中心支撑式铝合金反射镜组件优化设计

闫磊,王灵杰,张新,谭双龙,胡铭钰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:为了满足光学系统在复杂环境下具备高成像质量的要求,结合有限元手段和优化方法,设计了一种具有柔性 环节的中心支撑反射镜组件结构。首先,从反射镜组件的材料选取入手,结合反射镜组件结构包络要求及理论计算 结果,完成反射镜组件初始结构设计;其次,利用有限元方法,对反射镜组件模态和面形精度展开研究;最后,利用优 化方法,以反射镜组件柔性槽尺寸及反射镜背部支撑厚度为设计变量,以反射镜组件一阶频率和镜面面形为优化目 标,对反射镜组件初始结构进行优化设计。结果表明:优化后反射镜镜组件一阶频率为230.1 Hz;多工况下,反射镜 反射面面形优于1/55λ(λ=632.8 nm),满足结构设计要求,可为成像光学系统反射镜结构设计提供参考。 关键词:反射镜;柔性环节;模态分析;面形精度;优化设计

中图分类号: TH703, TH743 **文献标志码:** A

文章编号:1672-9870(2020)03-0013-04

The Optimization Design of a Center-supported Aluminium Alloys Mirror Assembly

YAN Lei, WANG Ling-jie, ZHANG Xin, TAN Shuang-long, HU Ming-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033)

Abstract: In order to ensure high imaging quality of the optical system in a complex environment, an center— supported mirror assembly structure with a flexible link was designed by finite element optimization. Firstly, beginning with the material selection of the mirror component, according to the structural envelope demand and theoretically calculating results, the initial structure of the mirror assembly was designed. Secondly, modal analysis and surface accuracy of the mirror component were developed by finite element simulation. Finally, taking the flexible slot dimension and the thickness of the back support of the mirror assembly as design variables, utilizing optimization method, the first—order frequency and shape of the mirror assembly were regarded as optimization targets, the initial structure of the mirror assembly was optimized. The results showed that the first—order frequency of the optimized mirror assembly is 230.1 Hz; under multiple loading conditions, the surface RMS of the mirror is always less than $1/55 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), which can meet the structural design requirements, therefore providing a reference for the structural design of the optical mirror imaging system.

Key words: mirror assembly; flexible link; modal analysis; surface figure; optimization design

随着光学成像需求的不断加大,对光学成像 质量的要求也越来越高。作为反射式光学系统 的关键部件,反射镜面形精度及稳定性至关重 要。制备反射镜的材料,诸如SiC、铝合金、ULE、 和Zerodur等得到广泛应用^[1],其中,铝合金材料 凭借其加工周期短、切削加工性能优良等优势, 在工程光学领域受到广泛青睐^[2],且随着金刚石 单点车削技术(Single Point Diamond Turning,

收稿日期: 2019-04-26

作者简介: 闫磊 (1990-), 男, 硕士, 研究实习员, E-mail: yanlei0304259@163.com

通讯作者:王灵杰(1979-),男,博士研究生,副研究员, E-mail: wanglingjie@ciomp.ac.cn

SPDT)的广泛应用,铝合金材料的非球面加工 已实现经济高效化^[3]。

设计阶段,需综合考虑反射镜载荷工况以确 保反射镜结构满足使用要求。反射镜质量越 轻,所用材料越少,成本也越低。但质量过轻, 反射镜面形却难以保证,因此,合理的轻量化设 计至关重要^[4-5];支撑上,为了保证反射镜面形 稳定性,通常采取的支撑方式有中心支撑、周边 支撑、侧面支撑、背部支撑等几种形式^[6]。因此, 设计质量轻、性能优异的反射镜难度很大同时 意义重大^[7]。

文中针对成像光学系统设计要求,设计了一 种 φ365 mm 口径中心支撑式反射镜组件结构。 反射镜组件包含反射镜和背板,材料选用铝合 金,以确保反射镜组件实现被动无热化设计。 组件选用中心支撑加柔性背板的连接形式,确保 反射镜高刚度的同时,解决了反射镜组件对外 连接适应性问题,保证了反射镜面形稳定性^[8-10]。 采用优化方法对反射镜组件进行优化设计,在 不损失组件刚度的情况下,有效提升了反射镜 面形精度。

1 反射镜组件设计

1.1 材料选取

反射镜作为反射式成像光学系统重要组成 部分,其材料选取直接决定了反射镜面形精 度。综合考虑反射镜加工切削性能、加工精度、 加工周期、制造成本等因素,优先选用铝合金作 为反射镜材料。

反射镜组件包含反射镜和反射镜支撑背板, 材料匹配方面,选用同种铝合金作为反射镜背 板材料,以实现反射镜组件无热化设计。反射镜 组件铝合金材料型号及其力学参数如表1所示。

表1 反射镜组件材料					
结构	型号	密度	杨氏模量	泊払い	热胀系数
		$/(g \cdot cm^{-3})$	/MPa	们们们	$/\mathrm{K}^{-1}$
反射镜	6061	2.7	68	0.33	$22.5E^{-6}$
背板	6061	2.7	68	0.33	$22.5E^{-6}$

1.2 组件设计

1.2.1 反射镜设计

反射镜作为反射式成像光学系统主要部件, 需具有足够的刚度和稳定性。对反射镜进行合 理轻量化设计,可有效减小反射镜因自身重力 带来的面形变化,提高反射镜面形精度。反射 镜镜厚比选取经验公式如下^[11]:

$$\delta = \frac{3\rho g R^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g \Delta^2 D^2}{256E} \tag{1}$$

式中, δ 为镜面最大变形量(μ m); ρ 为材料密 度(kg/m²); R 为反射镜半口径(m); E 为材料 弹性模量(GPa); t 为镜厚(m); Δ 为径厚比; g 为重力加速度。反射镜口径为 φ 365 mm,镜面 曲率半径为530 mm,材料为铝合金,按照成像光 学系统要求,取 δ =1/40 λ (λ =632.8 nm)。综 合反射性镜面高陡度特点及精度要求,并结合 经验公式(1),最终反射镜镜厚比取值5.7。

反射镜采取径向槽轻量化设计,反射镜背部 封闭设计,对反射镜起到反向支撑作用,反射镜 初始结构如图1所示。



从力学角度上考虑,此设计在合理减轻反射 镜重量的情况下,有效保证了反射镜轴向和径 向刚度,符合反射镜高刚度设计理念。设计后, 反射镜轻量化比率达到78.8%。

1.2.2 背板设计

为了保证反射镜面形稳定性,降低外部环境 对反射镜面形影响,接下来对背板结构增加柔 性环节设计。鉴于反射镜结构特点及使用要求, 采用轴向环切槽柔性设计以有效保证反射镜轴 向刚度,同时还可达到卸载反射镜径向重力及 外部载荷的效果,背板初始结构如图2所示。



图2 背板初始结构

2 有限元分析

对反射镜组件展开模态分析和自身重力分析,来综合评估反射镜组件刚度、反射镜面形精 度及结构稳定性。

2.1 模态分析

为了分析验证反射镜组件结构刚度特性,对 反射镜组件进行模态分析,反射镜组件前3阶模 态振型如图3所示,表2描述分析了前三阶固有 频率和模态振型。



表2 /	反射镜组件前3阶模态分析结果
------	----------------

模态阶数	频率/Hz	振型描述	
1	225.2	绕 X 轴转动	
2	227.9	绕Y轴转动	
3	345.5	沿 Z 轴平动	

可以看出,反射镜组件一阶频率为225.2 Hz, 高于一般载体固有频率值,可有效避免反射镜 组件发生共振现象。

2.2 自身重力分析

综合考虑反射镜组件加工过程和实际工作 环境下因自身重力变化带来反射镜面形的影 响,对反射镜组件展开自身重力分析,提取反射 镜组件在径向和轴向两个方向1g重力载荷下 反射镜面形结果,面形云图如图4所示,面形拟 合结果如表3所示。



(a)径向重力下面形云图



可以看出,径向自身重力下反射镜面形 RMS 值约为 $1/44 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), PV 值约为 $1/8 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$); 轴向自身重力下反射镜面形 RMS 约为 $1/51 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), PV 值约为 $1/10 \lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

表3 反射镜面形拟合结果

面形指标	径向重力/1 g	轴向重力/1 g
RMS/nm	14.5	12.3
PV/nm	75.7	66.1

3 组件优化

在反射镜组件设计中,改变背板柔性槽尺寸 及反射镜背部支撑厚度对反射镜组件刚度及面 形影响巨大,为进一步提高反射镜面形,同时不 降低反射镜组件一阶频率,选取反射镜组件柔 性槽尺寸及反射镜背部支撑厚度为设计变量, 以反射镜组件一阶频率和镜面面形为优化目 标,对反射镜组件初始结构进行优化设计,优化 后反射镜面形云图、面形拟合结果及固有频率 分别如图5、表4及表5所示。



(a)径向重力下面形云图



表4 优化后反射镜面形拟合结果

面形指标	径向重力/1 g	轴向重力1g
RMS/nm	11.3	11.5
PV/nm	59.8	62.5

表5 优化后反射镜组件前3阶模态分析结果

模态阶数	频率/Hz	振型描述
1	230.1	绕 X 轴转动
2	231.6	绕Y轴转动
3	350.2	沿Z轴平动

优化后,反射镜组件在径向自身重力下反射 镜面形 RMS 值约为 $1/56 \lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$,轴 向自身重力下反射镜面形 RMS 值约为 $1/55 \lambda$ $(\lambda = 632.8 \text{ nm})$,较优化前有很大提升,优化效 果显著;结构模态上,优化后反射镜组件一阶模 态高于优化前一阶模态,可有效避免共振风险。

4 结论

本文设计一种具有柔性环节的中心支撑反 射镜组件结构,反射镜口径为 φ 365 mm,从反射 镜组件的材料选取和理论计算入手,完成反射 镜组件初始结构设计。利用有限元分析手段, 对反射镜初始结构展开模态及镜面面型精度分 析,并通过优化方法完成初始结构优化设计工 作。优化后反射镜面形 RMS 值不低于 1/55 λ (λ =632.8 nm),结构一阶频率达到 230.1 Hz, 满足设计要求。本文的设计思路和研究方法可 为成像光学系统反射镜结构设计提供参考。

参考文献

- [1] 刘韬,周一鸣,江月松.国外空间反射镜材料及应用分析[J].航天返回与遥感,2013,34(5):90-99.
- [2] 张东阁,傅雨田.铝合金反射镜的发展与应用[J].红外技术,2015,37(10):814-823.
- [3] Gary M. Single point diamond machining of optical and related mounting surfaces [C].SPIE, 2002 (4471):304-307.
- [4] 安鲁明,张淑杰,周成林,等.空间反射镜结构轻量
 化设计研究[J].制造业自动化,2019,41(6):
 106-109.

(下转第28页)

技术研究进展[J].光电工程,2018,45(9):66-81.

- [4] Martins H F, Martin L S, Corredera P, et al. Phase sensitive optical time domain reflectometer assisted by first—order raman amplification for distributed vibration sensing over>100 km [J].Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8):1510—1518.
- [5] 王鹏飞,董齐,刘昕,等.基于φ-OTDR的煤层气
 管线外界入侵振动检测系统[J].传感技术学报,
 2019,32(1):144-149.
- [6] 盛逐风.基于φ-OTDR与MZI复合的超长周界光纤预警系统研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [7] 张睿.基于 MZI 的光纤周界防区系统的研究[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院,2012.
- [8] 张叶浩.基于3×3耦合器双马赫曾德分布式光纤 传感系统的设计[D].长春:长春理工大学,2018.
- [9] 宋美杰,于廷宽.一种基于3×3耦合器的光纤相位 解调算法[J].光通信技术,2019,43(5):51-53.

(上接第16页)

- [5] 国绍文,王武义,张广玉,等.空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J].光学仪器,2005(4):78-82.
- [6] 周宇翔,沈霞.空间反射镜背部双脚架柔性支撑结构设计[J].激光技术,2017,41(1):141-145.
- [7] 包奇红,沙巍,陈长征,等.中心支撑长条形反射镜
 轻型优化设计[J].红外与激光工程,2017,46(7):
 165-171.
- [8] 胡瑞.基于拓扑优化的空间反射镜与柔性支撑结构设计方法[D].大连:大连理工大学,2017:97-

106.

- [9] Daniel V, Ralph M R. Flexure mounts for high—resolution optical elements [C].SPIE, 1988, 959: 18–36.
- [10] 邵梦旗,张雷,李林,等.超轻反射镜柔性支撑结 构设计与试验[J].光子学报,2020(5):201-209.
- [11] 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.