

一体化铝合金反射镜的拓扑优化设计与分析

王 上^{1,2}, 张星祥¹, 沙 巍¹, 朱俊青¹

(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: 针对口径为 300 mm 的一体化铝合金反射镜进行了拓扑优化设计, 在反射镜光轴方向的自重载荷下, 以整体柔度作为约束, 反射镜最小体积作为目标进行迭代优化, 得到了拓扑优化结果模型, 根据其特征建立了实体模型并进行了参数优化, 最终得到了总质量为 2.08 kg、面形均方根 RMS (Root Mean Square) 为 5.9 nm、轻量化率为 70% 的一体化反射镜结构。通过参数优化, 结合与对比结构的对比验证了拓扑结构特征的有效性, 并进行了支撑特性分析。中心六边形的支撑结构和半封闭的结构在自重工况下对面形精度的提升有极大贡献。中心六边形结构存在最佳支撑位置, 即正六边形高度与直径比值为 0.26。

关键词: 铝合金反射镜; 拓扑优化; 参数化优化; 支撑特性

中图分类号: TH703

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)01-0061-05

Topology Optimization Design and Analysis of an Integrated Aluminum Alloy Mirror

WANG Shang^{1,2}, ZHANG Xingxiang¹, SHA Wei¹, ZHU Junqing¹

(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: Topology optimization design was conducted for an integrated aluminum alloy mirror with a diameter of 300 mm. Under the self-weight load along the optical axis of the mirror, the global flexibility was considered as a constraint, and the minimum volume of the mirror was considered as an objective for iterative optimization to obtain a topology optimization model. According to the results, a solid model was established, and its parameters were optimized. Finally, an integrated mirror structure with a total mass of 2.08 kg, root mean square of 5.9 nm, and lightweight ratio of 70% was obtained. Through comparisons to a contrast structure combined with a parameter optimization process, the validity of the topological structure features was determined, and the support characteristics were analyzed. A support structure consisting of a central hexagon and semi-closed structure contributes significantly to the improvement of surface shape accuracy under the conditions of self-weight. There is an optimal supporting position for the central hexagon structure, where the ratio of height to diameter of the regular hexagon is 0.26.

Key words: aluminum alloy mirror, topology optimization, parameter optimization, support characteristics

0 引言

得益于铝合金的材料特性, 铝合金反射镜的优势有如下几点: 一是加工周期短、成本低, 铝合金反射镜可以通过金刚石直接铣削成型, 相较于陶瓷材料的烧结制胚等流程方便快捷; 二是可以制成一体化的结构, 相较于联接件装调简单; 三是铝合金密度相对较

低, 反射镜的整体质量小, 发射成本低。铝合金反射镜在光机系统中得到了广泛应用^[1-3], 国内外对其结构形式进行了研究。图 1 为荷兰 Astron 公司提出的轻量化方法, 该结构形式的轻量化率可以达到 85% 以上^[4]; 图 2 为德国 Jena Optronik 公司委托 Fraunhofer 实验室设计加工的封闭结构反射镜, 在保证镜体整体刚度的同时, 减重可以达到 50% 以上^[5]。在国内, 范磊等人

收稿日期: 2020-12-13; 修订日期: 2021-02-25.

作者简介: 王上 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事光机结构设计。E-mail: ws790402497@163.com。

通信作者: 张星祥 (1977-), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间宽幅成像技术、精密装调与拼接技术、在轨测试与处理技术方面的研究。

E-mail: jan_zxx@163.com。

基金项目: 装备演示验证项目。

对 316 mm 口径的铝反射镜进行了设计分析, RMS 可以达到 41 nm 左右, 符合其系统指标^[6]; 谭双龙等人设计的 126 mm 口径的可见光级铝反射镜自重状态下 RMS 可以达到 6.1 nm^[7]; 翟岩等人对铍铝合金反射镜组件进行了针对性研究, 使得 750 mm 大口径反射镜组件 RMS 能够满足 $\lambda/20(\lambda=632.8\text{ nm})$ ^[8]。

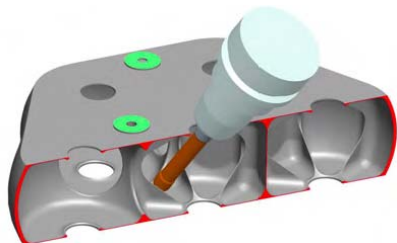


图1 Astron 公司的轻量化结构形式
Fig.1 Astron's lightweight structure

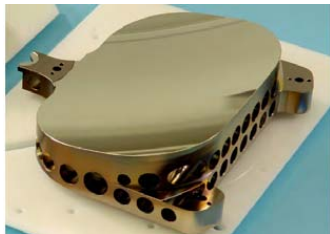


图2 Fraunhofer 实验室的封闭结构形式
Fig.2 Fraunhofer's closed structure

目前, 国内对于铝反射镜的结构特征及支撑特性分析较少。在此基础上, 本文针对某一体化反射镜的支撑结构进行了设计与详细的特性分析。其口径为 300 mm, 材料为 AL6061, 工作于可见光波段, 要求面形精度 RMS 值小于 $\lambda/50(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。在一定经验基础上, 拟采用内圈作为主要支撑结构, 外圈利用辅助筋板均匀面形, 背部三点支撑的形式。先通过拓扑优化的方法建立了初始模型, 再进行参数化优化, 分析其支撑特性。

1 反射镜的拓扑优化

1.1 连续体结构拓扑原理

由于结构的多样性, 在设计优化时往往需要设计人员大量的经验作为基础并进行试验。而拓扑优化的优势在于, 给定载荷、边界条件等必要约束后, 计算机通过算法能够给出设计域中相对最优的空间布局。这不仅降低了设计经验的门槛, 减少了工作量, 还能够得到约束条件下更为合理的结构形式或思路。因

此, 变密度法实现连续结构体拓扑在光机系统的结构设计中被广泛应用^[9-12]。计算机通过引入可变密度的假定材料单元, 将设计变量变为单元密度, 建立单元密度与材料弹性模量的关系, 最终通过插值模型实现优化过程。具体过程为假设单元内均为各向同性的材料, 但其相对密度为 0~1 之间, 通过插入惩罚因子对单元密度进行判定保留或者去除, 得到一定材料总量下, 结构柔性最小的最佳材料分布形式。其静力状态下的数学模型为:

$$\begin{aligned} V_{\min}(x) &= \sum_{i=1}^n x_i v_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{s.t.:} & \begin{cases} C(x) = U^T K U \leq C^* \\ K U = F \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

式中: V 为结构总体积; v_i 为单元体积; x_i 为单元变量; n 为变量单元总数; $C(x)$ 为结构整体柔度; K 表示总体刚度; U 为位移列阵; F 为作用力; x_{\min} 为单元变量下限。

1.2 拓扑求解

图 3 为反射镜的有限元模型, 浅色部分为待优化的设计区域, 深色部分包括支撑点和镜体表面, 为非设计区域。AL6061 的材料属性以及反射镜结构参数分别如表 1 和表 2 所示。由于影响径向自重条件下面形的最主要因素为质心与支撑点间的位置差距导致的倾覆力矩, 所以支撑位置选用距离上表面 8 mm 位置处。在一定经验基础上, 拟采用背部三点支撑的形式, 内圈作为主要支撑结构, 外圈利用辅助筋板均匀面形。在更难满足面形精度的轴向重力工况下, 以镜面节点总位移量代替结构柔度作为约束, 以体积最小作为优化目标进行计算。

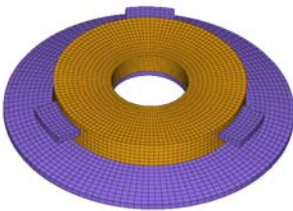


图3 反射镜有限元模型
Fig.3 Finite element model of reflector

表1 Al6061 的材料属性

Table 1 Material properties of Al6061

Material	Density/(g·cm ⁻³)	Young's modulus/GPa	Thermal conductivity/ (W·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Coefficient of thermal expansion/10 ⁻⁶ K ⁻¹	Poisson's ratio
Al6061	2.7	71	154.3	22.4	0.25

表 2 反射镜结构参数

Table 2 Structural parameters of reflector			
External diameter/mm	Internal diameter/mm	Radius of curvature/mm	Height/mm
300	80	610	45

经过迭代，拓扑优化的结果如图 4 所示，图 5 为设计区域的底部。总结拓扑结构特征为中心六边形支撑结构与半封闭结构。建立初始模型如图 6。采用有限元分析的方法和面形拟合，得到初始模型其轴向与径向重力下的 RMS 分别为 7.136 nm 和 5.779 nm。以轴向重力工况为例，图 7 与图 8 分别为初始模型的有限元仿真结果和面形拟合结果。

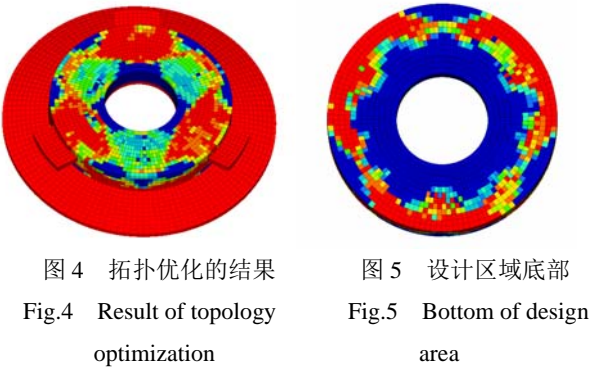


图 4 拓扑优化的结果
Fig.4 Result of topology optimization

图 5 设计区域底部
Fig.5 Bottom of design area



图 6 初始模型
Fig.6 Initial model

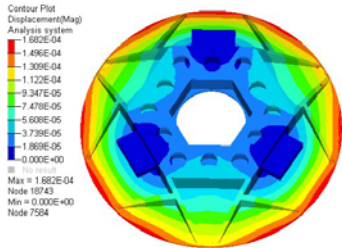


图 7 轴向自重仿真结果
Fig.7 Simulation results of axial self-weight

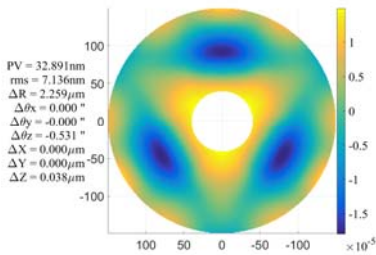
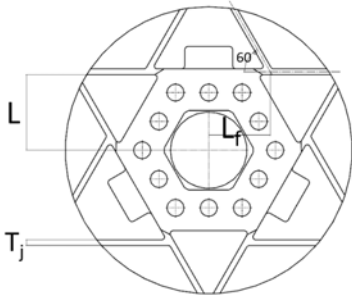


图 8 轴向自重 RMS 值
Fig.8 RMS value of axial self-weight

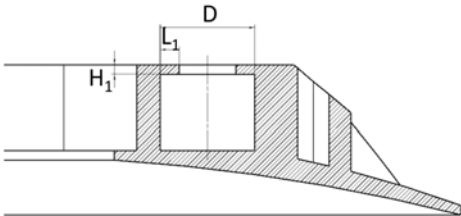
2 反射镜的参数优化

2.1 镜高

反射镜的各主要特征参数如图 9 所示，其中镜高对反射镜的整体质量影响最大。针对本文中的反射镜参数，镜体高度范围定在 40~55 mm 之间。根据图 10 中的优化数据可以得知，随镜高与质量的增加，轴向重力工况下的面形变优明显，但是到达一定高度后，自重因素影响成为主导，面形下降，在镜高为 52.5 mm 时综合面形达到最优，RMS 为 7.015 nm，PV (Peak to Valley) 值为 35.625 nm。



(a) Characteristic parameters of mirror top view



(b) Characteristic parameters of mirror profile

图 9 反射镜主要特征参数

Fig.9 Main characteristic parameters of reflector

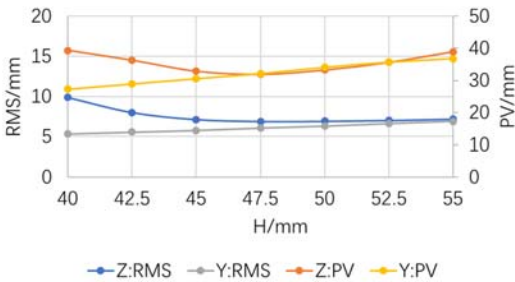


图 10 镜体高度对面形的影响

Fig.10 The influence of the height of the mirror body on the surface shape

2.2 中心六边形的大小

针对基础模型的形式，中心六边形的筋板是主要的支撑结构，对六边形结构的大小进行了参数优化。如图 11，当六边形结构的高度在 75~90 mm 之间变化时，轴向重力下 RMS 值变化量最大可达 1.9 nm。综合不同方向重力条件，六边形高度为 80 mm 时在面形最优，RMS 为 6.370 nm，此时六边形高度与直径比值在 0.26 左右，即为最佳支撑位置。

2.3 其他特征参数的优化

其他特征参数包括辅助筋板位置、圆孔大小及翻边的相关参数，具体范围与优化步长如表 3 所示。综合考虑两个方向自重条件下的 RMS，最终得到了最佳参数。在优化过程中，辅助筋板位置、筋板厚度与翻

边大小对面形影响效果明显，圆孔大小与翻边厚度决定了整体结构刚度强弱，对径向重力下面形提升有明显贡献。

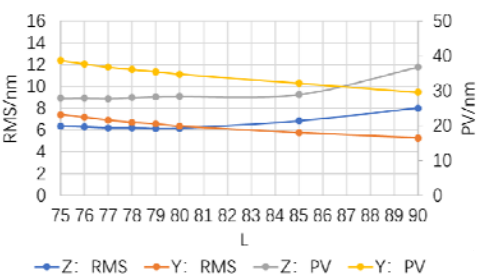


图 11 中心六边形大小对面形的影响
Fig.11 The influence of the size of the central hexagon on the surface shape

表 3 其他特征参数的优化

Table 3 Optimization of other characteristic parameters					
Features	Auxiliary rib plate position	Round hole size	Flanging size	Flanging thickness	Rib plate thickness
	L_f/mm	D/mm	L_1/mm	H_1/mm	T_f/mm
Range	60-70	20-30	2-6	1-8	3-7
Step	1	2	1	1	0.5
Optimum	66	30	6	3	6

2.4 优化结果

参数优化的结果如图 12 所示，总质量为 2.08 kg、轴向重力与径向重力下的 RMS 分别为 5.888 nm 和 5.884 nm、轻量化率达到 70%。

3 与其他结构的对比分析

为了更好地体现半封闭结构与六边形支撑结构特征的优势，建立了中心圆形支撑、开放圆孔、开放三角形筋板等结构并进行了相关参数的优化(图 13~15)，对比结果如表 4 所示。

拓扑结构的优化过程及几种不同结构的对比结果表明，相较于轴向重力工况，径向重力工况下的面形精度在设计中更容易满足要求。调整中心六边形结构大小与翻边相关参数的过程表明，在尽量减小支撑点与质心有差距而导致的倾覆力矩后，反射镜的背部支撑结构刚度对径向重力下面形精度起到决定性作用。对比结构中，中心圆形与内圈三角筋板两种结构的筋板厚度更大，分布更密集，提升了整体刚度，故其径向重力下面形精度表现更优异。



图 12 优化结果
Fig.12 Optimization results



图 13 中心圆形支撑结构
Fig.13 Center circular support structure



图 14 无翻边开放圆孔结构
Fig.14 Structure of open circular hole without flanging



图 15 内圈三角形筋板结构
Fig.15 Structure of triangular rib plate in inner ring

表4 对比结果
Table 4 Comparison results

	Z:RMS/nm	Z:PV/nm	Y:RMS/nm	Y:PV/nm
Optimization results	5.888	26.039	5.884	32.884
Center circular support structure	9.235	40.451	4.454	22.964
Structure of open circular hole without flanging	6.232	27.737	7.203	39.019
Structure of triangular rib plate in inner ring	8.297	35.722	5.042	27.561

在轴向重力工况下，比较不同的对比结构结果，可见中心六边形与半封闭的翻边结构对降低 RMS 值有极大贡献。由于 3 个支撑点与圆形反射镜的搭配本身存在着不均匀性，六边形结构能够更好地均匀面形。与开放式筋板结构相比较，半封闭的翻边结构能够有效地减少支撑点位置的应力集中，形成双层的承力结构，提升一体化反射镜的稳定性。

4 结论

本文针对一体化铝合金反射镜进行了设计与特性分析。通过拓扑优化得到了基本特征并依此建立了初始结构。对初始结构中镜高、中心六边形高度等在内的不同特征参数进行了优化，最终得到自重下的 RMS 为 5.9 nm、轻量化率为 70%的反射镜优化模型。从优化过程分析铝合金反射镜的支撑特性，在对面形影响更大的轴向重力条件下，随自身质量增加，反射镜刚度增强可以提高面形精度，但超过一定范围，自重影响变为主导，使得 RMS 增大。中心六边形结构存在最佳位置，即正六边形高度与直径比值为 0.26 左右时，面形精度最高。在此基础上，与其他 3 种对比结构进行比较，得出了中心六边形与半封闭结构在自重条件下提高面型精度的独特优势，对铝合金反射镜的轻量化设计提供了重要参考。

参考文献：

[1] Donald R, Donald B, Richard P, et al. Stabilized high-accuracy optical tracking system(SHOTS)[C]//*Proceedings of SPIE*, 2001, **4365**: 10-18.

[2] Mark F Larsen, Harri Latvakoski, Amanda K Mainzer, et al. Wide-field infrared survey explorer science payload update[C]//*SPIE*, 2008, **7010**: 70100G.

[3] Risse S, Scheiding S, Gebhardt A, et al. Development and fabrication of a hyperspectral, mirror based IR telescope with ultra precise manufacturing and mounting techniques for a snap together system assembly[C]//*SPIE*, 2011, **8176**: 8176N.

[4] Niels Tromp, Macro Drost, Johan Pragt. Astron extreme light weighting[C]//*SPIE*, 2004, **5495**: 372-382.

[5] Steffen Kirschstein, Amelia Koch, Jurgen Schoneich, et al. Metal mirror TMA, telescopes of the JSS product line: design and analysis[C]//*SPIE*,

2005, **59621**: 59621M.

[6] 范磊, 赵勇志, 曹玉岩. 红外离轴系统金属反射镜设计与分析[J]. *红外技术*, 2015, **37**(5): 374-379.

FAN Lei, ZHAO Yongzhi, CAO Yuyan. Design and analysis of metal mirror for infrared off-axial system[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(5): 374-379.

[7] 谭双龙, 王灵杰, 张新, 等. 可见光级铝合金反射镜一体化设计与分析[J]. *长春理工大学学报: 自然科学版*, 2017, **40**(3): 5-8,12.

TAN Shuanglong, WANG Lingjie, ZHANG Xin, et al. Snap together design and analysis of visible quality aluminum mirror[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2017, **40**(3): 5-8,12.

[8] 翟岩, 姜会林, 梅贵, 等. 大口径空间红外相机铍铝合金反射镜组件材料选择与设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(6): 296-302.

ZHAI Yan, JIANG Huilin, MEI Gui, et al. Material selection and design of beryllium-aluminum alloy mirror assembly for large-diameter space infrared camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(6): 296-302.

[9] Rozvany G I N. A critical review of established methods of structural topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization* (S1615-147X), 2007, **34**: 123-132.

[10] 沙巍, 陈长征, 张星祥, 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.

SHA Wei, CHEN Changzheng, ZHANG Xingxiang, et al. Topological lightweight design of space mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 35-39.

[11] 李畅, 何欣, 刘强. 高体份 SiC/Al 复合材料空间相机框架的拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(8): 2526-2531.

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.

[12] 施胤成, 闫怀德, 宫鹏, 等. 基于 Zernike 系数优化模型的光学反射镜支撑结构拓扑优化设计方法[J]. *光子学报*, 2020, **49**(6): 209-220.

SHI Yincheng, YAN Huaide, GONG Peng, et al. Topology optimization design method for supporting structures of optical reflective mirrors based on zernike coefficient optimization model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(6): 209-220.