

## 基于拓扑优化的激光雷达光路结构设计方法

柳泽政, 陈万前, 刘杰\*, 杜立彬\*\*, 吕婧

山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590

**摘要** 激光雷达的光路设计会直接影响回波信号在透射或反射过程中的衰减情况,进而影响雷达的性能。为了提高激光雷达光路整体结构的紧凑性,减小重量并保证刚度与强度,在设计过程中对激光雷达光路结构进行拓扑参数优化设计。通过定义激光发射模块和光学接收模块的设计域、设计载荷、约束和边界条件,采用固体各向同性材料惩罚(SIMP)插值法建立模型,求解分析光路结构函数和灵敏度,使用序列二次规划(SQP)优化算法进行光路设计变量的迭代更新,从而提高光路整体结构的稳定性,达到性能优化、结构紧凑的目标。

**关键词** 光学设计; 激光雷达; 光路结构; 拓扑优化; 固体各向同性材料惩罚模型; 迭代

**中图分类号** P427.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221183

## 1 引言

激光具有脉宽窄、方向性好、单色度高、对比度高优点,因而目前激光雷达已在环境监测和大气科学研究等领域成为不可或缺的监测仪器。特别地,激光雷达可根据大气中的气溶胶粒子对激光的吸收及散射特点,测量气溶胶粒子的后向散射<sup>[1]</sup>,并反演出大气气溶胶消光系数随高度的分布规律,从而得到气溶胶在大气中的垂直分布情况,并由此评估空气质量状况。

拓扑参数优化,是指基于给定的约束要求、负载要求等特性技术指标,在给定的工作区域和范围内对材料尺寸、形状结构及材料分布进行优化的方法<sup>[2]</sup>。目前,在拓扑参数优化研究中,结构和部件的计算分析取得了实质性进展,特别是通过有限元分析确定组件的最佳可能布局<sup>[3]</sup>。通过拓扑优化,即单个载荷情况下的刚度最大化(柔顺性最小化)分析,能够从均匀分布的设计域内找出材料的最优分布解。相较于传统的尺寸优化,拓扑参数优化可创造更大的结构空间域,能提供自由度更多的结构设计空间<sup>[4]</sup>,是现阶段最有前景的结构材料设计方法。

基于此,以激光雷达全光路各光学器件及连接结构作为拓扑优化的对象,将激光雷达在工作状态下的可靠性和承载能力作为约束条件,采用固体各向同性材料惩罚(SIMP)插值方法构建结构模型,并结合序列二次规划(SQP)优化算法,将复杂的非线性约束最优化问题转化为较简单的二次规划问题,从而进行求解和计算流体力学(CFD)数值模拟,再根据拓扑优化后的材料质量分布结果建立光路结构的重构模型,并将

其与初始结构模型进行对比,进而验证拓扑优化在光路结构减重和刚度增强方面的效果。

## 2 激光雷达光路结构的拓扑参数优化设计

## 2.1 模型结构

激光雷达的光路主体结构由激光发射模块和光学接收模块组成。初始光路结构如图 1 所示。

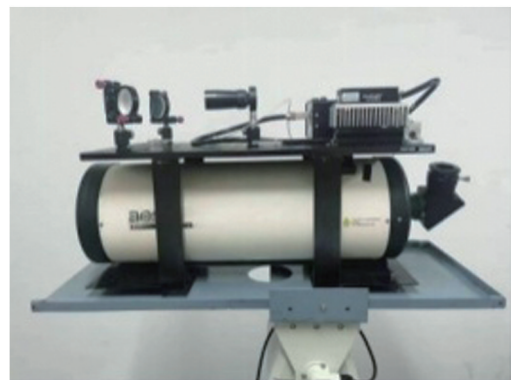


图 1 初始光路结构

Fig. 1 Initial optical path structure

激光发射模块主要包含脉冲激光器、扩束镜和发射组镜<sup>[5]</sup>。脉冲激光器以极高的重复速率发出波长为 532 nm 的激光。激光经扩束镜准直后由发射组镜反射至大气中。光学接收模块由望远镜主镜、光电倍增管(PMT)、透镜、滤光片等组成,其主要功能是接收大气回波信号<sup>[6]</sup>,并将其导入相应的后继光学通道。激光雷达探测区域内气溶胶粒子的后向激光散射进入望远镜,会先穿过小孔,经镜片准直后,再通过干涉滤光

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2022-10-05; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

通信作者: \*liujie0232@sdust.edu.cn; \*\*dulibin@sdust.edu.cn

片滤除背景光。激光雷达采用光子计数型 PMT 进行光电转换,转换后得到电信号,可反演出气溶胶在大气中的分布情况,从而有效监测空气质量状况<sup>[7]</sup>。激光雷达的激光器、扩束镜、望远镜和发射组镜等光学器件均由结构支撑体固定,虽然连接为一个有机整体,但相互之间仍会产生振动、刚度差异与稳定性变化等情况<sup>[8]</sup>,从而对激光雷达的测量精度和准确性产生影响。

### 2.2 模型建立

利用拓扑参数优化对激光雷达光路结构进行设计,可以明晰各光学器件连接体的力学传输路径<sup>[9]</sup>。在保证光学结构力学性能的前提下,在最大应力接触点对其进行优化,能节省材料,减轻整体结构质量,降低柔顺度。另外,在应力要求较低的设计域内,通过对结构进行有限元分割与重组,自由变换加强筋位置,可以使结构布局更加灵活多变,力学性能更佳<sup>[10]</sup>。拓扑参数优化流程图如图 2 所示。

拓扑参数优化发展了多种形式,包括变密度拓扑优化法、变厚度拓扑优化法、独立连续映射拓扑优化法、渐进结构拓扑优化法、均匀拓扑优化法及水平集函数拓扑优化法<sup>[11]</sup>。其中,变密度拓扑优化法即 SIMP 法通过对密度函数的定义与计算<sup>[12]</sup>,可高效方便地完成光学器件结构的材料优化重组,尤其是针对复杂、离散的光学器件连接体,该方法具有设计域不受外观形状限制和设计变量较为简单的优点<sup>[13]</sup>,能够更好地适应计算量大、函数工况设计复杂等情况,因而得到了广泛的应用。

SIMP 法采用虚拟密度场中向量  $\beta$  为设计变量,  $\chi_e$  为各离散分割小单元  $e$  的虚拟密度值。 $\beta$  中元素值为 Y 则代表有对应材料,即  $\chi_e$  值不为 0;  $\beta$  中元素值为 N 则代表没有材料,即  $\chi_e$  值为 0。使用有限元网格化数值处理法,将光路总体结构的设计域分割离散为  $n$  个小单元,光路结构连接件的密度函数相应地离散为一个  $N$  维矩阵<sup>[14]</sup>,利用虚拟密度值来表征各个单元材料质量的有无,从而体现结构内材料的密度与分布情况。SIMP 插值法示意图如图 3 所示,其中  $E$  表示弹性模量。

由虚拟密度场矩阵,可以得到材料的有限元分布表示,  $\beta$  中的元素值在 Y 和 N 之间进行分割与优化选

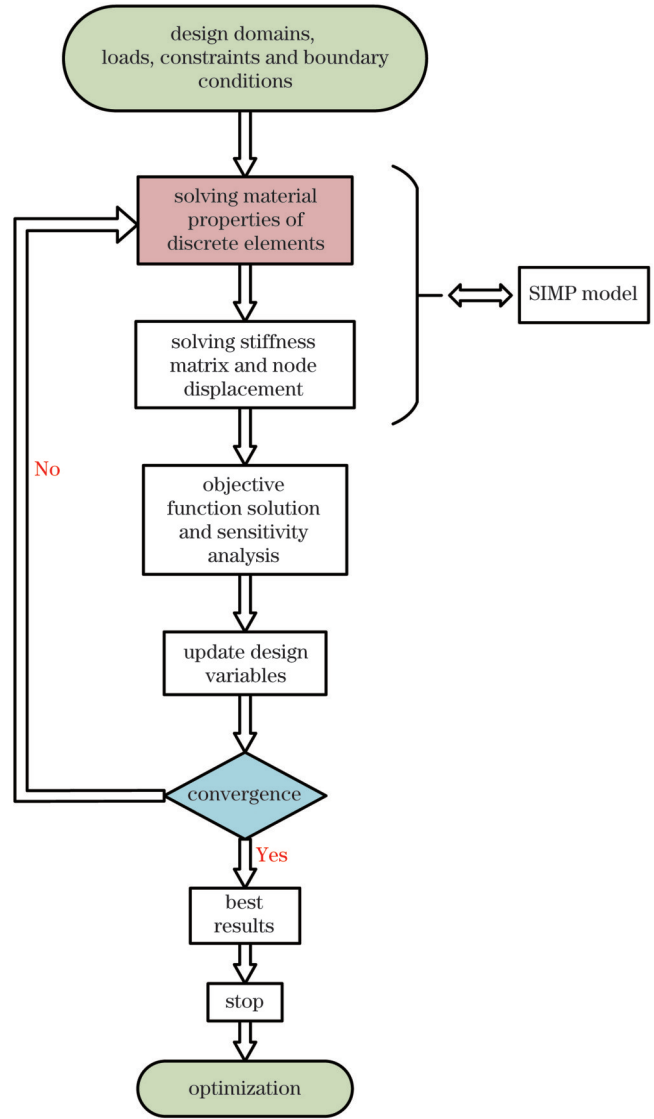


图 2 拓扑参数优化过程

Fig. 2 Topology parameter optimization process

择,为了解决参数只能双值选取的问题,在 Y 和 N 之间进行从 0 到 1 的连续取值,从而  $\beta$  也相应变为连续的设计变量<sup>[15]</sup>。虚拟密度场是一个  $N$  维矩阵,可以从中截取一个二维平面来表示三维结构的截面,从而清晰显示截面上结构域内材料的有无,如图 4 所示。

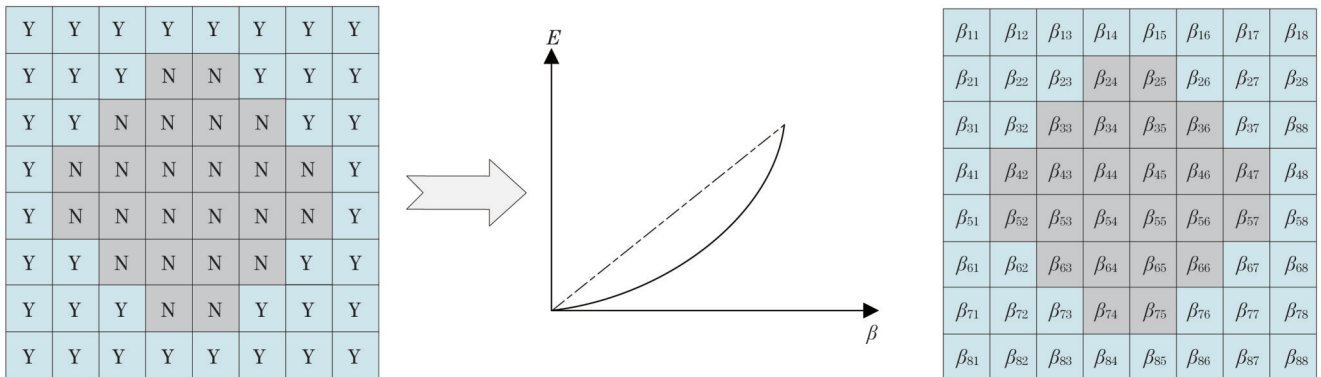


图 3 SIMP 法示意图

Fig. 3 SIMIP sketch map





图 4 虚拟密度场矩阵

Fig. 4 Pseudo density matrix

然后,应用变量尺度对柔顺度进一步约束,可以优化变量,使得参数中间值无限接近两边取值,从而完成连续拓扑优化。虚拟密度场可写作

$$X_e = \chi_e \rho_0, \quad (1)$$

式中:  $X_e$  为单元相比密度;  $\rho_0$  为单元本身密度;  $\chi_e$  为离散小单元格虚拟密度值,若  $\chi_e$  值为 1,则保留材料,若  $\chi_e$  值为 0,则删除材料。

但是,由于虚拟密度场内函数  $\rho$  不是连续函数,所以我们设计连续参数变量  $\rho$ :

$$K_e = (\chi_e)^\rho K_0, \quad (2)$$

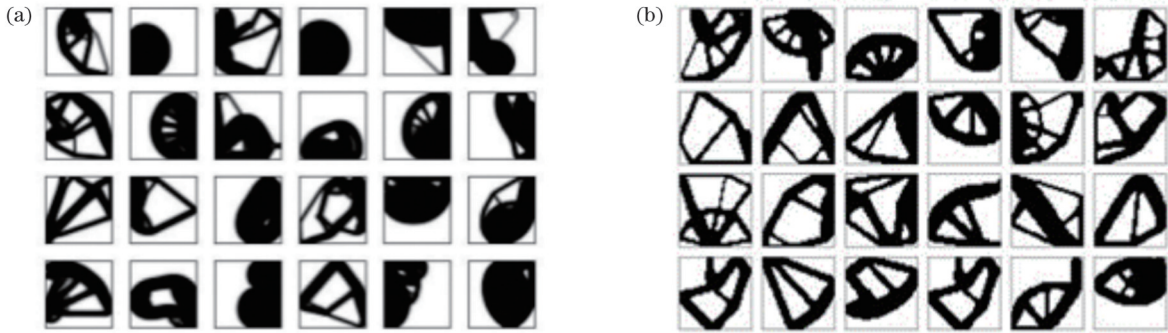


图 5 光路支撑结构细节点。(a) 迭代 9 次拓扑细节点; (b) 迭代 16 次拓扑细节点

Fig. 5 Optical path structure details. (a) Topology details after 9 iterations; (b) topology details after 16 iterations

由于结构纵横方向形成了疏网格的加筋形式,应力形变时将首先发生局部屈曲,相比于原始光路支撑体结构首先发生整体屈曲的情况,优化后的结构更不容易发生整体塌缩,具有更高的可靠性。针对光路支撑体骨架结构杆件数量多、难以直接进行拓扑优化的问题<sup>[17]</sup>,使用先拆分再组合的拓扑优化思想,即先对结构中各典型桁架进行拓扑优化分析,如图 6 所示,再将优化后的典型桁架拼装,实现结构的整体拓扑优化。

对于固有光路结构,设计最佳拓扑布局的关键是确定构件的最佳数量、位置和紧凑性排布。采用 SIMP 插值方法构建结构模型,可将离散问题转换为连续变量问题。然而,由于复合材料的结构子域如此之大,很难将整体结构拓扑可视化,也很难设计出简化的次优 0-1 材料分布方案。考虑如何在拓扑优化问题

式中:  $K_0$  为光路初始结构单元刚度矩阵;  $K_e$  为光路优化结构单元刚度矩阵。

结构的应变能函数为

$$C = F^T U = U^T K U, \quad (3)$$

式中:  $U$  为光路结构控制节点的移动向量;  $F$  为光路结构连接节点的负载向量;  $C$  为光路结构柔顺度值;  $K$  为光路结构刚度矩阵。当柔顺度最小时,结构刚度最大。

在拓扑优化中,应用设计参数化方法,将有限元离散结构每个设计域中的材料都建模为具有适当刚度特性的各向异性材料<sup>[16]</sup>。在此不讨论使用这种设计参数化的约束函数类型,只给出拓扑优化问题的一般公式。

综合以上分析,建立出光路结构拓扑参数优化的数学模型:

$$\begin{aligned} \text{Find: } & X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \text{Minimize: } & C = F^T U, \\ \text{Subject to: } & f = \frac{V_0 - V_1}{V}, \\ & 0 < X_{\min} \leq X_e \leq X_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $V$  为初始体积;  $V_0$  为参数变量取 1 时的体积;  $V_1$  为参数变量小于 1 时的体积;  $f$  为光路的体积比;  $X_{\min}$  为单元相比密度最小值;  $X_{\max}$  为单元相比密度最大值。

使用 SIMP 法建立拓扑参数优化光路支撑结构细节点,如图 5 所示。

的公式中引入适当的限制,从而使 0-1 拓扑设计更易于制造,经有限元离散<sup>[18]</sup>后形成大规模 0-1 规划情况,引入连续函数建立到 0~1 之间的映射关系,便得到光路结构支撑体的结构细节点,如图 5 所示。在迭代过程中,采用二次规划方式作为整个光路结构拓扑优化过程的优选算法<sup>[19]</sup>,即在每轮迭代中都会生成新的光路结构设计变量,并用作检验柔顺度值的输入变量,然后再统计柔顺度和灵敏度值,直至符合收敛要求,最终得到基于 SIMP 法的连续光路结构体拓扑优化模型:

$$\begin{aligned} \text{Find: } & \rho_e, \\ \text{min: } & C(\rho) = F^T U = U^T K U = \sum_{e=1}^n u_e k_e u_e, \\ \text{s.t. } & K U = F, \end{aligned}$$

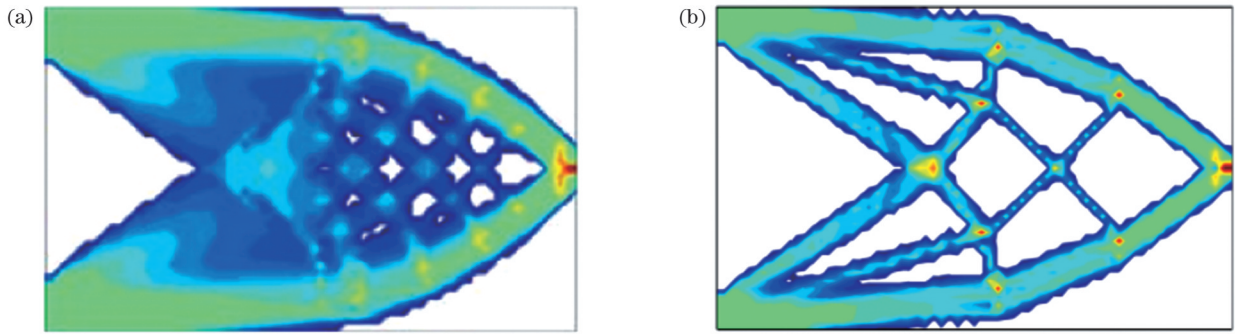


图 6 光路支撑结构拓扑优化骨架。(a)迭代 9 次;(b)迭代 16 次

Fig. 6 Skeleton of optical path supporting structure after topology optimization. (a) After 9 iterations; (b) after 16 iterations

$$V = V^* \cdot V_0 = \sum_{e=1}^n \rho_e V_e, \quad (5)$$

$$0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1,$$

式中:  $V$  为光路结构初始材料体积;  $V^*$  为光路结构优化后材料体积;  $n$  为结构离散小单元总数目;  $U$  为光路结构位移矢量;  $u$  为分割小单元位移矢量;  $F$  为光路结构受力矢量;  $\rho_e$  为分割小单元的密度;  $\rho_{\min}$  为小单元密度最小极限值;  $k_e$  为单元刚度;  $u_e$  为分割小单元位移矢量。

### 2.3 拓扑优化光路的建立与分析

结构拓扑优化可以处理各种不同类型的设计目标和约束。在连续体拓扑优化中,外部边界和内部边界的形状以及内部孔的数量,可根据预定义的设计目标同时进行优化。通过对结构质量、体积和应力施加约束限制,采用 SIMP 模型来优化光学支撑器件。

通过对光学器件连接支撑体结构进行拓扑优化,可得到轻量化的结构模型。光路连接体结构最初质量为 68 kg。将包含主镜在内的光路全结构作为拓扑参数优化区域。主镜结构为对称性构造,故优化设计中采用了对称约束。通过此拓扑设计,在支持孔与通光孔附近的三角形轻量化筋单位被保留,距支持孔较远的部分单位则被消除,从而实现了超轻量化光学器件支撑结构的拓扑参数优化构造。在以往光路结构中,当重力方向与光轴空间方位保持平行时<sup>[20]</sup>,将使主镜镜面的形变变大,故进一步优化约束,使在主镜镜面节点的像空间方位上产生的最大偏移不大于 66 nm,并且将主镜的整体质量约束为 20%~35%,从而使以

主镜为中心的结构的柔顺度最小化。

在主镜望远镜的下部采用中空弯曲梁固定安装的方法,能够降低结构高度,增加光路连接处的结构强度,通过加强筋将重量压力传送至中心体上,降低重心高度。通过拓扑方法合理优化了望远镜主镜下方的加强筋<sup>[21]</sup>,可在有效保证加强筋加固望远镜结构稳定性的前提下减轻质量、减少形变。优化后的双层光路结构支撑体如图 7 所示。

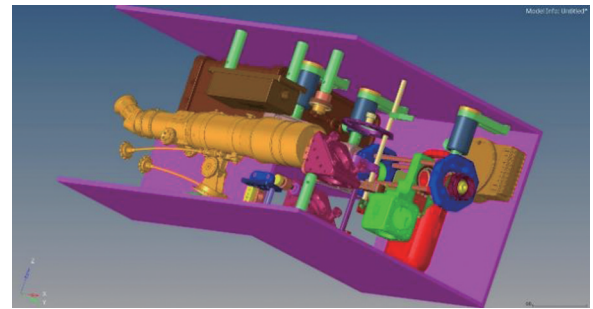


图 7 优化双层结构

Fig. 7 Optimized double-layer structure

拓扑参数优化需要选择合适的约束条件,包括应力、体积和质量。对设计域内连接体结构进行限制<sup>[22]</sup>,从而优化参数变量。根据机身重量和接触面积计算可得,铝合金材料可在 110 MPa 应力的工况下正常工作,所以选择 68 MPa 作为初始约束条件,为之后的拓扑优化留出足够余地。选取 30% 的光路连接支撑件体积作为体积比限制参量,优化结果显示。经过 16 步迭代后条件参数收敛,拓扑优化得到的光路结构如图 8 所

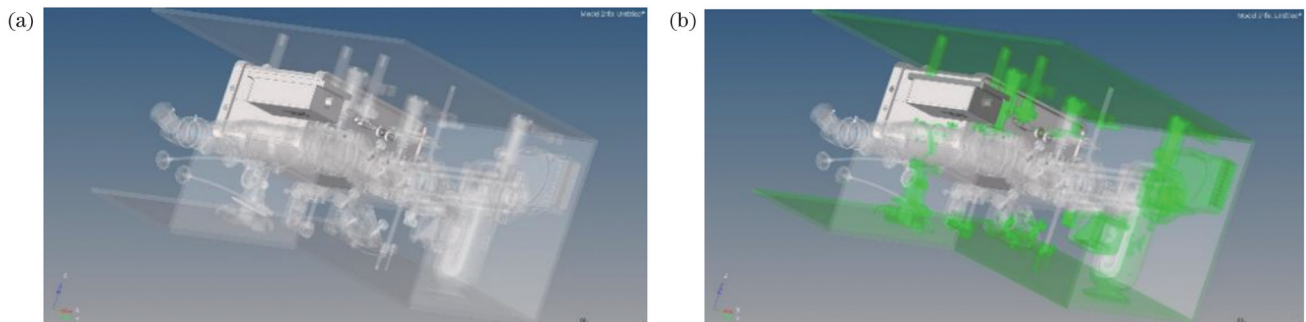


图 8 光路支撑体结构网格划分。(a)整体结构;(b)确定网格划分的设计域

Fig. 8 Meshing of light path support structure. (a) Overall structure; (b) determination of design domain of meshing



示,此时整体质量降为 46 kg。

虚拟密度矩阵会根据体积比和应力的限制约束,在满足运转载荷的前提下,设计最佳的力学传导路径和布局结构<sup>[23]</sup>。在规定的有限元网格设计域内,通过将材料布置在最有效的支撑路径上,来减少光路结构

的柔顺度,从而达到优化目的。网格划分后的有限元分析结果如图 9 所示。经有限元分析后得到优化结构的虚拟密度场矩阵,矩阵点的分布即是应对相应附加载荷时,支撑体内部结构密度最优设计方案,根据矩阵点的分布设计支撑体结构细节。

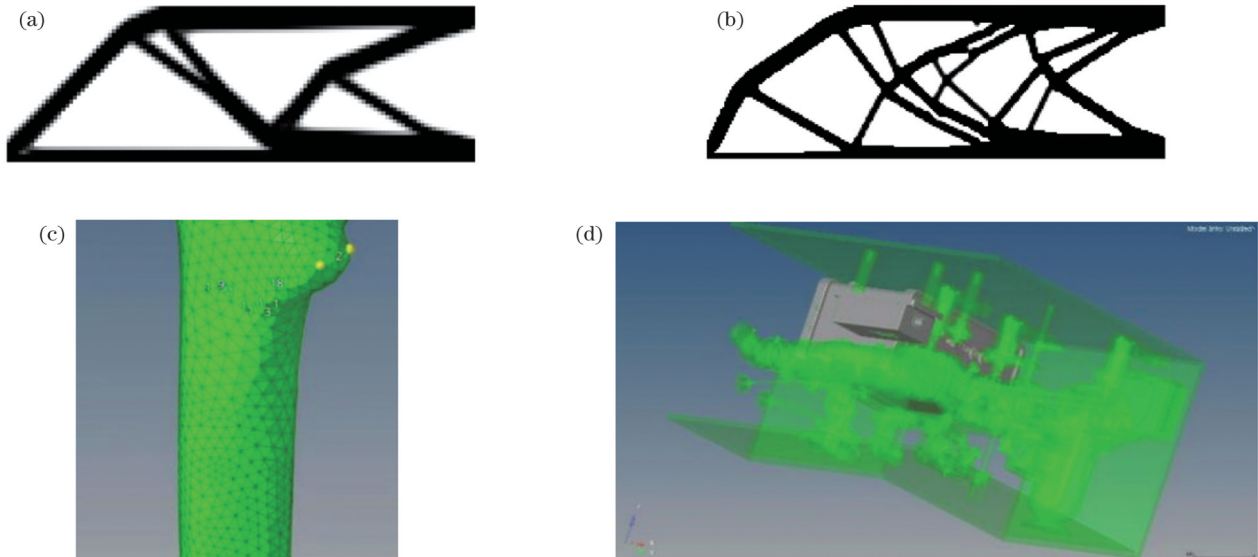


图 9 结构有限元分析结果。(a)优化后骨架细节节点;(b)拓扑优化后细节节点的材料分布;(c)细节部位网格标号与划分;(d)整体结构网格划分

Fig. 9 Structural finite element analysis. (a) Optimized skeleton details; (b) material distribution of details after topology optimization; (c) grid marking and meshing of details; (d) meshing of overall structure

在拓扑参数优化过程中,发现只需要迭代 19 步就达到了初始的应力设计要求,表示其体积比限制的条件约束裕度过大,应收紧限制条件、增加迭代次数,以获得更清晰的结构细节节点,故将体积比限制参量改为

18% 光路连接支撑件体积,以新的限制参量再次进行拓扑参数优化。此次优化过程中主镜支撑体有限元网格细节优化如图 10 所示,在 26 步时条件参数收敛,达到最低柔顺度目标。

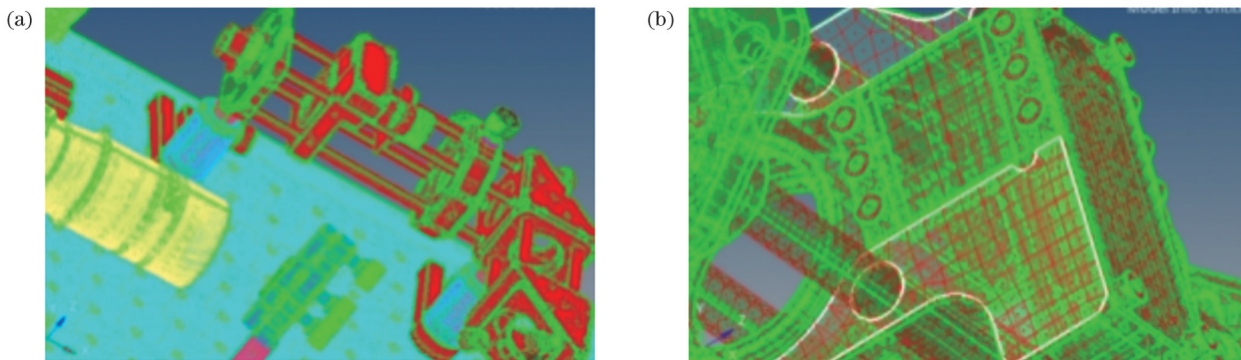


图 10 主镜支撑体优化细节结构。(a)光学镜片支撑结构;(b)放大支撑结构网格

Fig. 10 Optimization of detailed structure of main mirror support. (a) Support structure for optical lenses; (b) enlarged view of support structure grid

## 2.4 结构重构

拓扑优化设计得到的骨架仅为传递载荷的最佳路径设计,要进行完整的光路结构设计还需要在骨架的基础上进行结构重构<sup>[24]</sup>。光学器件支撑体结构重构的原则是以骨架为基础,保留支撑杆并为其安装加强筋,同时保证光路的结构完整性。以此为基础进行结构重构后,设计出的光学器件支撑体结构质量降为 39 kg。

对拓扑参数优化后的重构模型进行结构分析,可以发现传递载荷路径中光学镜面支撑架与传动主轴都是实心结构体,因为光学镜面质量较轻,不易形变振动,所以此位置应力的传动支撑效率不高。对该结构进行中空改进,在满足镜面支撑体积的条件下删除多余的内部结构,实现中空模型的设计概念,如图 11 所示。采用弯曲梁的构造方法<sup>[25]</sup>能够降低整体结构高

度,并增加交接点的结构强度,以提高刚性,同时通过辅助梁的加强筋可以增加传动方向,使压力传导至中心体位置,降低重心高度,增强稳定性。

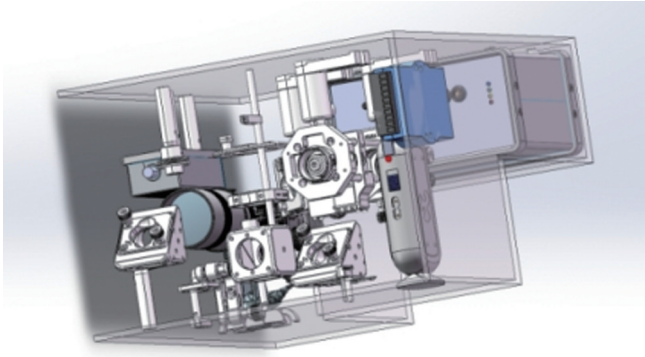


图 11 光学器件支撑体最终构型  
Fig. 11 Final configuration of optical device support

### 3 优化性能分析与讨论

性能优化的具体流程如图 12 所示。其中对于优化结果的分析,是通过柔顺度的灵敏度分析,并比较相同载荷下的体积减小和质量减轻情况以及相同体积、质量下的刚度强度增加情况,验证拓扑优化后的光路支撑体性能。

按照优化过程,在初始拓扑优化完成后采用序列二次规划(SQP)梯度优选算法<sup>[26]</sup>,根据光路器件结构和光路限制要求,对于设计变量的层次梯度,通过不断替换迭代调整<sup>[27]</sup>得到优化骨架,如图 13 所示。

针对此类结构的加工,目前 3D 打印技术已经成熟,在技术实现、整体性能和经济成本上都是可行的。加工的拓扑优化实物模型如图 14 所示。在实物的实际试验中,支撑体质量大幅减轻,稳定性良好,验证了设计的合理性。传力路径清晰,使结构中内力更为均匀,负

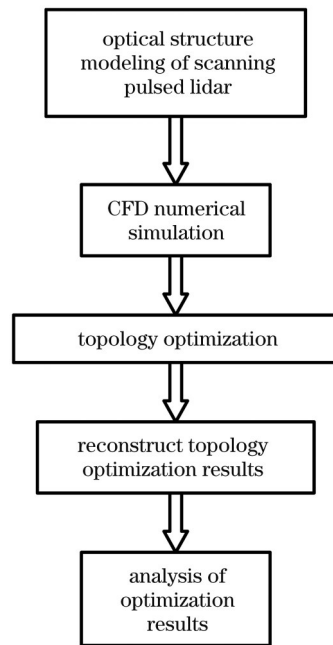


图 12 性能优化流程图  
Fig. 12 Flow chart of performance optimization



图 13 迭代后优化骨架  
Fig. 13 Optimized skeleton after iteration

载最大应力小于铝合金的屈服强度,满足设计要求。

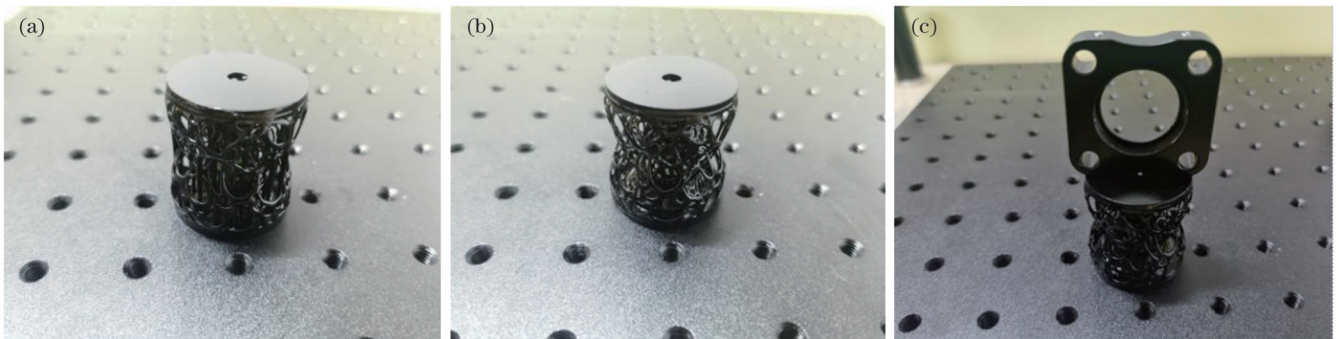


图 14 支撑光学镜片应用效果。(a)迭代 19 步后的优化结果;(b)迭代 26 步后的优化结果;(c)支撑光学镜片实际应用效果  
Fig. 14 Effects of supporting optical lens. (a) Optimization result after 19 iterations; (b) optimization result after 26 iterations; (c) effect of supporting optical lens in real application

然后再进行针对柔顺度的灵敏性分析:

$$\frac{\partial C}{\partial x_1} = \frac{\partial F^T}{\partial x_1} UC + F \frac{\partial U}{\partial x_1} \quad (6)$$

设  $F=KU$  为光路全结构的的设计变量,求导

而得:

$$\frac{\partial K}{\partial x_1} UC + K \frac{\partial U}{\partial x_1} = \frac{\partial F}{\partial x_1} \quad (7)$$

两式联立可得:



$$\frac{\partial C}{\partial x_1} = \frac{\partial F^T}{\partial x_1} UC + U^T \frac{\partial F}{\partial x_1} - U^T \frac{\partial K}{\partial x_1} U. \quad (8)$$

再结合 SIMP 插值模型,得:

$$\begin{cases} \frac{\partial K}{\partial x_1} = \frac{\partial K_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \eta}{\partial x_1} \frac{1}{\eta} K_i = \frac{\rho}{x_i} K \\ \frac{\partial C}{\partial x_i} = -U^T \frac{\partial K}{\partial x_i} U = -\frac{\partial \eta_c}{\partial x_i} \frac{1}{\eta_c} U_i^T K_{si} U_i = -\frac{\rho}{x_i} C_i \end{cases}, (9)$$

式中: $\eta$ 为 SIMP 法转换效率; $\eta_c$ 为离散单元 SIMP 法转换效率。

同样地,可以得到虚拟密度设计变量中蒙皮柔顺度(即表面柔顺度)的灵敏度:

$$\frac{\partial C_s}{\partial x_i} = -U^T \frac{\partial K_s}{\partial x_i} U = -\frac{\partial \eta_c}{\partial x_i} \frac{1}{\eta_c} U_i^T K_{si} U_i = -\frac{\rho}{x_i} C_{si}. \quad (10)$$

式中: $C_s$ 为蒙皮柔顺度; $K_s$ 为蒙皮刚度矩阵。

优化后的质量由初始重构模型的 39 kg 降低至 31.5 kg,减少了 19.23%,在满足运转载荷的应力要求的前提下<sup>[28]</sup>,有效减轻了激光雷达支撑负担。二层叠加光路架构使体积减少为原来的 52%,如图 15 优化效果曲线所示。此时的光路结构质量减轻,体积缩小,应力传导路径布置得当,材料分布在合适位置。

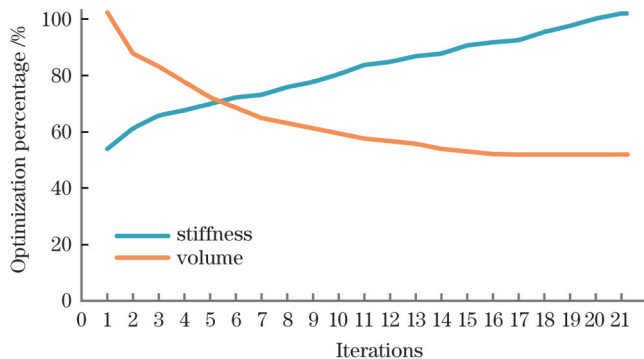


图 15 优化效果曲线

Fig. 15 Curve of optimization effect

## 4 结 论

本文应用虚拟密度拓扑参数优化法,对激光雷达光学器件支撑体进行优化设计,在刚度强度满足运行条件的约束下,能够实现质量减轻、体积缩小、应力传导路径布置得当、材料分布合适的效果。优化后的中空梁等光学器件支撑结构骨架明晰,适用于需要经常移动的车载、机载等野外监测活动。

通过改变应力与体积比等限制约束条件,根据拓扑优化迭代次数分析设计参数。通过调整光路机械结构的位置与材料,在质量减轻和柔顺度减少等方面验证了光路全结构拓扑优化结果。在相等质量时,重构模型相比初始模型的柔顺度降低了 48.20%;在相同柔顺度时,重构模型相比初始模型的质量减轻了 19.23%,验证了拓扑优化的效果。

设计重构时,应针对结构的特性进行调整,并在达到强度设计要求的前提下逐步降低结构质量。根据设计结果进行光路结构重构,并通过尺度优化设计和优化前后结构细节节点的比较来验证拓扑设计有效性,进一步证明了新光路结构具有减重和提高刚性的作用。通过对光学器件支撑结构的减重可减少因过载而产生的额外振动,提高稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] 刘智深, 陈震, 于翠荣, 等. 多普勒测风激光雷达从车载到星载[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(2): 126-138.  
Liu Z S, Chen Z, Yu C R, et al. Doppler wind lidar: from vehicle-mounted to space-borne[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(2): 126-138.
- [2] Wu C Q, Yang C, Xiao Q, et al. Topology optimization of porous solid structures for heat transfer and flow channels in reactors with fluid-solid reaction coupling[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 181: 107771.
- [3] Zhu J H, Zhou H, Wang C, et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(1): 91-110.
- [4] 赵智刚, 玄洪文, 王景冲, 等. 真空紫外 193 nm 波段固体激光器研究进展综述[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134010.  
Zhao Z G, Xuan H W, Wang J C, et al. Research progresses on vacuum-ultraviolet 193-nm band solid-state lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134010.
- [5] 李琼瑶, 扎西巴毛, 陈子阳, 等. 激光通过不同厚度的强散射介质的聚焦[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111016.  
Li Q Y, Zhaxi B M, Chen Z Y, et al. Focusing of laser through strong scattering media with different thicknesses[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111016.
- [6] 魏前明, 阮旭, 易家玉, 等. 直接液冷薄片激光器波前畸变优化研究[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2301005.  
Wei Q M, Ruan X, Yi J Y, et al. Optimization of wavefront distortion of direct liquid-cooled thin-disk laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2301005.
- [7] 杨叶城, 张昕, 韩小帅, 等. 带像差校正功能的柔性变焦透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0422003.  
Yang Y C, Zhang X, Han X S, et al. Flexible varifocal lens with aberration correction function[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422003.
- [8] Luo Y J, Xing J, Kang Z. Topology optimization using material-field series expansion and Kriging-based algorithm: an effective non-gradient method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 364: 112966.
- [9] 杨军, 苑立波. 具有嵌入式环形拓扑结构的光纤传感器网络[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1391-1396.  
Yang J, Yuan L B. Configuration of fiber optic sensor network with an embedded-loop topology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1391-1396.
- [10] Chen Y F, Meng F, Huang X D. Creating acoustic topological insulators through topology optimization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 107054.
- [11] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 115-122.  
Liu J T, Chen W B, Liu Z S. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(1): 115-122.
- [12] 李辉, 孙加运, 陈震, 等. 船载激光雷达观测青岛海域气溶胶光学性质实验研究[J]. 量子电子学报, 2017, 34(4): 486-494.  
Li H, Sun J Y, Chen Z, et al. Aerosol optical properties

- observation in Qingdao offshore area with shipborne lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(4): 486-494.
- [13] Guinard S A, Mallé Z, Ennaffi O, et al. Planar polygons detection in lidar scans based on sensor topology enhanced RANSAC[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, V-2-2020: 343-350.
- [14] Zhang K Q, Cheng G D, Xu L. Topology optimization considering overhang constraint in additive manufacturing[J]. Computers & Structures, 2019, 212: 86-100.
- [15] Xia L, Zhang L, Xia Q, et al. Stress-based topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 333: 356-370.
- [16] Li Q H, Sigmund O, Jensen J S, et al. Reduced-order methods for dynamic problems in topology optimization: a comparative study[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 387: 114149.
- [17] Gao J, Luo Z, Xia L, et al. Concurrent topology optimization of multiscale composite structures in MATLAB[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(6): 2621-2651.
- [18] Mukherjee S, Lu D C, Raghavan B, et al. Accelerating large-scale topology optimization: state-of-the-art and challenges[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(7): 4549-4571.
- [19] Liu J K, Gaynor A T, Chen S K, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2457-2483.
- [20] Vantghem G, de Corte W, Shakour E, et al. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization [J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103084.
- [21] Wu J, Sigmund O, Groen J P. Topology optimization of multi-scale structures: a review[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(3): 1455-1480.
- [22] 王改利, 邱崇践, 刘智深. 多普勒激光雷达风场反演方法研究[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 143-153.
- Wang G L, Qiu C J, Liu Z S. Study on wind field retrieval method for Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1): 143-153.
- [23] Lin Q Y, Hong J, Liu Z, et al. Investigation into the topology optimization for conductive heat transfer based on deep learning approach[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 97: 103-109.
- [24] Kefal A, Sohoulis A, Oterkus E, et al. Topology optimization of cracked structures using peridynamics[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2019, 31(6): 1645-1672.
- [25] Safonov A A. 3D topology optimization of continuous fiber-reinforced structures via natural evolution method[J]. Composite Structures, 2019, 215: 289-297.
- [26] Meng Z, Keshtegar B. Adaptive conjugate single-loop method for efficient reliability-based design and topology optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 344: 95-119.
- [27] Zhen W K, Hu Y Y, Yu H, et al. LiDAR-enhanced structure-from-motion[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 31-August 31, 2020, Paris, France. New York: IEEE Press, 2020: 6773-6779.
- [28] 宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究[J]. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1009-1015.
- Song X Q, Guo J J, Yan Z A, et al. Detection of aerosol optical parameters by high spectral resolution lidar[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 1009-1015.

## Design Method of Lidar Optical Path Structure Based on Topology Optimization

Liu Zezheng, Chen Wanqian, Liu Jie\*, Du Libin\*\*, Lü Jing

College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China

### Abstract

**Objective** The design of optical path of lidar will directly affect the attenuation of echo signal in the transmission or reflection process, thus affecting the performance of lidar. In order to improve the compactness of the whole structure, reduce the weight and ensure the rigidity and strength, the topology parameter optimization design of the micro-pulse lidar structure is carried out during the design process.

**Methods** The variable density topology optimization can be used to optimize and reassemble the structure of optical devices efficiently and conveniently, especially for the complex and discrete connections of optical devices, by defining and calculating the density function. This method has been widely used because it has the advantages of unconstrained design domain and simple design variables, and can better adapt to the situation of large computation and complex function design. In this paper, the pseudo-density value is used to represent the density of each element in the design domain which is the mass of material. Specifically, the density of material in the design domain is represented by the element in the density field  $\beta$  by the finite element meshing method, with a pseudo-density value representing the partition unit, a Y value for  $\beta$  element representing a corresponding material, and an N value for  $\beta$  element representing no material, as illustrated by the solid isotropic material with penalization (SIMP) interpolation schematic in Fig. 3. Structural topology optimization can deal with different types of design objectives and constraints. In continuum topology optimization, the shapes of outer boundary and inner boundary and the number of inner holes can be optimized at the same time according to predefined design goals. The SIMP model is used to optimize the optical support device by restricting the mass, volume and stress of the structure. By defining the design domain, design load, constraints and boundary conditions of the laser transmitting module and the optical receiving module, the structure function and sensitivity of the optical path are analyzed by using the SIMP model. The sequential quadratic programming (SQP) optimization algorithm is used to update the design variables of the optical path



iteratively, so as to improve the stability of the whole structure of the optical path and achieve the goal of mass and compactness optimization. According to the optimization process, the SQP gradient optimization algorithm is adopted after the initial topology optimization is completed, and the optimized skeleton is obtained by continuously replacing and iteratively adjusting.

**Results and Discussions** The lightweight structure model can be obtained by topology optimization of the optical device connection support structure. The initial mass of the structure is 68 kg, and the whole structure of the optical path including the primary mirror is taken as the topology parameter optimization region. By this topology design, the triangular lightweight rib units near the support hole and the through hole are retained, and some units farther away from the support hole are eliminated, thus the topology parameter optimization of the support structure of ultra-lightweight optical devices is realized. In the preliminarily optimized optical structure, when the gravity direction is parallel to the orientation of the optical axis, the deformation of the primary mirror will be larger, so the constraint is further optimized. After further optimization, the maximum offset generated on the image space orientation of the primary mirror surface node is not greater than 66 nm, and the overall mass of the primary mirror is constrained to 20%–35%, thus minimizing the flexibility of the primary mirror-centered structure. The reinforcement under the primary mirror of the telescope is optimized by the topology method, which can reduce the mass and deformation of the telescope under the premise of ensuring the stability of the structure of the telescope. The optimized double-layer light path structure support is shown in Fig. 7.

**Conclusions** The pseudo-density topology parameter optimization method is used to optimize the support structure of lidar optical device. It can realize the effects of mass reduction, volume reduction, proper arrangement of stress conduction path and proper material distribution. The optimized optical device support structure skeleton is suitable for the frequent movement by vehicles or aircraft and other field monitoring activities. The design parameters are analyzed according to the iterative times of topology optimization by changing the constraint conditions such as stress and volume ratio. By adjusting the position and material of the optical path, the results of the optical path topology optimization are verified in the aspects of reducing the mass and flexibility. In the design and reconstruction, the structural characteristics should be adjusted, and the structural mass should be gradually reduced when the strength design requirements are met. The effectiveness of the topology design is verified by the scale optimization design and the comparison of the structural details before and after optimization, which further proves that the new optical path structure has the function of reducing weight and improving rigidity. Furthermore, the additional vibration caused by overload can be reduced, and the stability can be improved by reducing the weight of the optical device supporting structure.

**Key words** optical design; lidar; optical path structure; topology optimization; SIMP model; iteration