

基于惰性强度的光纤传像模块支撑结构优化设计

杨丰福^{1,2}, 田海英¹, 颜昌翔¹, 吴从均¹, 母德强³

(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; 3. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 光纤传像模块是大视场天基望远镜关键部件之一, 其支撑结构的刚度特性对于物镜的工作寿命有至关重要的影响。为了在振动载荷作用下, 在保证物镜寿命的同时降低支撑结构的重量, 在拓扑优化的基础上, 以光学玻璃惰性强度和结构基频为优化约束对光纤传像模块支撑结构进行了优化。首先, 阐述了光学元件惰性强度的计算方法并确定了优化过程中耦合光纤的同心物镜惰性强度的边界值; 其次, 根据系统参数确定了光纤束的布局并设计了初始支撑结构; 最后, 在拓扑优化的基础上, 建立了以耦合光纤的同心物镜惰性强度和支撑结构基频为优化约束的集成优化模型, 并利用 isight 集成优化平台进行了计算。计算结果表明: 在满足优化约束的情况下, 优化后的质量降低了 11.4%, 取得了明显的减重效果。提出的优化方法为物镜与光纤束耦合类的光机结构设计提供了参考。

关键词: 光纤传像模块; 应力失效; 惰性强度; 结构优化

中图分类号: TH741 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0518002

Optimum design of braced structure for optical fiber image transmission module based on inert strength

Yang Fengfu^{1,2}, Tian Haiying¹, Yan Changxiang¹, Wu Congjun¹, Mu Deqiang³

(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. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Optical fiber image module is one of the key components of large field of view space-based telescope, whose stiffness characteristics of support structure have a crucial impact on the working life of objective lens. In order to ensure the lifetime of objective lens and reduce the weight of the support structure of the optical fiber image transmission module under vibration load, the braced structure of the optical fiber image transmission module was optimized with the inert strength of optical glass and the fundamental frequency of the structure as the optimization constraints on the basis of topological optimization. Firstly, the calculation method of inert strength of optical element was described and the inert strength boundary value of the coupled-fiber monocentric lens was determined. Secondly, the initial braced structure of the optical fiber image transmission module was designed. Finally, on the basis of

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0103603)

作者简介: 杨丰福(1989-), 男, 博士生, 主要从事光机结构优化设计方面的研究。Email: yangfengfu@126.com

导师简介: 田海英(1975-), 女, 研究员, 博士, 主要从事光机结构设计方面的研究。Email: tianhy@ciomp.ac.cn

母德强(1958-), 男, 研究员, 博士, 主要从事机械系统动力学分析方面的研究。Email: mudq@ccut.edu.cn

通讯作者: 颜昌翔(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间光学遥感技术的研究。Email: yanxc@ciomp.ac.cn

topology optimization, an integrated optimization model was established with the inertia strength of the monocentric lens and the fundamental frequency of the braced structure as the optimization constraints, and was calculated by using iSIGHT integrated optimization platform. The numerical result of the simulation demonstrates that under the condition of satisfying the optimization constraint, the quality of the optimized support structure is reduced by 11.4%, achieving the obvious weight loss effect. The proposed optimization method provides a reference for the opto-mechanical structure of objective lens coupled with the optical fiber bundle.

Key words: optical fiber image transmission module; stress failure; inert strength; structure optimization

0 引言

随着空间目标总量和机动威胁目标数量的急剧增加,空间目标监视成为一项重要的研究内容,基于同心物镜光学系统的天基望远镜由于具备超大视场、较高成像质量及结构紧凑等特点,在空间监视领域具有很好的应用前景。

对于同心物镜光学系统存在弯曲像面的问题,目前国内外主要有两种方案解决:阵列转像物镜方案和光纤块视场拼接方案。相比阵列转像物镜方案,光纤块视场拼接方案体积紧凑、结构简单、系统稳定性好、装调难度和图像配准融合算法简单,更适用于航空航天领域^[1]。然而,光纤块与同心物镜耦合构成了一种低刚度结构布局形式,在振动载荷作用下,光纤块与同心物镜耦合处会形成应力集中区,影响同心物镜的工作性能及寿命。因此,有必要对光纤传像模块支撑结构进行优化设计,在保证同心物镜正常工作性能及寿命的前提下,减轻结构质量,从而获得最佳的支撑结构形式。

关于光学元件支撑结构的研究,已有很多学者进行研究。其中,曹玉岩等^[2]研究了光学元件的挠性支撑结构的优化问题,在考虑挠性单元与透镜相互作用力及挠性单元数目对面型精度影响的前提下,选取光轴位移作为支撑结构的优化约束条件,优化结果表明,光学元件面型精度提高了 23%;胡瑞^[3]研究了空间反射镜柔性支撑结构拓扑优化问题,在反射镜自重、温度载荷以及动力模态多种工况下使用子结构分析技术进行了以反射镜面型最小为优化目标函数的优化研究,结果显示,使用优化后的柔性结构,反射镜面型精度有了明显的提升。Joeleff

Fitzsimmons 等^[4]设计了近场红外光学系统柔性支撑结构,通过仿真计算和实验,保证了热循环过程中光学镜片和支撑结构结合界面的适应性和光学系统的安全;Isaac Weingrod 等^[5]采用 Bipod 柔性结构对 ISIR 光谱仪的反射镜进行支撑,有效解决了结构与光学系统之间的热匹配。但上述针对光学元件支撑结构进行的研究,仅涉及单个光学元件本身的性能指标,未针对两个或者多个光学元件耦合在一起的支撑结构进行研究。此外针对光纤传像模块与同心物镜耦合涉及的光机设计研究主要集中在国外,其中 Adam R.Johnson 等^[6]研究了大视场光纤块耦合同心物镜成像系统的光机结构设计问题,但是由于其探测器尺寸较小,故光纤块长度较短,物镜表面应力集中问题并不突出,并且由于该成像系统的振动环境并不恶劣,因此并没有对光纤块支撑结构进行优化研究。

文中针对振动环境下,光纤传像模块耦合同心物镜导致的应力集中问题,在拓扑优化的基础上,以结构的模态频率和物镜惰性强度为约束对光纤传像模块支撑结构进行优化。首先,基于拓扑优化技术,确定了支撑结构加强筋的分布;其次,建立了以支撑结构加强筋截面参数为变量、以结构基频和同心物镜的惰性强度为约束、以支撑结构质量最小为目标的优化模型;最优,在集成优化环境下使用多岛遗传优化算法对优化模型进行了求解。

1 光学元件的惰性强度

玻璃质光学元件由脆性材料加工而成,主要特性是脆性高、断裂韧性低、弹性极限和强度非常接近,因此,在光学加工过程中会在光学元件表面产生

微裂纹。在外载荷作用下,由于裂纹的几何形状及缺少塑性变形,应力会集中在表面微裂纹尖端(如图 1 所示),使得玻璃质光学元件的实际强度比材料的理论强度低两三个数量级^[7]。

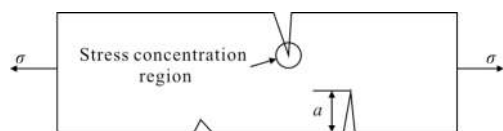


图 1 外载荷作用下光学元件裂纹尖端应力分布

Fig.1 Stress distribution at the crack tip of optical element under the external load

因此,玻璃质光学元件是基于玻璃的惰性强度来进行强度设计的。在外载荷作用下,假定玻璃的工作寿命内没有裂纹增长(即没有亚裂纹扩展)的情况下,材料发生瞬时失效所需的应力,称为玻璃的惰性强度^[8]。当光学元件在外载荷的作用下,当尖端应力值超过玻璃的惰性强度值时,光学元件判定为失效,计算公式为^[9]:

$$\sigma_i = \left[\frac{r}{(r+1)^{(r+1)/r}} \right] \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a}} \quad (1)$$

式中: σ_i 为玻璃的惰性强度; r 表示裂纹残余应力场特性的参数(在分析中,通常采用保守设计 $r=3$); K_{IC} 为玻璃的临界应力强度(常见材料的断裂韧性如表 1 所示); Y 为一个由微裂纹形状、尺寸及载荷形式所决定的一个量纲系数; a 为裂纹尺寸(为磨料平均直径的 3 倍)。

表 1 不同光学玻璃材料的断裂韧性

Tab.1 Fracture toughness of different optical glass material

Glass material	$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$	Glass material	$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$
F-SILICA	674	LaK10	865
BK7	774	F2	500
SF5	519	SF58	346

光学元件表面裂纹分离模式按裂纹的位置与应力方向间的关系来区分,主要有三种基本模式,如图 2 所示。第一种为张开型,应力作用在裂纹平面的法向;第二种为滑开型;第三种为撕开型。其中,第一种分离模式最常见、最危险。为了获得足够的安全性,以最危险的张开型裂纹为研究对象,那么公式(1)中

裂纹几何因子 $Y=1.42$ 。

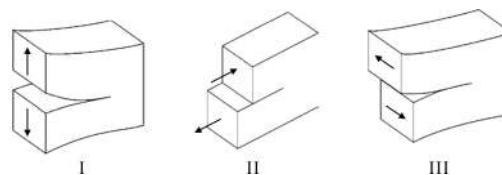


图 2 光学元件表面裂纹分离模式类型

Fig.2 Separation types of the optical element surface crack

同心物镜的材料为熔石英,在光学加工过程中,其磨料参数^[10]如表 2 所示,因此裂纹尺寸 $a=270 \mu\text{m}$ 。

表 2 熔石英加工过程中磨料参数

Tab.2 Abrasive parameters during fused quartz processing

Process stage	Rough machining	Finish	Polish
Diameter of abrasive/ μm	90	40	25

根据表 1 中的数据可知,熔石英的临界应力强度, $K_{IC}=674$;将上述参数代入到公式(1)中,可得同心物镜的惰性强度为 13.58 MPa。

作为一种简化的判定法则^[11],可以将承受超过 6.9 MPa 应力的光学元件判定为失效,然而由于不同的光学加工工艺以及不同的光学材料等因素的影响可能会导致在光学元件承受低于 6.9 MPa 应力值时发生失效。因此,有必要根据光学元件的材料及光学加工工艺等因素对光学元件的惰性强度进行校核。由于公式(1)的计算结果大于经验法则,因此采用经验法则的惰性强度 6.9 MPa 作为支撑结构参数优化过程中使用的约束边界条件。

2 光纤传像模块支撑结构设计

为了满足大视场及高分辨率的需求,天基望远镜采用结构紧凑的同心物镜光学系统,如图 3 所示。

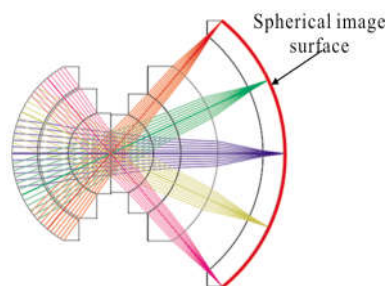


图 3 天基望远镜光学系统

Fig.3 Space-based telescope optical system

然而,同心物镜光学系统的像面为弯曲像面,常规探测器无法直接接收光学系统的图像,因此有必要采取技术措施将弯曲像面展平。

2.1 光纤传像模块设计

光纤束是把许多单根光纤用胶紧密地粘贴在一起,做成不同长度或者不同截面形状与大小的光学元件^[12],既可以用来传递光能也可用来传递图像。作为传像束时,每根光纤的输入和输出端在几何上一一对应,每一根光导纤维传递一个像元,输入端的图像就被光纤束取样后传输到输出端,从而起到传像作用。与传统光学元件相比,具有使用空间自由度大、易于实现复杂空间结构的图像传递进而优化整机技术性能等特点。因此,针对同心物镜光学系统存在的弯曲像面的问题,设计使用光纤束将同心物镜光学系统的弯曲像面展平,具体实现原理如图 4 所示,通过将光纤束输出图像端加工成平面以耦合常规探测器,将光纤束接收图像端加工成球面以耦合同心物镜,达到将弯曲像面展平的目的。根据光学系统及探测器的参数,由几何位置关系确定了光纤束的布局,如图 5 所示。

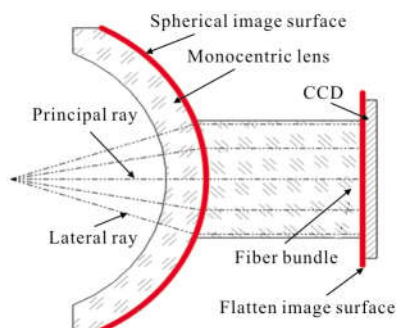


图 4 光纤块与同心物镜耦合光学原理图

Fig.4 Schematic diagram of coupling optics between fiber blocks and monocentric lens

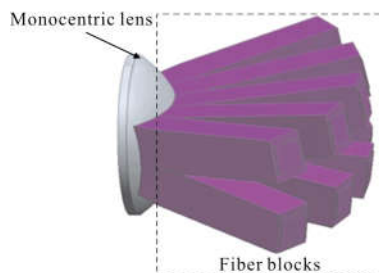


图 5 光纤块与同心物镜耦合布局

Fig.5 Coupling layout between fiber blocks and monocentric lens

根据给定的正弦振动条件^[13](如图 6 所示),计算没有支撑时,耦合光纤的同心物镜应力分布。结果如图 7 所示,最大应力值为 8.98 MPa,超过了镜片弹性强度的经验值,会发生应力失效。

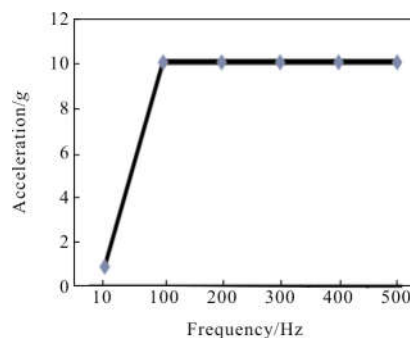


图 6 正弦振动条件

Fig.6 Sinusoidal vibration condition

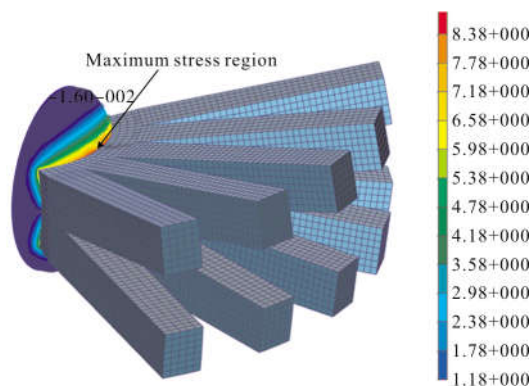


图 7 耦合光纤的同心物镜应力云图

Fig.7 Stress distribution of the monocentric lens coupled fiber blocks

2.2 材料选择

材料的选择是结构设计的一个重要过程,对于光学结构的设计通常需要优先考虑材料的刚度和热稳定性,以便能够在热及动力学环境中保持光学元件的位置精度和光学表面面型。常用的光机结构材料如表 3 所示。

为了满足光学性能指标,耦合光纤的同心物镜镜厚比偏小,容易变形,此外天基望远镜的正常工作环境温度为 $(22\pm 2)^\circ$,因此要求支撑结构材料的热膨胀系数与物镜材料相近并且还要具有较高的结构稳定性。通过比较,钛合金热膨胀系数和光学玻璃较为近似,并且具有合适的刚度和密度、较高的韧性和屈服强度。综合国内外其他光学元件支撑结构设计的

表 3 常用光机结构材料的性能表

Tab.3 Performance table of common optical structure materials

Materials	E/GPa	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	ν	CTE/ppm·C	$K/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$C_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
2A12	68	2 700	0.33	23.6	167	960
Be	287	1 850	0.08	11.3	216	1 820
TC4	114	4 430	0.31	808	7.3	522
304	193	8 000	0.27	14.7	16.2	477
Invar	141	8 050	0.36	1.4	10.4	515
SiC	466	3 210	0.21	2.4	146	700

经验,选取钛合金作为支撑结构材料。

2.3 支撑结构方案设计

根据光纤传像模块与物镜的相对位置关系来指导支撑结构的设计。首先,考虑到物镜及其镜座与光纤模块支撑结构等的装配顺序及光纤传像模块的外包络尺寸及其所需的间隙来确定支撑结构的内部构型及尺寸参数;其次,根据每个光纤束的长度及方向确定支撑结构与光纤束安装接口构型及位置;最后,设计了一个翻边结构,作为与物镜镜座的安装接口,初始结构如图 8 所示。

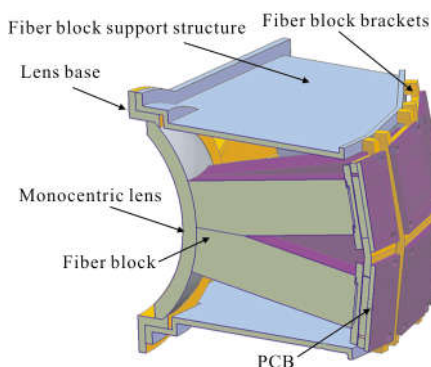


图 8 初始光纤传像模块支撑结构图

Fig.8 Initial support structure of the fiber block

3 光纤传像模块支撑结构集成优化

3.1 优化技术方案

光纤传像模块支撑结构的优化采用拓扑优化和参数优化相结合的方式。首先,通过拓扑优化技术来确定初始支撑结构(图 8)加强筋的分布;其次,在拓扑优化的基础上,以结构基频和动力学载荷下的同心物镜惯性强度为优化约束对加强筋的截面参数进行优化。整个优化技术方案如图 9 所示。

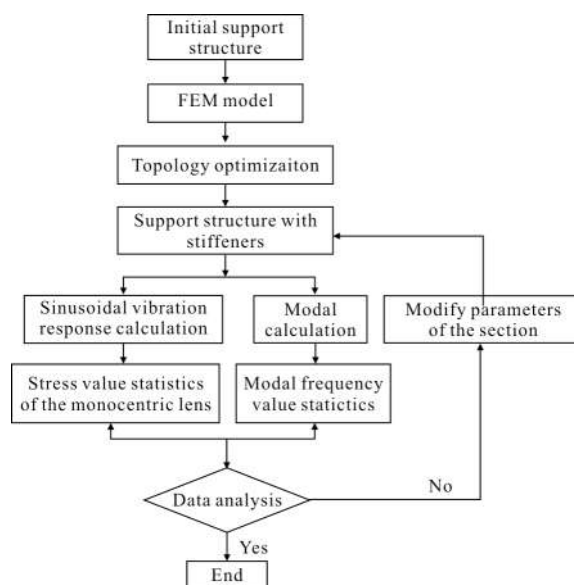


图 9 光纤传像模块支撑结构优化技术方案

Fig.9 Optimization scheme of the support structure for fiber blocks

3.2 支撑结构加强筋布局优化

为了获得支撑结构加强筋的最优分布,采用拓扑优化技术对支撑结构主承力部分(图 10 中优化区域)进行计算。

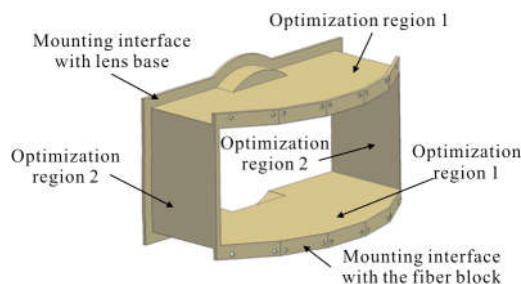


图 10 光纤传像模块支撑结构拓扑优化方案

Fig.10 Topology optimization scheme of the support structure for fiber blocks

首先,选择拓扑优化的理论模型,为了使拓扑优化结果更加合理及材料分布边界更加分明,对结构的前五阶频率按照项目要求进行约束,理论模型如下^[14]:

$$\begin{aligned} &\text{Find: } x=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i)^T \in R^T, i=1, \dots, N \\ &\text{Minimize: Volume}(x) \\ &\text{Subject to:} \\ &\quad f_1 \geq 400 \\ &\quad f_2 \geq 600 \\ &\quad f_3 \geq 800 \\ &\quad f_4 \geq 1\ 000 \\ &\quad f_5 \geq 1\ 200 \\ &\quad 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_i \leq \rho_{\max} \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为单元相对密度; N 为离散结构单元总数; $\text{Volume}(x)$ 为优化区域体积; f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 为结构的前五阶模态频率; ρ_{\min} 和 ρ_{\max} 分别为单元最小和最小相对密度。

其次,选择有限元建模方案(如图 11 所示)。考虑到优化区域的结构为板式结构以及计算速度的影响,有限元模型以 shell 单元为主。

最后,根据优化模型(3),借助软件 OptiStruct 对支撑结构的加强筋分布进行计算,结果如图 12 所

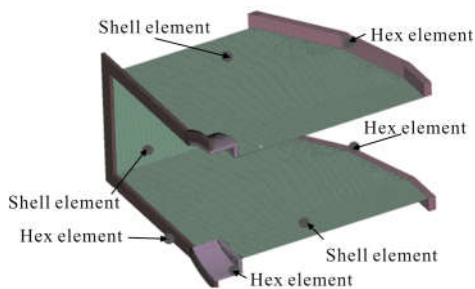


图 11 支撑结构有限元模型

Fig.11 FEM model of the support structure

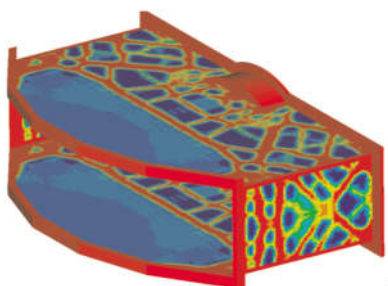


图 12 支撑结构加强筋分布计算结果

Fig.12 Calculation results of the stiffener distribution of the support structure

示,图中红色区域为加强筋。

3.3 基于结构基频和惰性强度的集成优化模型

为了降低同心物镜的应力集中度以达到保证工作寿命的目的,以结构基频和同心物镜惰性强度为优化约束对光纤模块支撑结构加强筋截面参数进行优化,因此,需建立一个集成模态计算工况和 X、Y、Z 三向正弦振动计算工况的优化模型。

(1) 设计变量

对光纤传像模块支撑结构的加强筋进行分组,以实现加强筋截面的参数化。理论上,加强筋分的组越多越好,优化结果也更好。但是综合考虑加强筋实际加工工艺、优化模型计算量以及拓扑优化计算结果等可将加强筋划分为 10 个组,划分方式如图 13 所示,表 4 为对各组加强筋截面参数初始值、描述及取值范围^[15]。

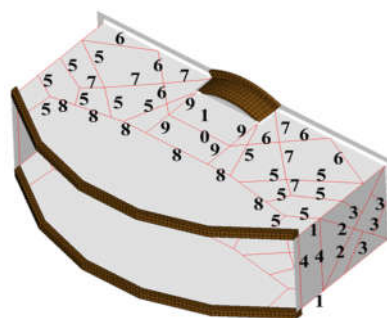


图 13 支撑结构加强筋分组

Fig.13 Groups of stiffeners of the support structure

表 4 光纤传像模块支撑结构加强筋各分组参数

Tab.4 Initial parameters of grouped stiffeners of the fiber block support structure

Variable	Initial value/mm	Feasible interval/mm
L1/W1	2.5/3.5	1-10
L2/W2	2.5/3.5	1-10
L3/W3	2.5/3.5	1-10
L4/W4	2.5/3.5	1-10
L5/W5	2.5/3.5	1-10
L6/W6	2.5/3.5	1-10
L7/W7	2.5/3.5	1-10
L8/W8	2.5/3.5	1-10
L9/W9	2.5/3.5	1-10
L10/W10	2.5/3.5	1-10

L1-L10: Length of the stiffener section; W1-W10: Width of the stiffener section.

(2) 优化约束

优化约束为在给定的振动条件下耦合光纤的物镜最大应力值小于等于应力失效的惰性强度值 6.9 MPa; 结构基频大于等于拓扑完成后的频率值 400 Hz。

(3) 目标函数

以整个光纤传像模块支撑结构质量最小为优化目标, 以达到降低结构质量的目的。

光纤传像模块支撑结构的优化过程主要包括对

以支撑结构各组加强筋截面尺寸为参数的 20 个设计变量的更新、支撑结构质量的统计、支撑结构动力学计算和模态计算、物镜最大应力值统计以及最优结果的判定。针对上述优化问题, 采用基于 isight 集成优化分析平台并联合 patran、nastran 以及数据处理插件的技术方案来实现, 整个优化流程如图 14 所示。通过不同学科间的接口数据传递, 构建了设计变量更新、有限元模型更新、支撑结构、支撑结构动力学计算、物镜最大应力值统计以及优化结果的判定

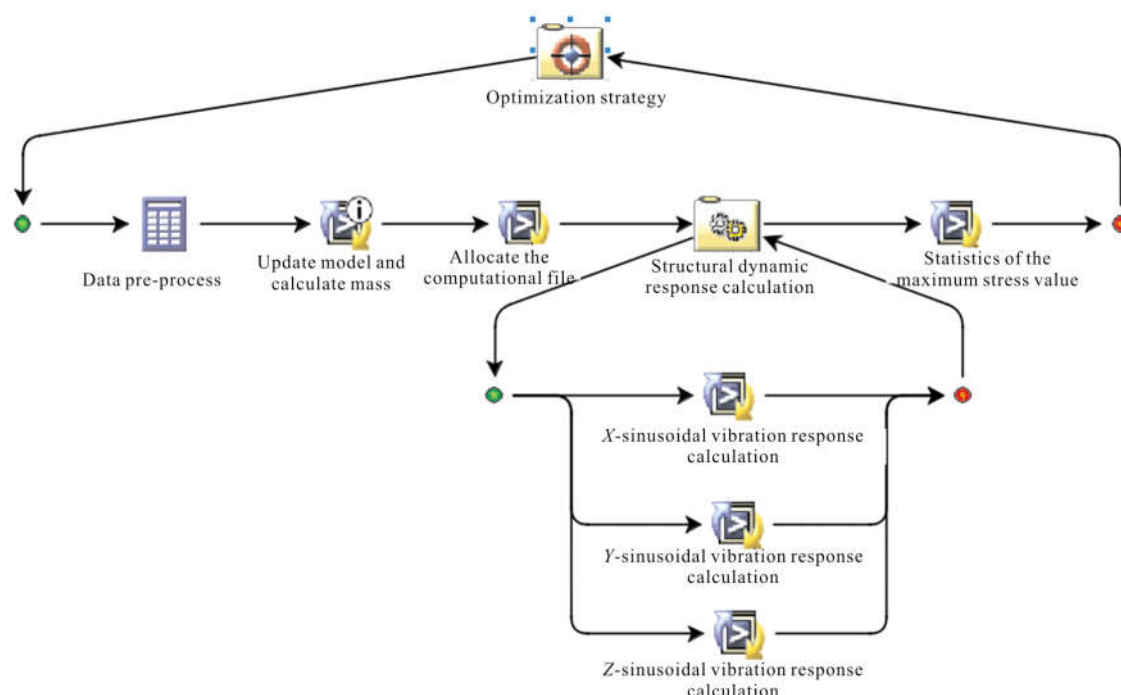


图 14 集成优化流程

Fig.14 Flow of the integrated optimization

的优化循环回路, 实现了求解计算的自动化, 为快速获得最优截面参数提供了基础, 整个有限元模型如图 15 所示。

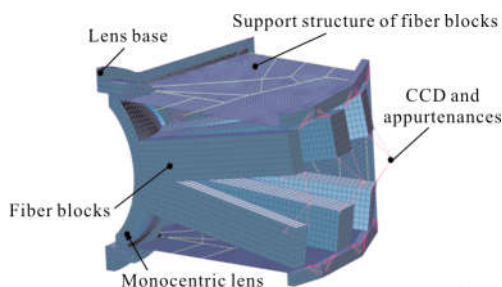


图 15 整体有限元模型

Fig.15 FEM model of the whole structure

3.4 寻优策略

在光纤传像模块支撑结构优化的过程中, 由于设计变量较多, 优化模型较为复杂, 计算量较大, 因此选用适应性较强的全局优化算法——岛遗传算法 (Multi-island Genetic Algorithm, MIGA) 对计算结果进行寻优。该算法只评价设计点, 不计算函数梯度, 有较强的适应性, 并且能够求全局最优解, 避免了局部区域的搜索, 特别适合复杂优化问题的求解^[16]。

3.5 优化结果分析

优化后, 支撑结构的各分组加强筋截面参数如表 5 所示, 相比初始支撑结构, 在结构模态频率和耦合光纤同心物镜的惰性强度满足优化的情况下, 优

化后的结构质量减少了 11.4%。优化过程中,支撑结构质量的变化范围随着迭代次数的增加而逐渐变小,说明优化目标趋于收敛,算法有效,如图 16 所示。

表 5 光纤传像模块支撑结构加强筋截面参数优化结果

Tab.5 Optimal results of the stiffener section parameter of the fiber block support structure

Variable	Optimal value/mm	Variable	Optimal value/mm
L1	3.0	W1	1.0
L2	1.0	W2	3.4
L3	1.7	W3	2.7
L4	4.0	W4	1.0
L5	3.4	W5	1.4
L6	2.5	W6	1.6
L7	1.0	W7	4.0
L8	1.0	W8	1.8
L9	3.8	W9	4.2
L10	3.2	W10	5.4

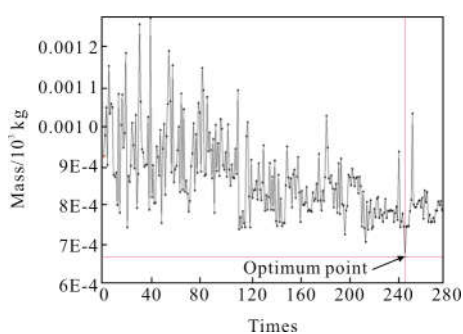


图 16 迭代优化过程

Fig.16 History of the iterative optimization

4 结论

为了使光纤传像模块支撑结构在降低质量的同时保证物镜的工作寿命,文中提出了一种以结构基频和光学玻璃惰性强度为约束的优化方法。首先,根据系统参数,设计了光纤传像模块,并设计了初始结构;其次,以结构前五阶基频为约束进行了拓扑优化,得到了支撑结构加强筋的最佳分布;最后,在拓扑优化的基础上,集成模态工况和正弦振动工况,以结构基频和光学玻璃惰性强度为约束,

借助 isight 集成优化计算平台对优化模型进行了求解。计算结果表明:在惰性强度和结构基频满足优化约束的情况下,支撑结构质量减少了 11.4%,达到了减重效果,说明了以结构基频和光学玻璃惰性强度为优化约束的可行性。提出的优化方法对于其他类似光学结构的设计具有普遍的参考价值。

参考文献:

- [1] Gu Zhiyuan, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, et al. Space surveillance telescope with large field of view and high resolution based on monocentric lens [C]// Symposium of the Second Space Object and Debris Monitoring, Cleanup Technology and Applications, 2015. (in Chinese)
顾志远, 颜昌翔, 张军强, 等. 基于同心物镜结构的超大视场高分辨率空间监视望远镜 [C]//第二届空间目标与碎片监测、清理技术及应用学术研讨会论文集, 2015.
- [2] Cao Yuyan, Wang Zhichen, Zhou Chao, et al. General modeling and optimal design of flexure supporting structure for optical components [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2792-2803. (in Chinese)
曹玉岩, 王志臣, 周超, 等. 光学元件挠性支撑结构广义建模及优化设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2792-2803.
- [3] Hu Rui. Topology optimization-based design method of space mirror and flexible support structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
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.
- [4] Joeleff Fitzsimmons, Alexis Hill. Design and analysis of a large-diameter precision optical mount for NFIRAOS [C]//Proc SPIE, 2014, 9147: 91478U.
- [5] Isaac Weingrod, Chou Catherine Y, Buck Holmes, et al. Design of bipod flexure mounts for the IRIS Spectrometer[C]//Proc SPIE, 2013, 8836: 8836Q.
- [6] Johnson A R, Pessin J, Ford J E, et al. Optomechanical design with wide field of view fiber-coupled image systems[C]//OSA Frontiers in Optics Meeting, 2014.
- [7] Greivenkamp John E. Field Guide to Opto-mechanical Design and Analysis[M]. USA: SPIE Press, 2012.
- [8] Xiong Changxin, Li Qiantao. Strength design approaches to optical glass[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(5): 115-118. (in Chinese)
熊长新, 李钱陶. 光学玻璃的强度设计方法 [J]. *光学与光*

- 电技术, 2006, 4(5): 115-118.
- [9] Zhu Bofang. The Finite Element Method Theory and Applications [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese)
朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Integrated Optomechanical Analysis [M]. USA: SPIE Press, 2002.
- [11] Fuller E R, Freiman S W, Quinn J B, et al. Fracure mechanics approach to the design fo glass aircraft windows: a case study[C]//Proc SPIE, 1994, 2286: 419-430.
- [12] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] Yi Rongying. Crack growth behavior of glass materials under vibration conditions by numerical simulation and experiment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- 尹荣颖. 振动条件下玻璃材料裂纹扩展行为的数值模拟及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [14] Hong Qingquan, Zhao Kang, Zhang Pan. Theoretical Foundation and Engineering Applications of OptiStruct & HyperStudy [M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese)
洪清泉, 赵康, 张攀. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [15] Yang Shuai, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Design and optimization of carbon fiber framework for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 697-704. (in Chinese)
杨帅, 沙魏, 陈长征, 等. 空间相机碳纤维框架的设计与优化[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(3): 697-704.
- [16] Jiang Xin, Fang Liqiao, Li Ming. Detailed Explanation of Isight Application Cases and Parameterization Theory [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012. (in Chinese)
姜欣, 方立桥, 李明. Isight 参数化理论与实例详解 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.