

## 空间遥感器 $\Phi 2\text{ m}$ 量级大口径 SiC 反射镜镜坯结构设计

王克军<sup>1,2</sup>, 董吉洪<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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 空间遥感器的大口径反射镜的设计目标是高比刚度。为限制发射成本, 尽可能降低镜体质量; 为保证反射镜的功能需求, 尽可能提高镜体自身的刚度, 随着反射镜口径的增大, 反射镜的轻量化设计更加重要。针对某  $\Phi 2\text{ m}$  口径天基大口径反射镜镜体的轻量化设计, 采用了传统经验设计、拓扑优化设计和尺寸参数优化设计相结合的综合优化设计方法, 相对大口径反射镜镜体的传统轻量化设计方法, 这种综合优化设计方法可使设计结果快速收敛, 获得最优化的设计结构。采用综合优化设计方法完成镜体的优化设计后,  $\Phi 2\text{ m}$  口径天基大口径反射镜镜体的质量为 326 kg, 镜体轻量化率高达 82.5%, 单镜在光轴竖直状态, 在 1 g 重力载荷作用下, 取决于镜体刚度的评价镜体成像质量的镜面面形精度 RMS 值的变化量优于 4.9 nm, 单镜在光轴水平状态, 在 1 g 重力载荷作用下, 镜面面形精度 RMS 值的变化量优于 4.3 nm。结果表明, 镜体质量优于设计要求的 340 kg; 镜面面形精度 RMS 值变化量优于设计要求的 5 nm, 满足了镜体要求的高比刚度要求。

**关键词:** 拓扑优化; 大口径反射镜设计; CAE; 尺寸参数优化

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0718005

## Structural design of $\Phi 2\text{ m}$ -level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor

Wang Kejun<sup>1,2</sup>, Dong Jihong<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The design goal of the large-diameter reflector used in the space remote sensor is high specific stiffness. In order to limit the launch costs, reduce the mass of reflector as far as possible and ensure the function requirements of the reflector, improve the structure stiffness of the reflector itself as much as possible, the reflector lightweight design is more important along with the rise of the reflector aperture. In this paper, aimed at the lightweight design of some  $\Phi 2\text{ m}$ -level space-based large-diameter reflector, the integrated optimization design method, which was a combining method with the traditional experience design, the topology optimization design and the size parameter optimization design, was applied. Compared with traditional optimization design method of the large-diameter reflector, it can make the design result fast converge, getting the optimal design structure. The mass of the  $\Phi 2\text{ m}$  reflector designed

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(41175208)

作者简介: 王克军(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间遥感器光机结构设计方面的研究。Email:wangkejun1@163.com

with the integrated optimization design method was 326 kg, the lightweight rate of the  $\Phi 2$  m reflector was as high as 82.5%, the shape error variation RMS of the reflector which characterized the image quality of reflector and depended on the reflector stiffness was 4.9 nm when the reflector optical axis was vertical and the gravity load of 1 g was applied, and 4.3 nm when the reflector optical axis was horizontal and the gravity load of 1 g was applied. The results show that the mass of the reflector is smaller than the design requirement of 340 kg, and that the shape error variation RMS is better than the design requirement of 5 nm, satisfying the requirement of the high specific stiffness of the reflector.

**Key words:** topology optimization; design of large-diameter reflector; CAE; size parameter optimization

## 0 引言

空间遥感技术领域是当今世界各个发达国家激烈竞争的几个关键领域之一。随着空间遥感器分辨率和探测灵敏度的不断提高,反射镜的口径越来越大。反射镜是空间光学遥感器的关键零部件,为限制反射镜组件的镜面面形误差通常要求反射镜具有很高的刚度,并且出于发射成本的考虑,质量受到严格限制,也就是说,反射镜的设计目标是高比刚度。反射镜的轻量化设计做的好,镜体就具备很高的比刚度,其支撑结构的设计就会更加简单,整个组件的质量低,同时具备优良的性能<sup>[1-2]</sup>。

反射镜是一个复杂的结构件,获得最优性能的反射镜镜坯结构是很困难的。传统的反射镜轻量化设计主要采用传统经验设计与有限元校核的手段。该方法是根据设计人员经验,采用传统理论和经验公式设计出反射镜的结构,再用有限元分析的手段进行校核计算,然后根据仿真分析结果,修改模型,进行反复迭代,最终设计出满足指标要求的反射镜。这种方法效率相对较低,耗费大量的人力和物力,并且设计结果很难收敛到最优解,得到的设计结果可能只是满足设计指标的局部最优解。针对传统设计方法的缺陷,文中在反射镜轻量化设计时采用了传统经验设计、拓扑优化设计和尺寸参数优化设计相结合的综合优化设计方法。这种方法设计效率高、结果收敛速度快。可以很快获得最优性能的结构。

文中在针对某天基大口径反射镜镜坯的轻量化设计的过程中采用了该综合优化设计方法,获得了高比刚度的镜体结构,效果显著。

## 1 设计指标

该论文所研究的大口径反射镜的有效通光口径为  $\Phi 2\ 000$  mm, 顶点曲率半径为 10 524.63 mm, 反射镜面形为非球面。该大口径反射镜的支撑方案采用了周边支撑和背部支撑共同作用的复合支撑结构形式。反射镜组件的结构组成见图 1。包括:反射镜、周边支撑、背部支撑和镜室。背部支撑是三组 whiffletree 结构,周边支撑是切向拉杆+A 型框的结构<sup>[3]</sup>。

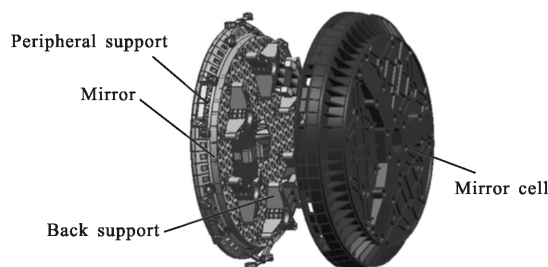


图 1 反射镜组件复合支撑方案

Fig.1 Compound support scheme of reflector component

经过对整个反射镜组件的指标分解和分配,确定镜体的设计输入指标:在光轴水平( $0^\circ$ )状态在 1g 重力载荷作用下的镜面面形精度 RMS 值变化量要优于 5 nm, 在光轴竖直( $90^\circ$ )状态在 1g 重力载荷作用下的镜面面形精度 RMS 值变化量要优于 5 nm, 同时镜体质量不得高于 400 kg。镜体的基本结构尺寸见图 2。

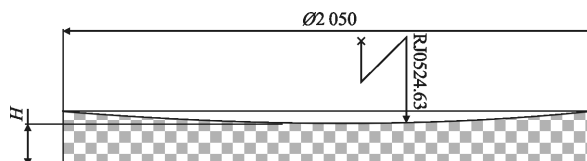


图 2 反射镜基本结构尺寸

Fig.2 Structure size of reflector

## 2 设计方法

相对目前采用的反射镜镜体设计方法来说,综合优化设计方法效率高,可迅速找到全局最优解,获得高比刚度镜体。

### 2.1 传统设计方法

目前采用的反射镜镜体设计方法-传统设计方法的设计流程见图 3。

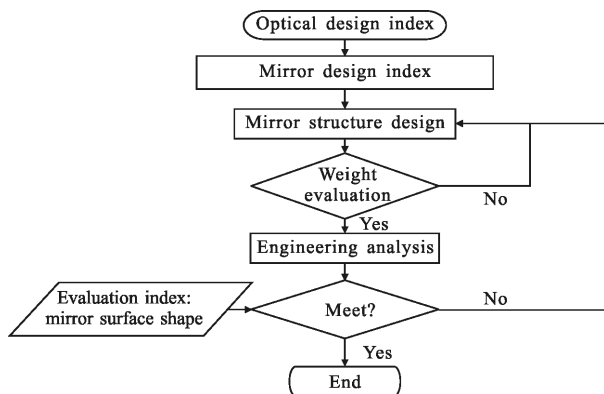


图 3 反射镜传统设计方法设计流程

Fig.3 Design process of the traditional design method of reflector

传统设计方法的弊端是大量的迭代设计是由人力完成的,耗费大量的人力和物力,周期长,很难得到最优解。

### 2.2 综合优化设计方法

反射镜镜体综合优化设计方法的设计流程见图 4。

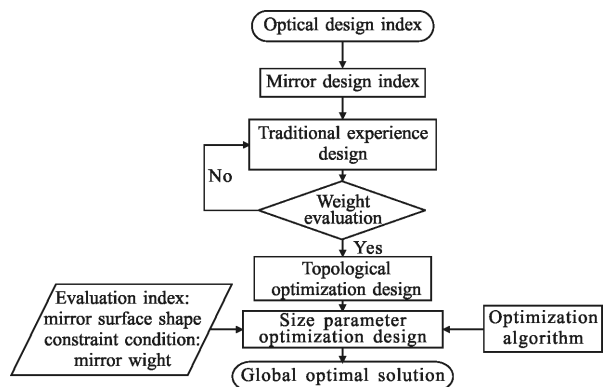


图 4 反射镜综合优化设计方法设计流程

Fig.4 Design process of the comprehensive optimization design method of reflector

综合优化设计方法的优势在于将大量的迭代工作交给计算机来完成,采用先进的优化算法在短期

内求解到结构的最优解。获得最优性能设计结构的同时大大缩短设计周期。

## 3 反射镜镜坯结构设计

文中研究的  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  大口径 SiC 反射镜面形精度要求高,并且质量受到严格限制,需要具备很高的比刚度。采用综合优化设计方法来完成镜坯的优化设计。

### 3.1 传统经验设计

传统经验设计就是目前反射镜结构设计广泛采用的设计方法,依据设计人员经验、传统力学公式来完成镜体的初始结构设计<sup>[4]</sup>。

镜坯的传统经验设计是从径厚比、支撑点个数、支撑点位置、轻量化结构形式、镜体背面轮廓形式等方面来开展。设计过程中充分考虑镜体的制备、加工和装调的工艺性。

#### 3.1.1 径厚比

Roberts 等人对圆饼形反射镜的径厚比进行了研究,即  $dr(D/t)$  与自重变形的关系,并给出经验公式:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16E t^2} = \frac{3\rho g d r^2 D^2}{256E}$$

式中:  $\delta$  为最大自重变形,  $\mu\text{m}$ ;  $\rho$  为材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $a$  为圆盘半径  $=D/2$ ,  $\text{m}$ ;  $E$  为材料弹性模量,  $\text{GPa}$ ;  $t$  为圆盘厚度,  $\text{m}$ 。

上述公式定性的给出了反射镜镜体在重力载荷下的面形变化相对于镜体参数的变化趋势。实际工程设计中,不同材料的轻量化反射镜,都有相应的参考径厚比,例如, SiC 材料的轻量化反射镜径厚比为 7~12。考虑该方案的质量限制,初步选定反射镜的中心厚度为 160 mm,径厚比 12.8。

#### 3.1.2 支撑点个数

对于背部支撑, Hall 研究了圆盘形反射镜重力变形与最少支撑点数量的关系,给出经验公式:

$$N = 0.001\ 175 \left( \frac{D_G^2}{t_A} \right) \left( \frac{\rho_G}{E_G \delta} \right)^{0.5}$$

式中:  $N$  为最少支撑点数目;  $\delta$  为镜面允许的 PV 值,  $\mu\text{m}$ ;  $\rho_G$  为材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D_G$  为反射镜直径,  $\text{m}$ ;  $E_G$  为材料弹性模量,  $\text{GPa}$ ;  $t_A$  为反射镜厚度,  $\text{m}$ 。

采用 Hall 给出的经验公式初步计算背部支撑点的个数要大于 12 个,鉴于 2 m 口径反射镜的高面形精度要求,并考虑反射镜支撑点位置的对称性,初步

选择 18 点支撑,双环布置,内环 6 个,外环 12 个,沿圆周均布。

对于周边支撑,目前其支撑点数目没有成熟的经验公式可供参考,支撑点的数目通过有限元分析的手段来确定,以满足反射镜光轴呈水平状态放置时的面形指标为标准。圆周对称的镜体利于反射镜镜坯的制作、加工和装调,基于该原则,周边支撑的结构布局采用轴对阵分布。基于上述原则与手段,最终确定采用 12 点支撑。

### 3.1.3 镜体背部轮廓形式

通过改变反射镜背部的轮廓形式可以对反射镜进行有效的减重,反射镜背部常见的轮廓形式主要包括:同心圆弯月面、弯月面、单拱面、双拱面和锥形后表面轮廓形式。这些形式各有优缺点,根据不同的设计目标选择合适的背部轮廓形式。

锥形后表面结构轻量化程度比较高,重心在反射镜内部,对温度变化不敏感,锥形后表面的背部可以作为加工基准,适于存放,结合反射镜拟采用的复合支撑形式,反射镜镜体选择锥形后表面的结构形式。

### 3.1.4 轻量化结构形式

反射镜的轻量化结构形式有传统轻量化结构、背部开放式结构和背部封闭式结构。从刚度角度讲,背部封闭式结构>背部开放式结构>传统轻量化结构。

反射镜的轻量化孔形式有三角形轻量化孔形式、扇形轻量化孔形式、六边形轻量化孔形式、圆形轻量化孔形式。研究表明,三角形轻量化孔在刚度和轻量化率上都有优势。

为避免反射镜在加工过程中出现“网格效应”,轻量化孔不能太大,经验公式如下:

$$D/H=10\sim 15$$

式中: $D$ 为轻量化孔内切圆直径,mm; $H$ 为反射镜面板厚度,mm。

从限制反射镜重量和镜坯的制作工艺两个方面考虑,镜坯的面板厚度取 5 mm,为防止“网格效应”,参照经验公式(内切圆直径/面板厚=10~15),结合背部轻量化筋的布局合理性,确定三角形轻量化孔的内切圆直径为  $\Phi 65$  mm。

### 3.1.5 支撑点位置

对于背部支撑点初始位置的确定,包括 3 点支撑初始位置和多点支撑初始位置的确定。对直径为  $D_G$  的圆形反射镜来说,3 点支撑的支撑点所在圆推

荐半径是  $0.3225 D_G$ ;9 点和 18 点支撑(分别如图 5(a)和 5(b)所示)的支撑点所在圆推荐支撑点位置由推荐公式计算。

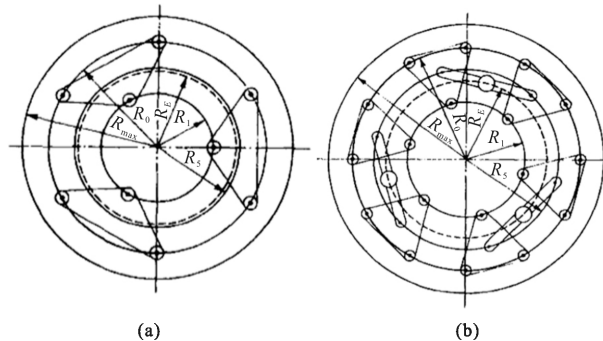


图 5 反射镜多点支撑位置布局

Fig.5 Reflector multi-point support location layout

背部支撑的本质就是每点支撑相同的质量,并且每点支撑在其所承担质量的质心位置上。根据 Hindle 经验公式粗略计算并微调,确定内部 6 个支撑点的分布圆直径为  $\Phi 800$  mm;外部 12 个支撑点的分布圆直径为  $\Phi 1665$  mm。

周边支撑 12 个支撑点沿圆周均布,这样,可获得周边支撑性能的圆周对称性,周边支撑点的位置在光轴方向过反射镜镜体的质心所在平面,沿圆周方向均布,可避免引入倾覆力矩。

依据上述 5 个方面的设计,充分考虑镜坯的制备工艺性、反射镜组件的装调工艺性以及反射镜组件的加工检测状态,完成镜坯的初始设计,详见图 6。

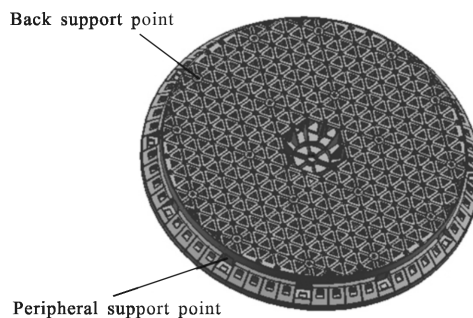


图 6 反射镜传统经验设计三维模型

Fig.6 3D model with traditional empirical design of reflector

结合周边支撑采用的支撑形式分析,实际起支撑作用的只有两侧的 8 个点,位于上、下端的 4 个点由于切向拉杆水平,切向拉杆在重力载荷方向刚度很弱,在实际的支撑中起的支撑作用很小,所以在光轴水平工况,镜坯有限元仿真的约束点是两侧的 8 个

点,在光轴竖直工况,镜坯有限元仿真的约束点是背部的 18 个点。

针对传统经验设计的设计结果,进行了仿真分析<sup>[5]</sup>,边界条件见图 7,变形云图见图 8,详细指标见表 1,镜体质量是 343 kg,光轴水平状态的面形是 4.0 nm,远优于设计要求的 5 nm;光轴竖直状态的面形值是 6.3 nm,远高于设计要求的 5 nm。

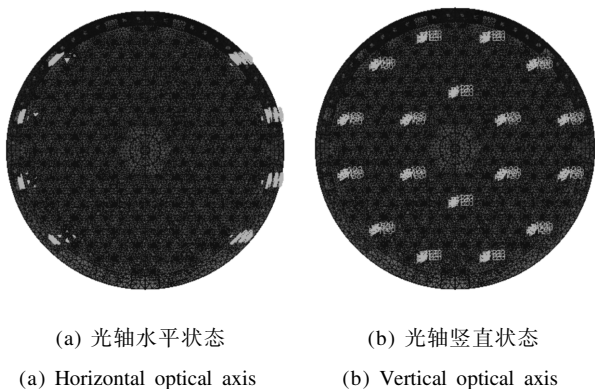
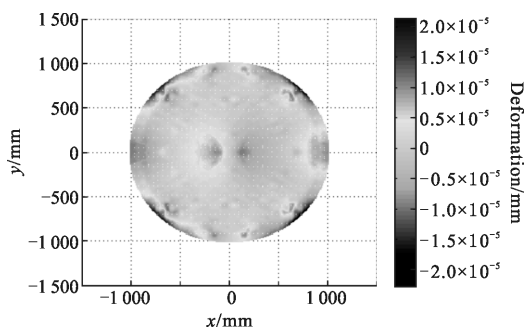


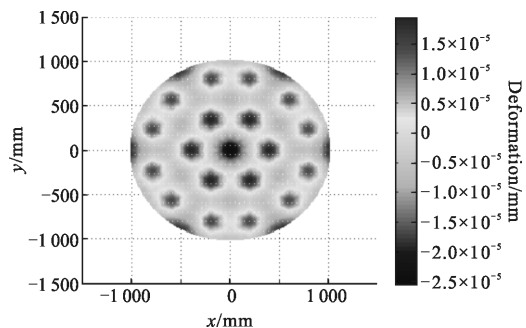
图 7 边界约束条件

Fig.7 Boundary constraints



(a) 光轴水平状态

(a) Horizontal optical axis



(b) 光轴竖直状态

(b) Vertical optical axis

图 8 传统经验设计后重力载荷下的面形变化云图

Fig.8 Cloud picture of reflector under gravity load after traditional empirical design

表 1 传统经验设计结果

Tab.1 Design result with traditional empirical design

Working condition	RMS/nm	M/kg
Horizontal optical axis	4.0	343
Vertical optical axis	6.3	343

### 3.2 拓扑优化设计

拓扑优化又称为结构布局优化,它是一种根据约束、载荷及优化目标寻求结构材料最佳分配的优化方法<sup>[6-8]</sup>。拓扑优化通过去除材料的手段确定结构的整体几何外形,是一种确定设计区域材料最优分布的有效手段。

针对采用初始经验设计完成的镜坯,开展拓扑优化设计。在文中采用的综合优化设计方法中,拓扑优化设计是以去除材料的手段,进一步确定镜体材料的布局。

从初始设计阶段的结果来看,光轴水平状态的面形精度很高,这与镜体结构形式有很大关系,“圆饼形”反射镜的径向刚度远大于轴向刚度,对轻量化的微量变化也不是很敏感,因此,对单镜体的拓扑优化设计和尺寸参数优化设计针对光轴竖直施加重力载荷的状态来开展即可。

以镜面柔度最小为优化目标函数,以镜体的去除体积比为约束条件,给镜体施加工作状态的载荷(光轴竖直状态施加重力载荷)和边界位移条件,迭代优化获得镜体的最优质量分布形式。

定义拓扑优化区域:定义镜坯背部的轻量化筋结构为可设计区域,镜面面板、背板和镜体的周边立筋为非拓扑优化区域;

设置优化参数:定义镜面的柔顺度和镜面的体积分数为响应参数。定义镜面柔顺度最小为目标函数,定义拓扑优化后体积分数的 30% 为约束条件。图 9 拓扑优化目标函数和 RMS 值随迭代过程体积分数的变化曲线图。从图中可以看出,镜面柔顺度在镜体剩余材料体积分数为 60% 时最小,镜面 RMS 值在体积分数为 80% 时最小,镜面 RMS 值为 6.78 nm。研究发现镜面柔顺度的最小值和镜面 RMS 最小值并不完全等价,参照镜面 RMS 变化曲线更有意义,该论文中对镜坯的拓扑优化的

目标函数采用的是镜面柔顺度最小，同时计算了镜面的面形变化 RMS 值，取 RMS 值最小值对应的材料分布为最终优化结果。镜面 RMS 值最小时，反射镜的体积分数为 80%，该状态为拓扑优化结果的最佳状态，面形最佳，即材料分布状态最佳，图 10 是镜体体积分数在 80% 时的材料分布状态（去掉背板），黑色为优化设计建议保留的材料，灰色为优化设计建议去除的材料。

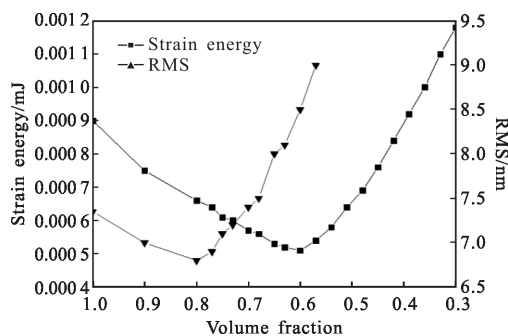


图 9 目标函数和镜面 RMS 值在迭代过程中的变化曲线

Fig.9 Objective function and RMS value curve in the iterative process

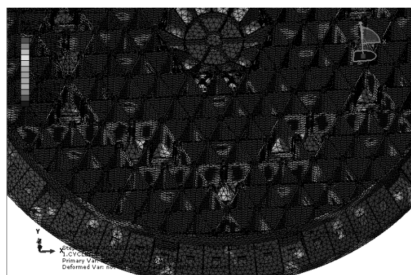


图 10 镜面 RMS 值最小时镜体材料分布状态

Fig.10 Reflector material distribution when RMS is the smallest

根据拓扑优化后重力载荷作用下面形 RMS 值最小时的最佳材料分布形式修改反射镜的几何模型见图 11(去掉背板),图 11 中的黑色标记为拓扑优化后去掉的筋。

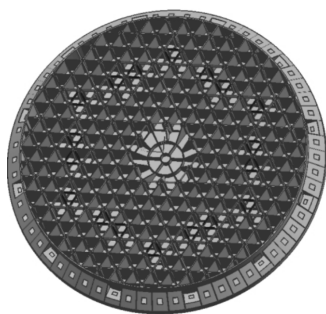


图 11 拓扑优化后的反射镜三维模型

Fig.11 3D model of reflector after topology optimization

针对拓扑优化设计的设计结果，进行了仿真分析，边界约束条件同传统经验设计时的边界约束条件一致，见图 7，镜面的变形云图见图 12，拓扑优化后的有限元分析结果详见表 2。

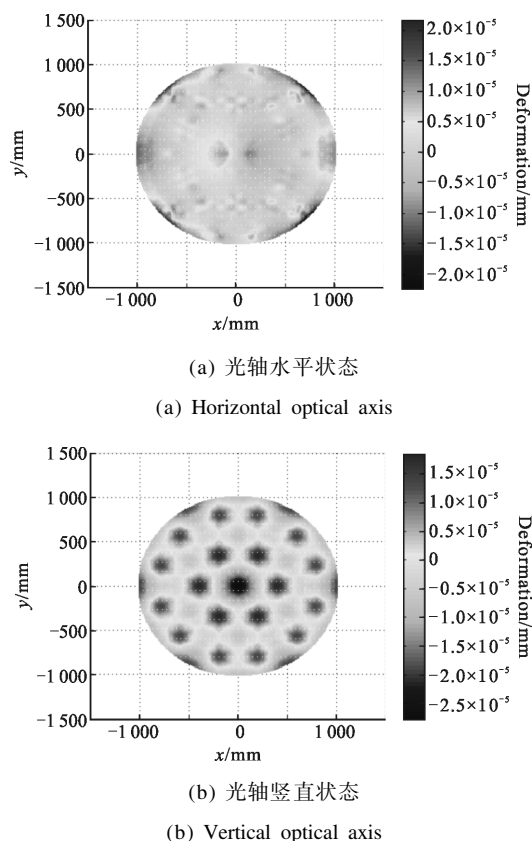


图 12 拓扑优化后重力载荷下的面形变化云图

Fig.12 Cloud picture of reflector under gravity load after topology optimization design

表 2 拓扑优化设计结果

Tab.2 Design result with topology optimization

Working condition	RMS/nm	M/kg
Horizontal optical axis	4.2	301
Vertical optical axis	6.0	301

拓扑优化完成后，光轴水平工况在重力载荷下的面形由 4.0 nm 变为 4.2 nm，光轴竖直工况的重力载荷下的面形由 6.3 nm 变为 6.0 nm，质量由原来的 343 kg 变为 301 kg。水平工况面形略微变差，但仍然远优于设计目标；光轴竖直工况的面形略微变好，但仍然高于设计目标，需要开展进一步的尺寸参数优化设计。

拓扑优化在面形提高方面没能起到明显的效

果,但有效地去除了对镜面刚度贡献小或者无贡献的材料,减重 42 kg,获得了面形最优时的材料最佳分布状态。

### 3.3 尺寸参数优化设计

文中尺寸参数优化是通过增减材料的手段确定镜体局部细节结构的尺寸大小。在镜体完成传统经验设计和拓扑优化设计之后,对反射镜实施尺寸参数优化<sup>[9-11]</sup>。采用 Isight 集成仿真优化平台集成有限元分析软件 and 数据处理软件<sup>[12-15]</sup>,以反射镜在光轴竖直状态重力载荷下的镜面面形值 RMS 值最小为优化设计目标,以镜体质量为约束条件,采用最优拉丁超立方优化算法,对镜体的面板厚度、轻量化筋厚度、背板厚度等参数进行迭代优化,使镜体材料分布最优以寻求镜体的最高刚度,搭建的集成仿真平台见图 13。

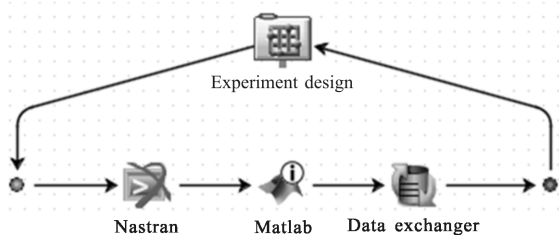


图 13 Isight 搭建的集成优化平台

Fig.13 Integrated optimization platform with Isight software

将对镜面面形精度影响较大的镜体参数定义为优化设计变量,如表 3 中所列,其在镜体上的分布位置见图 14,图 15 为参数优化过程的历程变化曲线,可变参数的初始值及最优值见表 3。考虑到镜体的筋结构的尺寸合理性和加工合理性,在采用试验设计的优化过程中,对参变量的取值进行了规定,取优化值为 1 和 0.5 结尾的数值,将其他的小数过滤掉。

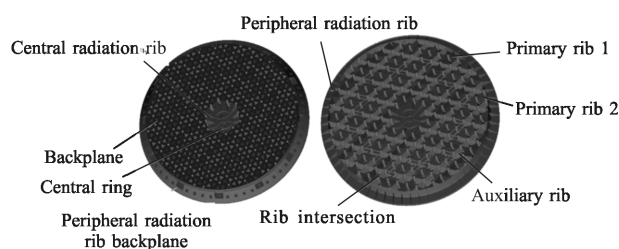
表 3 反射镜可变参量初值及优化结果

Tab.3 Initial value and optimization result of reflector parameter variables

Number	Variables	Initial /mm	Minimum /mm	Maximum /mm	Optimum /mm
1	Primary rib 1	6	5	8	7
2	Primary rib 2	6	5	8	6
3	Auxiliary rib	4	3	5	4
4	Peripheral radiation rib	4	3.5	5	4
5	Peripheral radiation rib backplane	5	3.5	5	3.5
6	Backplane	4	4	6	6
7	Rib intersection	5	4	8	6
8	Central ring	4	3	5	3.5
9	Central radiation rib	4	3	5	3.5

置见图 14,图 15 为参数优化过程的历程变化曲线,可变参数的初始值及最优值见表 3。考虑到镜体的筋结构的尺寸合理性和加工合理性,在采用试验设计的优化过程中,对参变量的取值进行了规定,取优化值为 1 和 0.5 结尾的数值,将其他的小数过滤掉。

镜体的有限元模型采用壳单元建立,研究发现,壳单元的仿真分析结果与实体单元的仿真分析结果有一定的偏差,但是具有相同的变化趋势。对镜体的尺寸参数优化采用壳单元更加方便,计算效率也高。



(a) 带背部封闭板 (b) 去掉背部封闭板  
(a) With closed back plate (b) Without closed back plate

图 14 反射镜的各个可变参数的位置分布

Fig.14 Location layout of parameter variables of reflector

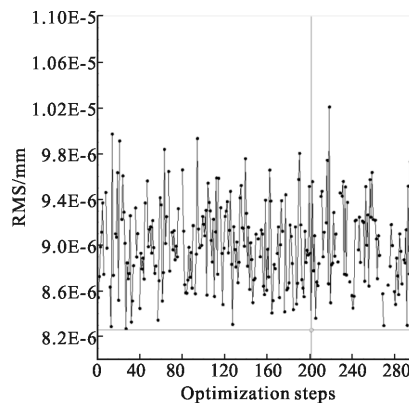


图 15 参数优化历程曲线

Fig.15 Process curve of parameter optimization

以尺寸参数优化获得面形最优时的各可变参量的最优值对反射镜镜坯模型进行更改。用实体单元建立有限元模型按照同传统经验设计和拓扑优化设计相同的约束形式进行约束,计算光轴水平状态和竖直状态的面形值。尺寸参数优化后的光轴水平状态的镜面面形云图见图 16,光轴竖直状态的镜面面形云图见图 17,详细计算结果见表 4。

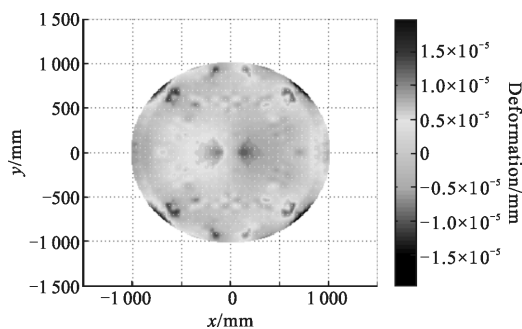


图 16 尺寸参数优化后光轴水平状态重力载荷下的面形变化云图

Fig.16 Cloud picture of reflector under gravity load after size parameter optimization when the optical axial is horizontal

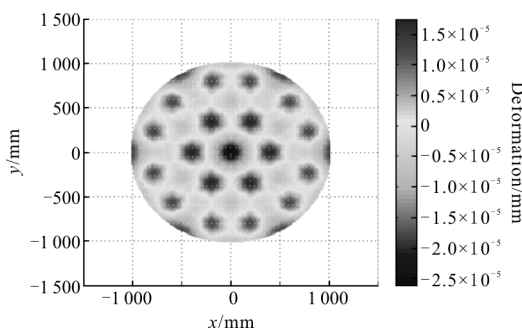


图 17 尺寸参数优化后光轴垂直状态重力载荷下的面形变化云图

Fig.17 Cloud picture of reflector under gravity load after size parameter optimization when the optical axial is vertical

表 4 尺寸参数优化设计结果

Tab.4 Design result with size parameter optimization

Working condition	RMS/nm	M/kg
Horizontal optical axis	4.3	326
Vertical optical axis	4.9	326

尺寸参数优化后镜体的质量增加了 25 kg,但是光轴垂直状态的面形值降到了 4.9 nm,光轴水平状态的面形值略微变差,其值为 4.3 nm,面形精度指标和质量指标均满足指标要求。

采用传统经验设计、拓扑优化设计和尺寸参数优化设计相结合的综合优化设计方法完成了镜坯的设计,设计过程收敛快,结果最优,该方法的优点得到明显的体现。

## 4 结论

文中针对某空间遥感器  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  大口径 SiC

反射镜的高比刚度要求,采用传统经验设计、拓扑优化设计和尺寸参数优化设计相结合的综合优化设计方法对镜坯开展详细设计。采用该综合优化设计方法设计完成的天基  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  口径的碳化硅反射镜的镜体质量是 326 kg,轻量化率达到 82.5%,镜体在光轴垂直状态,在 1 g 重力载荷作用下的镜面面形精度 RMS 变化量仅为 4.9 nm,镜体在光轴水平状态,在 1 g 重力载荷作用下的镜面面形精度 RMS 变化量仅为 4.3 nm,获得了高比刚度的镜体。

## 参考文献:

[1] Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1039-1047. (in Chinese)  
李志来, 徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.

[2] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 42(2): 535-540. (in Chinese)  
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 42(2): 535-540.

[3] Wang Kejun, Dong Jihong, Xuan Ming, et al. Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1719-1730. (in Chinese)  
王克军, 董吉洪, 宣明, 等. 空间遥感器大口径反射镜的复合支撑结构[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1719-1730.

[4] Xu Xinxing, Wang Bing, Qiao Jian, et al. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 35-41. (in Chinese)  
徐新行, 王兵, 乔健, 等. 快反系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 35-41.

[5] Wang Kejun, Dong Jihong, Li Wei, et al. Finite element analysis of overall structure of space camera [J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 81-87. (in Chinese)  
王克军, 董吉洪, 李威, 等. 空间遥感器整机有限元分析[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 81-87.

[6] Guan Yingjun, Xin Hongwei, Zhao Guijun, et al. Topologic optimization design for main supportingstructure of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1157-1163. (in Chinese)  
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, 15(8): 1157-1163.
- [7] Liu Shutian, Hu Rui, Zhou Ping, et al. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)  
刘书田, 胡瑞, 周萍, 等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1803-1810.
- [8] Sha Wei, Chen Changzheng, Zhang Xingxiang, et al. Topological lightweight design of space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 35-39. (in Chinese)  
沙巍, 陈长征, 赵星祥, 等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 35-39.
- [9] Hu Haifei, Guan Yingjun, Zhao Sihong, et al. Analysis led design and optimization for large aperture mirror[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(5): 989-994. (in Chinese)  
胡海飞, 关英俊, 赵思宏, 等. 大口径反射镜分析驱动设计与优化[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 989-994.
- [10] Yang Jiawen, Huang Qiaoling. Structure parameter optimization design of large-aperture reflector [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2011, 4(8): 77-83. (in Chinese)  
杨佳文, 黄巧玲. 大口径反射镜结构参数优化设计 [J]. 中国空间科学技术, 2011, 4(8): 77-83.
- [11] Li Yuan, Jiao Mingyin, Luo Chuanwei, et al. Optimization design of lightweight flat mirror based on Isight[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 194-197. (in Chinese)  
李元, 焦明印, 罗传伟, 等. 基于 Isight 的平面反射镜轻量化优化设计[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 194-197.
- [12] Wu Qingbin, Chen Shijin, Dong Shen, et al. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 466-471. (in Chinese)  
吴清彬, 陈时锦, 董申, 等. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(5): 466-471.
- [13] Yuan Jian, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Integrated optimization design of rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(6): 85-89. (in Chinese)  
袁健, 沙巍, 陈长征, 等. 长条形反射镜的集成优化设计 [J]. 光电工程, 2015, 42(6): 85-89.
- [14] Wu Qingbin, Chen Shijin, Dong Shen, et al. Parameter optimum design of a lightweight rectangular mirror [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(1): 76-82. (in Chinese)  
吴清彬, 陈时锦, 董申, 等. 长条形反射镜轻量化结构的参数优化设计[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 76-82.
- [15] Hu Haifei, Luo Xiao, Xin Hongwei, et al. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (4): 0422003. (in Chinese)  
胡海飞, 罗霄, 辛宏伟, 等. 超大口径光学制造均力支撑布局优化[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422003.