

## 《空间光学遥感器》专题文章导读

任建岳

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

近年来,随着对遥感器信息捕获量的要求越来越高,空间遥感器逐步向高分辨率、轻小化、宽幅成像等方向发展。性能指标要求的提高对遥感器系统在结构设计、材料、辐射特性、电子学性能等方面提出了新的要求。本专栏论文涉及到了空间光学遥感器主支撑结构优化、模态测试及分析模型的修正;结构材料的测试、应用;辐射特性测试分析与校正;CCD电路设计以及噪声的分析与处理等一系列遥感器研制中的新技术和新材料的研究与应用。

《空间相机主支撑结构拓扑优化设计》一文,利用拓扑优化的方法,对空间相机的主支撑结构进行了优化设计,在保证主支撑结构刚度的前提下,重量降低了35%。

《空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验》一文,对空间遥感器的主支撑桁架进行了模态测试,测试结果表明支撑结构一阶频率为154 Hz,满足设计指标要高于140 Hz的要求。通过试验结果与分析结果的相关性分析,指出了有限元模型存在的问题,对有限元模型的进一步修正提供了试验数据支持。

《空间相机反射镜碳化硅材料性能测试》分析了用SiC材料制备反射镜毛坯的几种方法存在的优缺点,对SiC反射镜表面在镀银、镀硅和镀硅后再镀银的表面处理后反射率特性进行了测试。对碳化硅材料的研磨工艺进行了分析测试,并用Wyko干涉仪测试了研磨后的面形精度和表面粗糙度,面形PV值为0.068 $\lambda$ ,RMS值为0.01 $\lambda$ ,粗糙度为6.27 nm。结果表明,碳化硅材料的性能和可加工性能都能满足使用要求。

《制备空间光机结构件的高体分SiC/Al复合材料》一文,采用无压浸渗复合新方法制备了高体分SiC/Al复合材料大尺寸坯锭,并通过特种加工手段加工了样件。结果表明,该材料具有很好的比刚度和热特性,比航天通常应用的钛合金材料性能更优越。

《碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用》一文,从基础研究和工艺技术两个方面对碳纤维/环氧复合材料进行了研究,对其性能进行了测试,研究了在空间光学机构中的应用工艺。结果表明,碳纤维/环氧复合材料具有高的比强度和比刚度,较铝合金可以减重30%以上,热膨胀系数具有可设计性,在质损和挥发性方面均可以满足空间光学结构中的应用要求。

《空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法》一文,采用泰勒级数和矩阵函数模型描述了“辐射响应函数”的物理概念,并提出了多次回归分析求解矩阵方程获得辐射校正系数的方法。实验证明了该方法的正确性,并通过对光学传感器辐射定标建立了其入射辐亮度与输出图像灰度间的辐射响应函数,为实现辐射亮度图像的反演和辐射校正提供了数据支持。

《CCD成像系统中模拟前端设计》一文,建立了CCD视频信号处理器这个模拟数字混合器件芯片内部的电源及接地模型,并根据该模型对PCB布局布线进行了分析和设计、工程实践结果表明,系统的信噪比在像素时钟为6 MHz情况下可达54 dB。

《TDI-CCD图像传感器的噪声分析与处理》一文,对TDI-CCD图像的噪声组成进行了完整的分析,给出了其噪声的详细分类,并根据各种噪声的特点提出了相应的噪声处理技术。其中,针对KTC噪声,给出了双相关采样电路处理方式,使器件的信噪比提高到53.8 dB。

文章编号 1004-924X(2007)08-1157-07

# 空间相机主支撑结构拓扑优化设计

关英俊<sup>1,2</sup>,辛宏伟<sup>1</sup>,赵贵军<sup>1</sup>,刘巨<sup>1</sup>,任建岳<sup>1</sup>

(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. 长春工业大学 机电工程学院,吉林 长春 130012)

**摘要:**针对目前空间相机主支撑结构设计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方法对空间相机光学系统主支撑结构进行优化设计的方案,并采用有限元分析法对两种空间相机主支撑结构优化设计的结果进行了检

收稿日期:2007-05-22;修订日期:2007-07-18.

基金项目:国家863高技术计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

验。对卡塞格林光学系统和 TMA 光学系统主支撑结构进行拓扑优化后做了比较,卡塞格林光学系统主支撑结构一阶固有频率从 41 Hz 提高到 72 Hz,重量降低了 15%;TMA 光学系统主支撑结构在一阶固有频率不降低的情况下,重量降低了 35%。结果表明,采用拓扑优化设计方法缩短了设计周期,提高了空间相机主支撑结构的性能,有效降低了支撑结构重量,满足了系统设计要求。

**关键词:**空间相机;拓扑术;优化设计;有限元分析

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A

## Topologic optimization design for main supporting structure of space camera

GUAN Ying-jun<sup>1,2</sup>, XIN Hong-wei<sup>1</sup>, ZHAO Gui-jun<sup>1</sup>, LIU Ju<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

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

2. *Mechatronics Engineering School, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

**Abstract:** In order to obtain a lightweight and high-stiffness main supporting structure of space camera, a topologic optimization design method of space camera was presented. Based on the method, two kinds of main supporting structures of space camera with Cassegrain and TMA optical systems were optimized using Finite Element Method(FEM). Compared with before optimization, the first-order natural frequency of the main supporting structure of Cassegrain optical system raises from 41 Hz to 72 Hz with 15 percent weight lost, and the main supporting structure of TMA optical system loses 35 percent weight without changing the first-order natural frequency. The numerical results indicate that after adopting the topologic optimization design method, not only the design period is shortened, but also the supporting structure weight is effectively reduced and the capability of the main supporting structure is enhanced also, Which shows that optimized support structures can meet the system design requirements.

**Key words:** space camera; topology; optimal design; FEA

## 1 引言

为确保相机在空间环境下正常工作,保持良好的光学性能,在发射运载过程中不受破坏,不产生残余变形,要求相机结构具有足够高的刚度和强度<sup>[1-2]</sup>。空间相机主支撑结构是各光学组件的承载体,所承受的力学环境更为恶劣,对热环境的适应性要求也更为严格。因此,保证空间相机主支撑结构具有较轻的重量、足够的强度和刚度以及良好的热环境适应性,一直是空间相机结构设计的重大课题。本文针对卡塞格林光学系统和 TMA 光学系统主支撑结构,采用拓扑优化设计方法,分别对其进行了概念设计。数值计算结果

表明,采用拓扑优化设计方法对于降低空间相机主支撑结构重量、提高其刚度具有明显效果。

## 2 结构拓扑优化理论基础

对于空间相机主支撑结构设计,由于初始的结构设计已相对具有一定程度的合理性,考虑到加工工艺、安装方便等因素,采用连续体结构拓扑优化会更加合理,更加直观。一定程度的拓扑优化后,可采用其他的优化方法进行进一步的优化设计。

连续体结构的拓扑优化设计<sup>[3]</sup>是继结构尺寸优化设计和形状优化设计以后,在结构优化领域出现的一种富有挑战性的研究方向。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。在结构的初始拓扑形式未知的情况下,寻求结构最优的拓扑关系,在整个产品的初始设计阶段具有重要的意义。

完整的产品设计包括拓扑优化、形状优化和尺寸优化 3 个过程<sup>[4]</sup>,分别对应产品的概念设计、基本设计和详细设计 3 个阶段。拓扑优化的结果主要作为概念设计阶段的参考,而局部应力约束和稳定性约束等一般可通过后续的基本设计和详细设计来考虑。结构的拓扑最优并不能保证优化结构中各部件的尺寸或形状一定最优,因而结构优化设计过程是个集成的包括 CAD/CAE 过程的动态设计过程。

## 2.1 刚度拓扑优化的数学模型和迭代格式

结构设计中经常以刚度最大化或应变能最小化作为优化的目标函数,以结构整体的体积约束作为优化的约束条件,在给定载荷和位移边界条件下,基于密度函数模型建立线弹性结构拓扑优化设计的静力状态下的数学模型。

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

考虑设计变量的上下限约束和体积约束因子,在一次迭代中,适当地限制设计量的变化量可以使迭代过程稳定。在迭代中引入极限常数  $\kappa$ 。为了避免初始迭代时删除单元过多而影响其后最优拓扑的搜索, $\kappa$  的初始经验值通常在 0.1~0.3 之间。基于优化准则法<sup>[6]</sup>可得两种设计变量的启发式迭代格式:

第一种迭代格式

$$x_j^{(k+1)} = \begin{cases} \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \\ \text{if: } \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \leq (D_j^{(k)})^\zeta x_j^{(k)} \\ (D_j^{(k)})^\zeta x_j^{(k)} \\ \text{if: } \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\} \\ < (D_j^{(k)})^\zeta x_j^{(k)} < \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \\ \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\} \\ \text{if: } (D_j^{(k)})^\zeta x_j^{(k)} \leq \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\}, \end{cases} \quad (2)$$

第二种迭代格式

$$x_j^{(k+1)} = \begin{cases} \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \\ \text{if: } \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \\ \leq \{\theta x_j^{(k)} + (1-\theta)x_j^{(k)} D_j^{(k)}\} x_j^{(k)} \\ \{\theta x_j^{(k)} + (1-\theta)x_j^{(k)} D_j^{(k)}\} x_j^{(k)} \\ \text{if: } \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\} < \\ \{\theta x_j^{(k)} + (1-\theta)x_j^{(k)} D_j^{(k)}\} x_j^{(k)} \\ < \min\{(1+\kappa)x_j^{(k)}, 1\} \\ \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\} \\ \text{if: } \{\theta x_j^{(k)} + (1-\theta)x_j^{(k)} D_j^{(k)}\} x_j^{(k)} \\ \leq \max\{(1-\kappa)x_j^{(k)}, x_{\min}\}, \end{cases} \quad (3)$$

对固体各向同性惩罚微结构模型(SIMP)<sup>[7]</sup>,密度刚度插值格式为:

$$D_j^{(k)} = \frac{\mathbf{U}^T \mathbf{K}_j \mathbf{U}_j \Delta E}{(p x_j^{p-1}) \Lambda^{(k)} V_j} = \max\left(0, -\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) \frac{1}{\Lambda^{(k)} V_j}, \quad (4)$$

对材料属性合理近似模型(RAMP)<sup>[8]</sup>,密度刚度插值格式为:

$$D_j^{(k)} = \frac{(1+q)\mathbf{U}^T \mathbf{K}_j \mathbf{U}_j \Delta E}{1+q(1-x_j)^2 \Lambda^{(k)} V_j} = \max\left(0, -\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) \frac{1}{\Lambda^{(k)} V_j}, \quad (5)$$

为使迭代过程稳定,阻尼因子  $\zeta$  ( $0 < \zeta < 1$ ) 和  $\theta$  ( $0 < \theta < 1$ ),取经验值 0.5,  $k$  为迭代次数。

## 2.2 频率最大化的数学模型

结构拓扑优化在动力学中的一个重要应用就是结构自由振动的特征值优化,也就是追求结构具有较高的基频,避免结构与外界激励载荷发生耦合共振。为了避免由于多模态特征值问题导致单个特征值的删除,可采用如下的优化模型:

$\max: \beta$

$$\text{S. t. : } \begin{cases} [\alpha] \lambda_i \geq \beta, i = 1, \dots, N_{\text{dof}} \\ (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \boldsymbol{\phi}_i = 0 \\ \sum_{j=1}^N V_j x_j - V \leq 0, j = 1, \dots, N \\ 0 < x_{\min} \leq x_j < 1, \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{K}$  为系统刚度矩阵;  $\mathbf{M}$  为系统质量矩阵;  $\boldsymbol{\phi}_i$  是与第  $i$  阶特征值  $\lambda_i$  相关的特征向量;  $x$  表示设计变量,在实际的分析运算中为避免刚度矩阵的奇异,取  $x_{\min} = 0.001$ ;  $j = 1, \dots, N$  为单元数目;  $i = 1, \dots, N_{\text{dof}}$  为特征值问题的所有模态,但在实际问题中,一般只截取前 10 阶对结构动态响应

起主要作用的模态; $\beta$ 为指定的频率值; $\alpha=0.95$ 。

$$\text{目标函数为 } \lambda_i = \frac{\phi_i^T \mathbf{K} \phi_i}{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i}, \quad (7)$$

$$\text{灵敏度为: } \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} = \phi_i^T \left( \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial x_j} + \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_j} \right) \phi_i, \quad (8)$$

对 SIMP 模型系统,刚度矩阵和质量矩阵分别为:

$$\mathbf{K} = \sum_{j=1}^N (E^{\min} + x_j^p \Delta E) \mathbf{K}_j, \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = \sum_{j=1}^N (E^{\min} + x_j^p \Delta E) \mathbf{M}_j, \quad (10)$$

对于 RAMP 模型系统,刚度矩阵和质量矩阵分别为:

$$\mathbf{K} = \sum_{j=1}^N \left( E^{\min} + \frac{x_j}{1+q(1-x_j)} \Delta E \right) \mathbf{K}_j, \quad (11)$$

$$\mathbf{M} = \sum_{j=1}^N \left( E^{\min} + \frac{x_j}{1+q(1-x_j)} \Delta E \right) \mathbf{M}_j, \quad (12)$$

其中,  $\Delta E = E^0 - E^{\min}$ ,  $E^0$  和  $E^{\min}$  分别为固体和空洞部分材料的弹性模量;  $\mathbf{K}_j$  为第  $j$  个单元刚度矩阵除以其弹性模量得到的单位刚度矩阵;  $\mathbf{M}_j$  为第  $j$  个单元质量矩阵除以其弹性模量得到的单位质量矩阵。

针对空间相机主支撑结构设计的不同阶段,可以引进拓扑优化、形状优化和尺寸优化。拓扑优化可以在给定的设计空间内找出最佳的材料分布,它可以为设计人员提供全新的设计和最优的材料分布方案。形状优化可用于在给定的结构上确定最优的加强筋的分布,它不删除材料,而是根据有限元节点的波动来生成加强筋,从而达到提高刚度和结构固有频率的目的。在形状优化中,可对结构的集合边界进行修改,来求解优化问题。尺寸优化通过改变壳的厚度、梁的截面积,从而改变结构的性能,达到结构优化的目的。

### 3 卡塞格林光学系统主支撑结构优化设计

卡塞格林光学系统是一种同轴光学系统,所以其主支撑结构相对简单,其主镜组件、次镜组件呈轴对称性。由于结构具有轴对称性,温度变化时引起的热变形也具有轴对称性,不会使主镜、次镜造成倾斜,对其结构设计主要考察的是基频。合理的结构是既保证主支撑结构有较高的刚度,

提高一阶固有频率,避免与外界激励发生耦合共振,又有较轻的重量,降低发射成本。

图 1 为卡塞格林光学系统简化的有限元模型,由于其一阶固有频率通常发生在次镜上,因此为简化优化设计,只取部分结构。

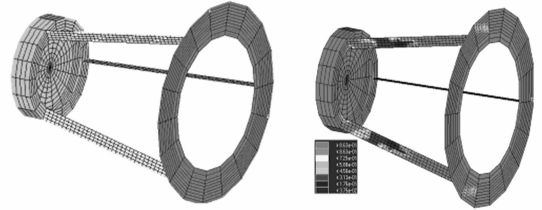


图 1 卡塞格林光学系统主支撑结构的优化

Fig. 1 Optimization of main supporting structure in Cassegrain

首先进行模态分析,其方式与传统的结构动态特性分析相同。相机固有频率,尤其是前几阶的固有频率越大,表明相机结构的动态刚度越高。在相机结构设计时,通过模态分析,找出薄弱环节,改进相机的结构,提高相机的固有频率,使低阶固有频率的振型尽量避免发生在主镜、次镜组件的相互摆动及镜头的相对位移上。即使发生这种情形,也应使相应固有频率远大于卫星平台的固有频率及外界干扰频率。通过有限元分析,所得主支撑结构一阶固有频率为 41 Hz,振型描述为次镜垂直沿光轴方向平动。对于空间光学仪器来说,不能满足设计要求,须进行可行性设计,然后再进行优化设计。

为提高相机一阶固有频率,对相机主支撑结构进行优化设计,具体步骤如下:

第一步:定义可设计区。由于主镜、次镜的安装位置相对固定,可设计区只能选择在中间的梁结构支撑部位。试验和模态分析也表明,梁结构是一阶模态发生的最敏感部位,将其设为可设计区容易得到更加合理的优化结果。

第二步:定义响应。为取得较高的一阶固有频率,同时又有较轻的重量,因此分别将体积和固有频率作为响应函数。

第三步:定义约束。取体积的 30% 作为上限,作为等效约束,使得材料的分布满足设计要求,但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。

第四步:定义目标函数。优化设计的最终目

标是提高系统的一阶固有频率,所以将其作为最终的优化目标。

此结构的优化经过 8 次迭代后收敛,并经不断改变优化的约束数值,最终得到满足设计要求的结果,分别见图 1 和表 1。由图 1 可知,网格密度较低的部位对动态刚度的贡献不大,可以减少其材料的使用,网格密度较高的部位对动态刚度的贡献最大,必须加强。分析结果同时给出了这两个部位壳单元的厚度,可以作为优化设计的基本依据。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。分析结果表明,优化后的结构刚度有了明显的提高。

表 1 卡塞格林光学系统主支撑结构的优化结果

Tab. 1 Optimized results of main supporting structure in Cassegrain

	一阶频率 (Hz)	体积等效 约束(%)	壳单元厚度(mm)
优化前	41	100	统一 26
优化后	71	86	减薄区 15 加厚区 32
验证	72	85	减薄区 15 加厚区 32

## 4 TMA 光学系统主支撑结构优化设计

TMA 离轴光学系统<sup>[9-10]</sup>是为了满足大视场而发展起来的新型的、较为先进的光学系统,它可以同时达到较高的分辨率、宽幅成像和遥感器体积重量轻小等重要技术指标。采用离轴系统可以避免各反射镜之间相互遮拦,其光学元件,如主反射镜通常采用长条反射镜。对于离轴安装的各反射镜,不但对反射镜本身的面型精度有严格的要求,而且对每一块光学反射镜的位置度误差也有严格的限制,即位置度公差要求严格<sup>[11-12]</sup>。如 TMA 光学系统中的主镜绕镜长方向倾角  $\alpha$ ,则经过 3 次反射后,其倾角将被逐级放大,造成像束偏离焦平面上的 CCD 通光窗口,最终将导致系统不能正常成像。所以对于离轴安装的反射镜,除了要求具有与同轴安装的反射镜具有相同的面形精度以外,其位置度公差要求更加严格。对于离轴 TMA 光学系统,除了要对一阶固有频率进行优化设计外,还有必要对热环境下的热变形进行优化。为更加体现概念设计,本文只对主支撑结构进行概念性的结构设计,其余的设计采用其他结

构优化设计方法来实现,即由结构的拓扑优化设计找到合理的结构路线,再进行具体的结构设计。这样可以大大地缩短设计周期,提高工作效率。概念设计后主支撑结构的有限元模型见图 2。

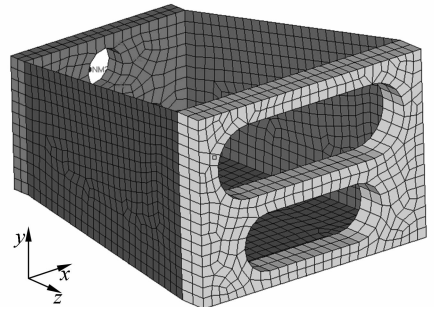


图 2 TMA 光学系统主支撑结构概念性设计

Fig. 2 Conception design for main supporting structure of TMA

通过有限元工程分析可知,主支撑结构的一阶固有频率为 98 Hz,已经满足设计要求,而第三镜组件的安装部位在 10℃ 温升环境下的热变形倾斜量明显超差,见表 2。

表 2 TMA 光学系统主支撑结构热变形的优化结果

Tab. 2 Optimized results of thermal displacement in main supporting structure of TMA

	倾斜量 (")	体积等效 约束(%)	壳单元厚度(mm)
优化前	23	100	统一 5
优化后	7.3	95	减薄区 3 加厚区 6
验证	7.9	接近 100	减薄区 3 加厚区 6

此时造成的第三镜的倾斜量为:

$$\frac{0.0185 - 0.006}{108} \times 57.32 \times 3600 = 23''$$

优化前 TMA 光学系统主支撑结构在 10℃ 温升环境下的热变形将造成第三镜发生 23'' 的倾斜,对于精度较高的光学系统来说已严重超差。

对于这种结构的优化主要在两个方面:首先用体积作为目标函数,进行结构的拓扑优化,目的是在不降低动态刚度的情况下,寻找材料的合理分布,使其体积最小,达到较轻的要求;其次是以横梁两点的光轴方向热变形为约束函数,使得其最大变形不超过 0.01 mm,这样才能保证其倾斜量  $< 10''$ 。具体的优化结果见表 2、3 和图 3。其中,拓扑优化以中间部位为可设计区,热变形优化取前框架为可设计区。

表 3 TMA 光学系统主支撑结构模式的优化结果

Tab. 3 Optimized results of main supporting structure mode of TMA

	基频 (Hz)	体积等效 约束(%)	壳单元厚度(mm)
优化前	98	100	统一 8
优化后	98	65	减薄区 3 或删除 加厚区 12
验证	93	68	减薄区 3 或删除 加厚区 12

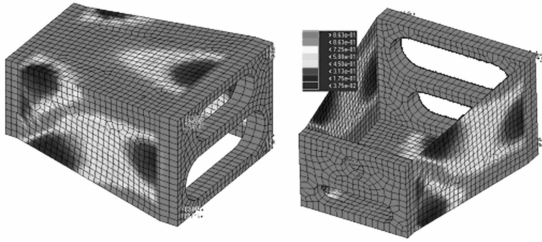


图 3 拓扑优化后的主支撑结构网格密度分布

Fig. 3 Mesh density distribution of main supporting structure after topologic optimization

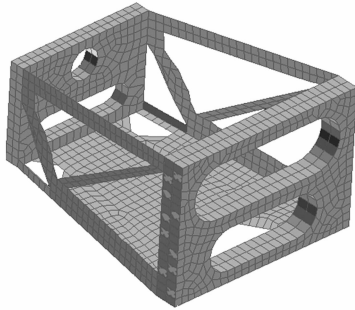


图 4 结构优化后最终的有限元模型图

Fig. 4 Final FEM after topologic optimization

通过对结构拓扑优化后最终的有限元模型(如图 4)验证,系统的基频和热变形都满足了设计要求,而且重量比优化前降低了 35%。

## 5 结 论

本文详细阐述了连续体拓扑优化的方法原理,并结合工程实际,以卡塞格林光学系统和 TMA 光学系统为例,对空间光学仪器的主支撑结构拓扑优化设计方法进行了研究。卡塞格林光学系统主支撑结构经拓扑优化后一阶固有频率从 41 Hz 提高到 72 Hz,且结构质量降低了 15%;离轴 TMA 光学系统主支撑结构经拓扑优化一阶固有频率不降低,重量降低了 35%,优化设计后结构系统满足动态刚度要求和热变形要求。优化结果表明,将拓扑优化设计应用于空间相机主支撑结构设计不仅缩短了设计周期,有效地降低了重量,而且提高了主支撑结构的性能,满足了系统的设计要求。

## 参考文献:

- [1] 王延风,卢铨,宋文荣,等. 空间相机的结构动力学分析[J]. 光学 精密工程,2003,11(4):50-55.  
WAND Y F, LU E, SONG W R, *et al.*. Structure dynamic analysis of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4): 50-55. (in Chinese)
- [2] 牛海燕,张学军.  $\Phi 124$  mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(4):539-544.  
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of  $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [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.  
LUO ZH, CHEN L P, HUANG Y Y, *et al.*. Topological optimization design for continuum structures [J]. *Advances in mechanics*, 2004, 11(4):463-476. (in Chinese)
- [4] 朱灯林,陈俊伟,俞洁,等. 结构拓扑优化设计的研究现状及其应用[J]. 机械制造及其自动化,2005,34(6):7-11.  
ZHU D L, CHEN J W, YU J, *et al.*. Developments of structure topology design and it's application in structure design [J]. *Machine Building & Automation*, 2005,34(6):7-11. (in Chinese)
- [5] 潘晋,陈昌亚,王德禹. 卫星结构的拓扑优化与灵敏度分析[J]. 宇航学报,2004,11(6):673-676.

- PAN J, CHEN CH Y, WANG D Y. Topology optimization design and sensitivity analysis of satellite structure [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 11(6):673-676. (in Chinese)
- [6] ZHOU M, ROZVANY GIN. The COC algorithm. Part II: Topological geometry and generalized shape optimization[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991,89: 197-224.
- [7] RIETZ A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP(power law) method[J]. *Structural and Multidiscipline optimization*, 2001, 21:159-163.
- [8] STOLPE M, SVANBERG K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization [J]. *Structural and Multidiscipline optimization*, 2001, 22:116-124.
- [9] PAUL M. Compact three-mirror anastigmat with reflective lens[J]. *SPIE*, 1998, 3482: 282-293.
- [10] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[J]. *光学精密工程*, 2004,12(1):113-117.  
ZHENG L G, ZHANG X J, ZHANG F. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 113-117. (in Chinese)
- [11] 张舸,赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. *光学精密工程*, 2006,14(1):48-53.  
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [12] 张剑寒,张宇民,韩杰才,等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. *光学精密工程*, 2006,14(2):179-184.  
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 179-184. (in Chinese)

作者简介:关英俊(1978—),男,吉林永吉人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士,从事空间光学仪器 CAD/CAE 方面的研究。E-mail:gyj5460@sohu.com