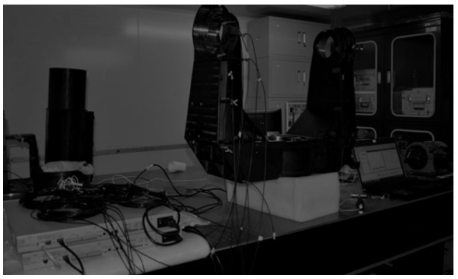


图 7 试验现场图

Fig.7 Connection diagram of experimental equipment

试验模态分析与有限元分析对比的结果如表 2 所示，试验模态一阶振型图如图 8 所示。结果表明：二者振型完全一致，前四阶固有频率偏差在 5%以内，说明有限元分析结果正确，进而证明上述拓扑优化设计的正确性。

表 2 模态试验结果及与有限元结果偏差

Tab.2 Deviation between modal test results and the finite element analysis results

Mode No.	Mode shape	Frequency/Hz		Deviation
		FEA	Test	
1	Bend	270.0	264.7	2.0%
2	Bend	272.3	266.1	2.3%
3	Torsion	287.2	295.1	-2.7%
4	Torsion	288.8	297.3	-2.9%

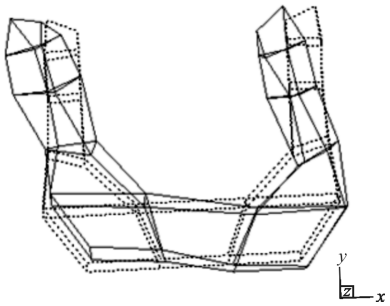


图 8 试验模态一阶振型

Fig.8 First order modal vibration of test

3.2 静力学对比分析

将模型方位轴孔固定，在 X、Y、Z 三个正交方向分别施加一个 g 的重力加速度。两种结构在三个方向上的静力学分析结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出，拓扑优化后的模型与经验模型相比，质量由 30.40 kg 减小到 29.08 kg，相对减小了 4.3%；在 X 方向的重力作用下，最大变形量相对减小了 3.7%，最大应力值相对减小了 25.5%；在 Y 方向的重力作用下，最大变形量相对减小了 8.7%，最大应力值相对减小了 12%；在 Z 方向的重力作用下，最大变形量相对减小了 22.4%，最大应力值相对减小了 22.6%。由此可见，拓扑优化模型在质量减轻的同时结构的刚度明显增大，实现了照准架模型的优化设计。

表 3 两种结构形式的静力学分析结果

Tab.3 Static analysis results for two kinds of structure forms

Index	Maximum deformation/μm			Maximum stress/MPa			Mass /kg
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Experience design	5.41	2.30	5.81	1.10	0.50	1.15	30.40
Optimal design	5.21	2.10	4.51	0.82	0.44	0.89	29.08
Change rate	3.7%	8.7%	22.4%	25.5%	12%	22.6%	4.3%

4 结 论

基于变密度法，采用 MSC.Patran-Nastran 软件对照准架进行了拓扑优化设计，优化后模型较经验设计模型质量减轻了 1.32 kg，实现了轻量化设计。采用 Solidworks 软件对优化后的模型和经验设计模

型进行了三维建模,并且利用 MSC.Patran-Nastran 对模型进行了静力学分析和模态分析。对比结果表明,在各个方向的重力加速度作用下, 模型的静力学特性都有显著提高,尤其在 Z 方向,优化后的照准架模型较经验设计模型最大变形量相对减小了 22.4%,最大应力值相对减小了 22.6%。一阶固有频率由 255.5 Hz 提高到 270 Hz, 提高了 5.7%。而从振型相对应的角度来看, 更是把经验模型的基频模态提高了 30 Hz 以上。可见优化模型显著提升了结构的动态特性。

研究结果表明,拓扑优化设计能够快速、准确地确定模型的材料分布。经过拓扑优化设计的模型与经验设计模型相比,质量更轻,基频更高,静力学特性更好,故其结构设计更趋合理。因此,该拓扑优化设计是切实可行的。与以往经验设计相比,拓扑优化设计更具理论指导意义和工程应用价值。

参考文献:

[1] Wang Ping, Zhang Guoyu, Liu Jiayan, et al. Topologyoptimization design for inner frame of airborne electro-optical platform [J]. ***Journal of Mechanical Engineering***, 2014, 50(13): 135-141. (in Chinese)

[2] Xia Tianxiang, Yao Weixing. A survey of topology optimization of continuum structure [J]. ***Advances in Aeronautical Science and Engineering***, 2011 (1): 1-11, 55. (in Chinese)

[3] Li Chang, He Xin, Liu Qiang. Design and topology optimization of space camera frame fabricated by high volume fraction SiC/Al composite material [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(8): 2526-2531. (in Chinese)

[4] Liu Zhongyu, Zhang Tao, Wang Ping, et al. Topology optimization design for main frame of infrared seeker′s stabilization platform [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(2): 0218001. (in Chinese)

[5] Qi Guang, Xu Yanjun, Liu Bingqiang. Lightweight structure design for SiC/Al supporting plate of space mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43 (7): 2214-2218. (in Chinese)

[6] Wang Kejun, Xuan Ming, Dong Jihong, et al. Design method of reflector component structure of space remote sensor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45 (11): 1113001. (in Chinese)

[7] Liu Xiumin, He Bin, Sha Wei, et al. Topological lightweight design of primary mirror in space camera [J]. ***Chinese Journal of Optics and Applied Optics***, 2010, 3(3): 239-244. (in Chinese)

[8] Wang Wei, Yang Wei, CHang Nan, et al. Topological optimization system of variable density method based on finite element software[J]. ***Journal of Machine Design***, 2008 (5): 5-8. (in Chinese)

[9] Li Lin, Wang Dong, Tan Luyang, et al. Optimization design and test for bracket of star sensor in micro-satellite [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(6): 1352-1358. (in Chinese)

[10] Guan Yingjun, Xin Hongwei, Zhao Guijun, et al. Topologic optimization design for main supporting structure of space camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2007, 15(8): 1157-1163. (in Chinese)

[11] Wang Zhi. Design of collimation frame structure for lunar-based extreme ultraviolet camera based on carbon fiber reinforced plastics[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(6): 590-595. (in Chinese)

[12] Long Kai, Jia Changzhi, Li Baofeng, et al. Patran 2010 and Nastran 2010 Finite Element Analysis from Entry to the Master[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)

[13] Yang Hongtao, Jia Jiqiang. Finite element modality and stiffness analysis of airborne electro-optical platform inner-gmibal[J]. ***Computer Simulation***, 2005, 22(11): 311-314. (in Chinese)