

# 基于 OptiStruct 的望远镜主框架拓扑优化设计

## Topologic Optimization Design of Telescope Main Frame Based on Optistruct

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 马肇材<sup>1,2</sup> 陈 华<sup>1,2</sup> 刘 伟<sup>1</sup>  
MA Zhao-cai CHEN Hua LIU Wei

**摘要:**针对某航空望远镜主结构的重量过高的问题,提出了对航空相机望远镜主框架进行拓扑优化设计的方法。基于拓扑优化理论,在重力过载的工况下对望远镜主框架拓扑优化,以整个框架作为设计变量,以框架的体积分数和固有频率作为约束条件,选结构的柔度最小化为目标函数,建立拓扑优化模型。采用 MSC.PATRAN/NASTRAN 软件对航空望远镜拓扑优化结果进行仿真,分析结果表明,结构的重量减少了 77%,结构静态刚度提高,动态刚度符合要求,温度变化环境下光学成像条件改善。

**关键词:** 拓扑优化; 刚度; 航空望远镜

**中图分类号:** V447.3 (V-航空航天) 文献标识码: A

**Abstract:** In order to reduce the weight of an aerial telescope main structure, a topologic optimization design method of the aerial telescope main frame was presented. The telescope main frame with overloaded gravity was optimized based on topologic theory. The topologic optimization model takes the whole frame as variation, takes volume fraction and natural frequency as computing constrains, takes the maximal structure stiffness as the objective function. The resulted model was analyzed with MSC.PATRAN/NASTRAN software. The result indicated that the structure's total weight was reduced 77%, the structure's static stiffness increased, the dynamic stiffness was suitable and the optical imaging condition was improved.

**Key words:** topologic optimization; stiffness; aerial telescope

## 1 引言

在航空相机概念设计阶段,为了保证航空相机能适应机载平台上复杂的工作环境(如冲击、振动、高低温变化、低气压等),有良好的成像质量,因此需要相机具有良好的结构刚度的同时也要保证相机反射镜具有良好的热稳定性。航空相机在概念设计阶段以保证相机的结构刚度及热稳定性为主,而对重量这一重要因素考虑的相对较少。以往的设计大多是根据设计经验和试验在初期的设计基础上进行小范围的改进,效率低、效果不好。本文在保证相机具有足够的静态刚度、动态刚度和强度及热稳定性的前提下,采用变密度法和变厚度法对望远镜框架进行了拓扑优化,成功获得相机的最佳的拓扑结构形式,重量大幅减少。

## 2 拓扑优化理论基础

结构优化设计一般存在三个层次,即拓扑优化、形状优化和尺寸优化,分别对应产品的概念设计、基本设计和详细设计三个阶段。拓扑优化的目的是在设计空间寻求结构刚度的最佳分布形式,或者结构最佳传力途径,以优化结构的某些性能或者减轻结构的重量。拓扑优化包括刚性构件的拓扑优化和柔性构件的拓扑优化。刚性结构的拓扑优化是求解在已知外力作用下设计区产生位移最小或材料最省的结构形式。柔性结构的拓扑优化是求解结构通过部分或全部柔性构件的变形而产生相应位移的拓扑构成形式。本文属于刚性结构的拓扑优化范畴。

### 2.1 连续体结构的拓扑优化模型

拓扑优化中的拓扑描述方式和材料插值模型非常重要,是一切后续优化方法的基础。拓扑优化中常用的拓扑表达形式和材料插值模型有:均匀化方法(Homogenization method)、密度法(如各向正交惩罚材料密度法,即 SIMP(Solid isotropic material with penalization model)方法)、变厚度法和拓扑函数描述方法等,其中密度法和变厚度法是 OptiStruct 中设计区是壳单元模型常用的两种主要的材料插值方法。

变厚度法是较早采用的拓扑优化方法,属几何描述方式,其基本思想是以基结构中单元厚度为拓扑设计变量,将连续体拓扑优化问题转化为广义尺寸优化问题,通过删除厚度为尺寸下限的单元实现结构拓扑的变更。该方法突出的特点是简单,适用于平面结构(如膜、板、壳等)。

变密度法是连续体拓扑优化的常用方法,属于材料描述方式。其基本思想是引入一种假想的密度,即 0~1 的可变材料,指定每个有限单元的密度相同,并以每个单元的相对密度为设计变量。当单元相对密度  $x_e = 0$  时,表示该单元无材料,单元应删除;当单元相对密度  $x_e = 1$  时,表示该单元有材料,保留或增加该单元。变密度法直接假定相对密度与材料弹性模量之间的非线性对应关系。

变密度法中常用的插值模型主要有:固体各向同性惩罚微结构模型(Solid Isotropic Microstructure with Penalization,简称 SIMP),其材料模型为

$$\rho(x) = x_e \rho_0 \quad (1)$$

$$E(x) = x_e^p E_0 \quad (2)$$

式中:  $x_e$  为每个单元的相对密度;  $\rho(x)$  为拓扑优化设计变量;  $\rho_0$  为设计区域每个单元的固有密度;  $E(x)$  为优化后的弹性

马肇材: 硕士

模量 ; $E_0$ 为初始弹性模量  $\rho$  为惩罚因子。

在结构设计中常以设计结构整体的体积约束作为优化的约束条件 ,以刚度最大化作为优化的目标函数 ,在给定载荷和位移边界条件下 ,基于变密度法拓扑优化数学模型为 :

$$\begin{aligned} \min : C(x) &= U^T K U \\ s.t. : &\begin{cases} \sum_{j=1}^n V_j x_j - V \leq 0 \\ 0 < x_{\min} \leq x_j \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$V_j$ 为结构优化后的结构体积,  $x_j$  为单元设计变量,  $x_{\min}$  为单元设计变量的最小值。

2.2 拓扑优化求解的数值算法

在建立可靠的优化模型后 ,还需要选择收敛速度快且计算不是很复杂的优化算法。目前连续体结构拓扑优化研究的主要方法是数值解法。一般都是将拓扑优化问题转化为参数优化问题 ,再借鉴目前较为成熟的参数优化方法求解。主要的数值方法有优化准则法、数学规划法、渐进优化法和遗传算法等 ,本文采用优化准则法。

优化准则法 (optimality criteria ,OC)是根据物理条件及工程要求 ,来建立结构在一系列约束条件下(应力、位移、频率等)需满足的最佳准则 ,从可行的设计中找出最佳的设计方案 ,以充分发挥材料的强度、刚度和稳定性的潜力 ,找出最佳传力路径。优化准则法最突出的特点是迭代次数少 ,且迭代次数对设计变量的增加不敏感 ,因而具有很高的计算效率。

3 拓扑优化模型建立与优化结果

航空相机望远镜的顶部四点与相机支座固定连接置于于舱内 ,下部面向大地。在 Hypermesh 软件中建立望远镜的有限元模型 ,其顶点四点全约束固定。望远镜框架全部采用壳单元 ,单元尺寸参考总体模型设计区域的大小设为 4mm ,在初始设计中用于固定连接相机支座和反射镜支撑的部分才用 8mm 的壳单元 ,其余全面为 6mm。反射镜及其支撑结构采用六面体单元。望远镜框架质量为 ,拓扑优化设计区为整个望远镜框架 ,反射镜及其支撑结构为非设计区。

在选择相机材料遵循材料线膨胀系数相一致的原则 ,由于镜体采用的是微晶玻璃 ,镜支撑采用的是 4J32 ,框架采用的是 TC4 钛合金材料 ,因此温度对成像质量条件的影响是最主要的因素。航空相机材料性能见表 1。

表 1 航空相机材料性能表

材料	密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	弹性模量 $E(GPa)$	线胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	泊松比 $\mu$
铁镍合金(4J32)	8.1	141	0.24	0.25
钛合金 (TC4)	4.44	109	9.1	0.34
微晶玻璃	2.53	90.3	0.05	0.24

拓扑优化的目的是在保证性能下获得合理的结构拓扑形式 ,在拓扑优化中材料的过度去除会导致动态刚度的下降 ,而拓扑优化的目标是保证结构刚度下的轻量化。因此 ,对望远镜框架的拓扑优化选择整个望远镜框架作为设计区 ,以优化设计区的体积分数和一阶模态的响应作为约束条件 ,以结构的最小柔度即结构刚度最大化为目标函数 ,在 Hypermesh 中建立拓扑优化模型 ,其中体积分数的上限为 75%下限为 20% ,频率响应以一阶模态以 200Hz 作为下限 ,防止当结构材料去除过多时结构的动态刚度不符合设计要求。最后使用 Hyperworks 中的 OptiStruct 优化软件求解得到基于变密度法和变厚度法的拓扑

优化的两种结果。从拓扑优化的迭代曲线(图 1)可以看出结构的目标函数——柔度大幅减少 ,刚度提高但结构的体积并不是最小 ,一阶频率在约束范围以上达到设计的要求 ,结构的性能提高。从拓扑优化的结果图(图 2、3)中可以看出基于上述两种方法得到的拓扑结构形式是基本一致的 ,证明了望远镜框架拓扑优化的最优拓扑形式的唯一性和结果的可信性。

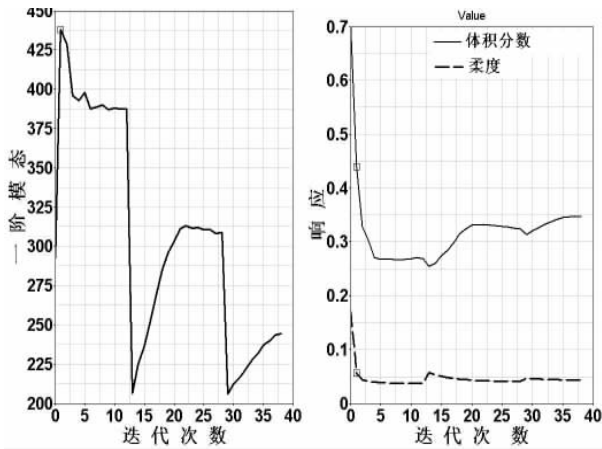


图 1 目标函数与约束响应迭代曲线图

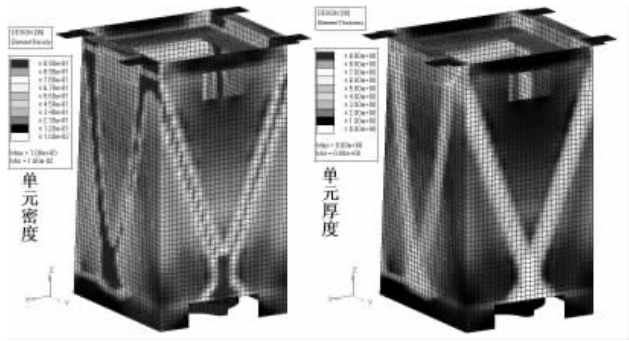


图 2 单元密度与厚度的拓扑优化结果图

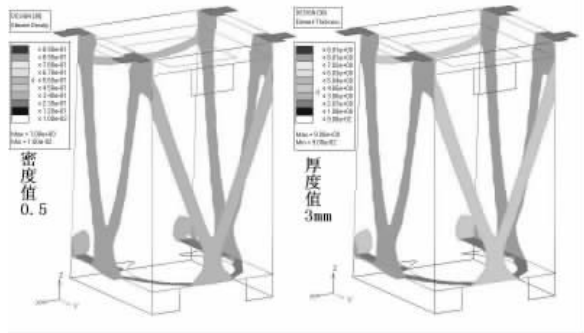


图 3 密度为 0.5 和厚度为 3mm 图

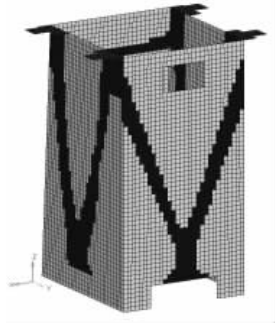


图 4 最终有限元模型图

## 4 优化模型的有限元分析

结合拓扑优化的密度拓扑结果和厚度拓扑结果,根据实际设计中防杂光的需要,对望远镜框架去除材料部分采取最小壁厚原则设计为 1mm,与次镜支撑相连接的部分最后的优化结果为 6mm,顶部连接支座部分厚度为 8mm,其余 3mm。重新建立有限元模型如图 4,航空相机在线胀系数一致的原则下的选取的材料线胀系数存在差异,因此温度变化对光学成像条件的影响比恒加速度、振动等其他工况对光学成像条件的影响大很多。考虑热源和望远镜系统在吊舱中的位置,在概念设计阶段以稳态最大温升 30℃ 利用 MSC.PATRAN/NASTRAN 软件进行热变形分析。把优化前后的有限元模型先后提交 MSC.Patran/Nastran 软件进行分析和结果的后处理。输出次镜的镜面变形数据,经计算得到优化前后的面形 PV 值和 RMS 值,PV 值由优化前的 10.427nm 降到优化后的 5.355nm,RMS 值由 1.811nm 降到 1.000nm,轴向平均刚体位移变小,最后进行模态分析验证了最小的一阶模态频率为 253.46Hz,优化后结构刚度提高、动态刚度符合要求,框架质量由原来的 3.549Kg 减少为 0.804Kg。

## 5 结论

本文阐述了 OptiStruct 优化软件的拓扑优化理论中的变密度法和变厚度法,在航空相机望远镜主框架概念设计阶段遇到的结构性能与结构轻量化的课题,提出了采用 OptiStruct 优化软件对望远镜框架进行拓扑优化的方法。基于变密度法和变厚度法理论的拓扑优化得到一致的拓扑结构形式,证明结果的唯一性,创新性地结合两种拓扑结果得到最后的有限元模型。最终的模型重量降低了 77%,面形值得到很大改善,热变形结构刚度提高。拓扑优化后的结构满足系统动态刚度的要求和热变形的要求。基于 OptiStruct 的拓扑优化缩短了设计周期,有效地降低了结构的重量,提高了结构的性能,满足了光学成像条件设计要求。

本文作者的创新点:本文结合两种拓扑优化的模型结果得到重量大幅减轻的拓扑优化结构,应用拓扑优化方法解决了光学性能与结构重量的课题。

### 参考文献

- [1]丁亚林.空间遥感相机光学镜头尺寸稳定性设计[J].光学精密工程,1998,6(6)增刊:51-56.
- [2]郭中泽,张卫红,陈裕泽.结构拓扑优化设计综述[J].机械设计,2007,8(8):1-6.
- [3]罗震,陈立平,黄玉盈,等.连续体结构的拓扑优化设计[J].力学进展,2004,11(4):463-476.
- [4]王健,程耿东.应力约束下薄板结构的拓扑优化.固体力学学报,1997,18(4):317-322.
- [5]李延伟,杨洪波,耿麒麟,等.大口径主反射镜轻量化结构拓扑优化设计方法[J].光学技术,2008,3(2):236-238.
- [6]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[J].光学精密工程,2007,8(8):1157-1163.
- [7]沈满德,陈良益等.基于优化设计的单元尺寸确定方法[J].微机计算机信息,2007,12-1:239-241.
- [8]周顺生,范晋伟,岳中军,等.有限元分析在数控铣床热变形方面的研究[J].微机计算机信息,2005,08(21):58-59.

作者简介:马肇材(1982.12-)男,汉族,山东临沂人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士。主要研究方向是光学机械;刘伟(1967.12-)男,汉族,山东沂水人,中国科学院长

春光学精密机械与物理研究所,高级工程师,博士,一直从事光学精密机械研究。

**Biography:** MA Zhao-cai (1982.12-), male, Linyi, Shandong province. The postgraduate student of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, the main direction of research is optical machine.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 马肇材 陈华 刘伟

(100039 北京 中国科学院研究生院) 马肇材 陈华

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) MA Zhao-cai CHEN Hua LIU Wei

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China) MA Zhao-cai CHEN Hua

通讯地址:(130033 长春 长春市经济技术开发区营口路 20 号 D 座 321 室) 马肇材

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)

### (上接第 213 页)

本文的创新点:提出了基于连续小波变换的电力系统谐波处理,该方法避免了传统傅里叶算法的纯频域缺点,也避免了离散小波变换的能量泄露和分频带不够精确等问题,并用 Morlet 复小波验证的算法的准确性。

### 参考文献

- [1]陈其松,陈孝威等.电力系统谐波检测与抑制[J].微机计算机信息,2007,10-1:258-261.
- [2]杨富生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999
- [3]Stephane Mallet. A Wavelet Tour of Signal Processing[M]. Academic Press, 1998
- [4]Weon-Ki Yoon, Michael J. Devaney. Reactive Power Measurement Using the Wavelet Transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL.49, NO.2, 2000
- [5]Norman C.F. Tse. Practical Application of Wavelet to Power Quality Analysis[J]. IEEE, 2006
- [6]Richard Bussow. An algorithm for continuous Morlet wavelet transform. Mechanical Systems and Signal Processing [J]. 2007: 2970-2979
- [7]D. Jordan, R.W. Miskad, E.J. Powers. Implementation of the continuous wavelet transform for digital time series analysis[J]. Review of Scientific Instruments 68 (3) (1997) 1484-1494.

作者简介:董婷(1983-)女(汉族),华东理工大学硕士研究生,测试计量技术及仪器专业,主要研究方向为基于 DSP 的继电保护算法;阮建国(1956-)男(汉族),华东理工大学信息学院副教授,主要从事智能检测和自动控制等方面的研究。

**Biography:** DONG Ting (1983-), female (Han), East China University of Science and Technology, Master. Research area: relay protection arithmetic based on DSP.

(200237 上海市 华东理工大学信息科学与工程学院) 董婷 阮建国

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China) DONG Ting RUAN Jian-guo

通讯地址:(200237 上海 华东理工大学实验 15 楼 308 室) 董婷

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)