

引用格式:江浩,张雷.超轻量化SiC反射镜的优化设计[J].电光与控制,2017,24(7):66-69. JIANG H, ZHANG L. Optimization design of ultra-lightweight SiC mirror[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(7):66-69.

## 超轻量化 SiC 反射镜的优化设计

江浩<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 长光卫星技术有限公司, 长春 130102)

**摘要:** 针对空间光学遥感器对大口径主反射镜质量轻、面形精度高的要求,设计了一种超轻量化 SiC 反射镜。首先确定反射镜的轻量化方案,之后采用集成优化方法,在 ISight 软件平台上集成几何建模、有限元分析和面形拟合等设计流程并自动化运行。反射镜结构参数为优化变量,镜体质量和面形精度 RMS 值为目标函数。采用第二代非劣排序遗传算法(NSGA-II)对集成优化模型进行多目标、全局性的优化求解。最后结合制造工艺调整优化结果,得到反射镜的最终设计方案并仿真分析。结果表明,反射镜的质量为 11.4 kg,面密度为 37 kg/m<sup>2</sup>,光轴水平工况下面形 RMS 值为 1 nm,一阶自由模态频率为 1100 Hz。结果验证了所提出的集成优化方法的有效性。

**关键词:** 超轻量化反射镜; 集成优化设计; 多目标优化; 自动优化; 空间光学遥感器

**中图分类号:** TH703      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.07.014

## Optimization Design of Ultra-Lightweight SiC Mirror

JIANG Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,3</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;  
3. Chang Guang Satellite Technology Co., LTD, Changchun 130102, China)

**Abstract:** Considering that the large aperture primary mirror of space optical remote sensor should have light weight and high surface quality, we designed an ultra-lightweight silicon carbide mirror. Firstly, the lightweight structure of the mirror was defined. Then, based on integrated optimization method, ISight software was used for implementing such design processes as geometric modeling, finite element analysis and surface fitting, and automatic operation was realized. The structure parameters of the mirror were all optimization variables, and both the mass and the RMS surface figure error of the mirror were taken as objective functions. The multi-objective, global optimization was achieved by using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). Finally, the optimal design was modified considering cast constraints and a verification model was constructed to evaluate the optimal design. The mass of the optimal mirror is 11.4 kg and the surface density is 37 kg/m<sup>2</sup>. Under the load of gravity vertical to the optical axis, the RMS surface figure error is 1 nm, and the first natural frequency reaches 1100 Hz. The result demonstrates the availability of the proposed approach.

**Key words:** ultra-lightweight mirror; integrated optimization design; multi-objective optimization; automatic optimization; space optical remote sensor

### 0 引言

采用大口径反射镜是提高空间光学遥感器分辨率

的重要途径之一<sup>[1]</sup>。大口径反射镜质量较大:一方面反射镜重力变形严重,加工、装调和检测难度较大;另一方面相机结构的质量也会相应增加,导致发射成本急剧上升。为了提高光学系统的成像质量,同时削减发射成本,必须对反射镜进行轻量化设计。

决定轻量化水平的两个主要因素是反射镜材料和轻量化结构。反射镜常用的材料主要有玻璃、铍和 SiC 等。SiC 的比刚度高,热胀系数小,导热系数大,综合性

收稿日期:2016-06-16

修回日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金(41501383)

作者简介:江浩(1992—),男,安徽定远人,硕士生,研究方向为空间相机光机结构。

能突出,是反射镜的优选材料<sup>[2]</sup>;在轻量化结构设计方面,传统的设计方法主要采用试算和对比的手段,设计效率偏低。镜体的设计参数众多,传统方法很难同时对所有变量进行优化,容易陷入局部最优解。利用多学科集成优化方法,集成参数化建模、有限元分析和面形拟合等过程,不仅能同时优化多个参数,扩展镜体优化设计的解空间,而且能够实现自动化的优化过程。

随着SiC的材料性能、加工工艺的不断进步,大口径超轻量化SiC反射镜在国外已经进入实用阶段<sup>[3]</sup>。欧洲空间局于2013年发射的GAIA可见光波段望远镜,主镜为1.5 m×0.65 m的长条形反射镜,面密度为39 kg/m<sup>2</sup>。用于红外波段的反射镜能够达到更低的面密度。欧洲空间局研制的Herschel红外望远镜,其 $\phi 3.5$  m口径主镜的面密度仅为22 kg/m<sup>2</sup>。日本宇宙航空研究开发机构于2013年研制的一块 $\phi 800$  mm口径红外波段反射镜<sup>[4]</sup>,面密度同样达到了22 kg/m<sup>2</sup>。国内研制的超轻SiC反射镜多采用六点支撑。董斌超等人研制了 $\phi 200$  mm和 $\phi 500$  mm口径的反射镜,面密度分别达到了9.35 kg/m<sup>2</sup>和11.7 kg/m<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。张媛媛等人设计了一种剖面为船形,口径为 $\phi 510$  mm的超轻反射镜,面密度为10.8 kg/m<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。在轻量化反射镜的设计方法上,刘书田等人研究了筋板式反射镜的基结构拓扑优化方法<sup>[7]</sup>;胡海飞等人提出了反射镜概念模型的分析驱动设计方法<sup>[8]</sup>;李元等人采用ISight软件对平面反射镜的基板和加强筋厚度进行了优化<sup>[9]</sup>;袁健等人结合集成优化方法对反射镜的变筋厚度设计进行了研究<sup>[10]</sup>。

本文采用集成优化方法,在镜体各结构参数构成的解空间中,进行了多目标、全局性的自动优化设计。优化后的反射镜轻量化程度高、面形精度优良。

## 1 反射镜初始结构

本文所讨论的反射镜是某空间相机的主镜,口径为 $\phi 624$  mm,采用背部三点支撑。为了揭示反射镜各部分材料对镜体刚度的贡献,首先对实心镜体进行拓扑优化分析,图1是反射镜在光轴水平工况下的优化结果。反射镜边缘距离支撑点较远的部分受重力影响较大,镜体材料存在冗余。为了缓解重力对这个区域的影响,可以降低镜体在这一部分的厚度。

反射镜的背部形式有封闭式、半封闭式和开放式等。尽管背部开放式结构的刚度较差,但在减重效率上有很大的优势,而且加工难度更低。轻量化孔的形状有圆形、三角形、正方形、扇形和六边形等。三角形孔的刚度较高,轻量化程度适中,是应用较普遍的轻量化孔形式。本文采用三角形轻量化孔、背部开放式结构。

同时,参考实心镜体的拓扑优化结果,对反射镜背部进行切割,缓解镜体边缘部分在光轴竖直工况下的塌陷,提高面形精度。反射镜的初始结构如图2所示。

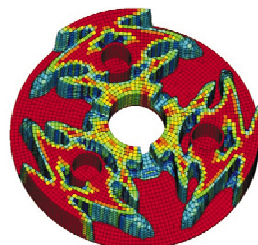


图1 实心镜体拓扑优化结果

Fig.1 Result of topology optimization on solid mirror

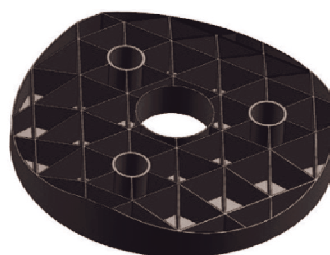


图2 反射镜轻量化结构

Fig.2 Lightweight structure of the mirror

## 2 多学科集成优化设计

### 2.1 集成优化设计方法

反射镜的优化设计问题以面形精度为核心,涉及光学、机械等多个学科,众多设计参数相互耦合,形成极为复杂的解空间。传统设计方法是结合经验公式对各个设计参数进行排列组合,经过多次迭代、试算,直到结果满足设计要求为止。该方法不仅效率低,而且将各参数的优化割裂开来,容易陷入局部最优解。

本文采用多学科集成优化设计方法,利用ISight软件集成几何建模、有限元分析和面形拟合等设计过程,并通过ISight软件控制这些设计过程的自动运行。通过设置合理的迭代流程和优化算法,能够实现自动化的全局寻优。和传统方法相比,集成优化设计方法不仅自动化程度高,而且能进行多目标、多参数的优化,突破了传统设计方法只能单目标、单变量优化的局限性。和文献[8-10]相比,本文通过编写UG二次开发程序,实现了几何模型的自动更新,使反射镜的支撑点位置和加强筋距离等参数也成为优化变量,进一步扩展了反射镜优化设计问题的解空间。

### 2.2 优化算法选择

本文的优化目的在于获得质量轻,同时面形精度好的设计方案。一方面,反射镜优化设计问题涉及的参数多,解空间十分复杂,应采用搜索性能好、运行效率高的优化算法;另一方面,镜体质量和面形精度往往

是相互冲突的,解决这类优化问题应采用多目标优化算法。

遗传算法是建立在生物进化模型上的随机搜索方法,它采用对设计参数编码的方式描述解空间,模拟生物遗传过程进行迭代,最终获取性能优异的编码,也即最优解。遗传算法具有良好的全局搜索性能,对于解空间复杂的优化问题十分适用<sup>[11]</sup>。

遗传算法种类繁多,其中第二代非劣排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)是极具代表性的一种,主要用于解决多目标优化问题。NSGA-II 算法的优点在于对目标个数无限制,解的分布均匀,允许存在多个不同的等价解,而且运行效率高,探索性能好<sup>[11]</sup>。因此,本文采用 NSGA-II 算法。

### 2.3 设计参数和目标函数

针对本文所讨论的圆形反射镜,在其口径、反射面球面半径等参数确定之后,有待设计的参数包括镜体高度( $H$ )、反射面厚度( $F_T$ )、反射镜外壁厚度( $O_T$ )、通光孔侧壁厚度( $I_T$ )、加强筋厚度( $R_T$ )、加强筋间距( $R_D$ )、支撑点位置( $H_P$ )、支撑孔直径( $H_D$ )、支撑孔壁厚( $H_T$ )、镜体边缘修剪高度( $T_H$ )。这些参数对应的镜体结构如图 3 所示。

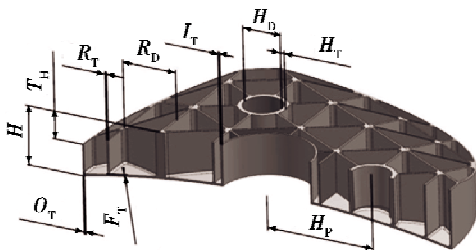


图 3 设计参数示意图

Fig.3 Design parameters

随着国内 SiC 反射镜制造工艺的发展,反射镜的面板、侧壁和加强筋厚度已经能够达到 2 mm 以下<sup>[5-6]</sup>。为了获得质量更轻的反射镜,本文在设定优化变量取值时,将面板、侧壁和加强筋的厚度下限值设为 2.5 mm。在考虑反射镜的制造工艺要求之后,确定设计参数的取值范围,如表 1 所示。

表 1 镜体设计参数及取值范围

Table 1 Design parameters and value ranges mm

参数	范围	参数	范围
$H$	70.0 ~ 100.0	$R_D$	90.0 ~ 96.0
$F_T$	2.5 ~ 6.0	$H_P$	170.0 ~ 190.0
$O_T$	2.5 ~ 6.0	$H_D$	50.0 ~ 80.0
$I_T$	2.5 ~ 6.0	$H_T$	2.5 ~ 7.0
$R_T$	2.5 ~ 6.0	$T_H$	0 ~ 60.0

本文将为质量和面形精度 RMS 值作为优化问题的两个子目标函数。面形精度分为光轴水平和光轴竖

直两种工况,反射镜在检测时一般是光轴水平放置。虽然反射镜在光轴竖直工况下的重力变形最剧烈,但如果以该工况下的面形作为目标函数,反而忽略了最重要的检测工况。所以本文以光轴水平工况下的面形 RMS 值作为目标函数。反射镜光轴水平放置时, $X$  向重力和  $Y$  向重力下的面形 RMS 值十分接近,故将二者的平均值( $M_{RMS_{XY}}$ )最小作为目标,同时约束光轴竖直工况下的面形 RMS 值( $R_z$ )在 16 nm 以内。

### 2.4 求解过程

ISight 的优化流程如图 4 所示,首先由 Optimization 模块给出设计参数的初始取值,之后自动进行 UG 参数化建模、Patran 有限元建模、Nastran 有限元计算和 SigFit 面形拟合,最后将反射镜质量、面形 RMS 值等目标函数反馈给 Optimization 模块。每一轮迭代完成后,ISight 软件在优化算法的指导下,根据目标函数的取值对设计参数进行优化,并进入下一轮迭代,直至达到收敛条件。对于多目标优化问题而言,往往不能收敛到唯一的最优解,只能收敛到一个帕累托解集,该解集由各目标函数取值均较小的解构成。

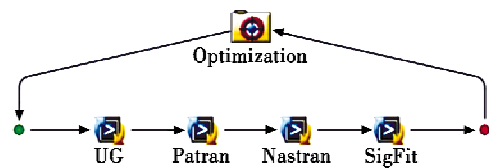


图 4 集成优化流程示意图

Fig.4 Schematic of integrated optimization design

本文所研究的优化问题的求解过程如图 5 所示,图中每一个数据点对应一次迭代结果。图 5 表明,迭代结果逐渐向左下方集中,最终得到一系列密集的三角形点,即帕累托解集。通过对比帕累托解集中各个解的优劣,选择较为理想的方案,作为最终的优化结果。

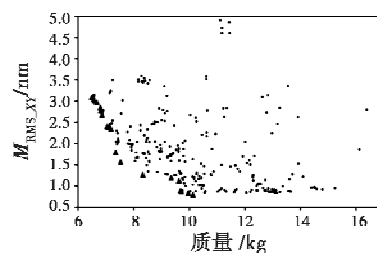


图 5 优化求解过程

Fig.5 Solution process of the optimization

### 2.5 优化结果

选择一组较为理想的优化结果并对参数取值进行圆整,如表 2 所示。

按照圆整后的参数,并考虑制造工艺,重新建立反射镜模型,如图 6 所示。

在光轴水平和光轴竖直两种工况下分析反射镜的

镜面变形,并利用 SigFit 软件进行面形拟合,得到图 7 所示面形云图,图中数值为波长( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

表 2 参数优化结果

参数	优化值	圆整值
$H$	97.36	97.0
$F_T$	2.58	2.5
$O_T$	2.68	3.0
$I_T$	3.13	3.0
$R_T$	2.92	3.0
$R_D$	90.08	90.0
$H_P$	184.53	184.5
$H_D$	77.90	78.0
$H_T$	5.98	6.0
$T_H$	23.63	23.5

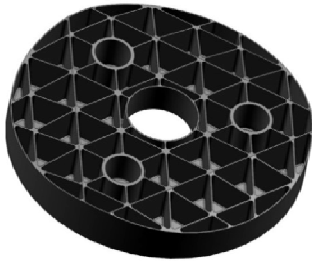


图 6 反射镜最终模型

Fig. 6 Verification model of the mirror

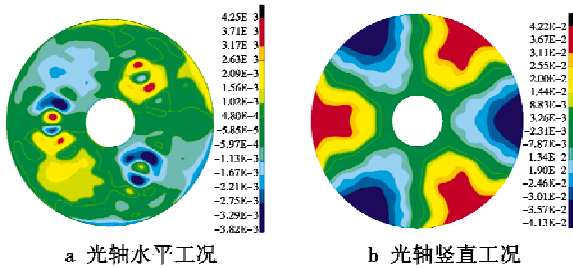


图 7 反射镜面形云图( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Fig. 7 Surface fitting result of the mirror

反射镜最终模型的质量为 11.4 kg,面密度达到 37  $\text{kg}/\text{m}^2$ ,不同工况下的面形精度如表 3 所示。同时,超轻量化反射镜的镜体刚度良好,其一阶固有频率为 1100 Hz。

表 3 反射镜面形 RMS 和 P-V 值

工况	RMS	P-V
光轴水平	1.2	5.6
光轴竖直	14.0	52.8

### 3 结论

本文针对反射镜的优化设计问题,提出了一种集

成优化方法。该方法自动化程度高,可以解决多参数、多目标的优化问题,对于解空间复杂的优化设计问题效果显著。该方法突破了传统设计方法依靠排列组合和迭代试算的局限性,不仅大幅提高设计效率,且优化设计问题的解空间得到扩展。采用该方法设计了一块  $\phi 624 \text{ mm}$  口径的超轻量化 SiC 反射镜,质量为 11.4 kg,面密度达到 37  $\text{kg}/\text{m}^2$ ,轻量化率为 84.5%。反射镜在光轴水平工况下面形 RMS 值为 1.2 nm,在光轴竖直工况下面形 RMS 值为 14 nm,一阶自由模态频率 1100 Hz。本文所提出的优化设计方法,不仅适用于反射镜的设计,也可以解决其他类似结构的设计问题。

### 参考文献

- [1] 徐宏,关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计[J]. 红外与激光工程,2014,43(s1):83-88.
- [2] 任建岳,陈长征,何斌,等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2537-2543.
- [3] DENY P, BOUGOIN M. Silicon carbide components for optics: present and near future capabilities[C]//Proceedings of SPIE, Optical Materials and Structures Technologies II, San Diego, 2005:586-597.
- [4] HIDEHIRO K, MASATAKA N, TAKAO N, et al. Manufacturing and optical testing of 800 mm lightweight all C/SiC optics[C]//Proceedings of SPIE, Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems, San Diego, 2013:837-893.
- [5] 董斌超,张舸. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程,2015,23(8):2185-2191.
- [6] 张媛媛,敬畏,程云涛,等.  $\phi 510 \text{ mm}$  SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元仿真[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1718-1724.
- [7] LIU S T, HU R, LI Q H, et al. Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope[J]. Applied Optics, 2014, 53(35):8318-8325.
- [8] 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):990-994.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州:浙江大学,2006.