

文章编号: 2095-4980(2019)03-0390-04

## 某新型仪器舱的拓扑优化设计

贺李平<sup>1</sup>, 吴 瑕<sup>2</sup>, 刘建壮<sup>1</sup>

(1.北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2.四川职业技术学院, 四川 遂宁 629000)

**摘 要:** 对某新型仪器舱的拓扑优化设计进行研究。使用 HyperMesh 建立仪器舱的拓扑优化模型, 利用 OptiStruct 对设计空间进行拓扑优化求解, 以减重 70% 为目标, 得到基于加权刚度最大化的设计方案, 并采用 3D 打印制造了仪器舱的聚乳酸树脂样件。对比试验表明, 基于加权刚度最优的设计方案, 在质量最轻的前提下, 实测 +X 支架刚度和 -X 支架刚度达到最优, 实现了初始设计目标。

**关键词:** 仪器舱; 拓扑优化; 3D 打印

**中图分类号:** V421.3<sup>+</sup>1; TP391.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201903.0390

## Topology optimization design of a new type of instrument cabin

HE Liping<sup>1</sup>, WU Xia<sup>2</sup>, LIU Jianzhuang<sup>1</sup>

(1.Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2.Sichuan Vocational and Technical College, Suining Sichuan 629000, China)

**Abstract:** The topology optimization design of a new type of instrument cabin is studied. The topology optimization model of the instrument cabin is built by HyperMesh. The topological optimization of the design space is solved by OptiStruct. To reduce the weight by 70%, the design scheme based on weighted stiffness maximization is obtained, and the polylactic acid resin sample of the instrument cabin is prepared by 3D printing. Comparison test shows that adopting the optimal design scheme based on weighted stiffness, with the minimum weight, the measured stiffness of mounting bracket in the X direction and -X direction are the highest, which achieves the initial design goal.

**Keywords:** instrument cabin; topology optimization; 3D printing

仪器舱内部安装有计算机、电气控制器、陀螺、惯导等电子电气设备, 是指挥控制中枢。仪器舱不仅有高刚度和设备高精度安装要求, 同时还需具备较高的承载能力和严格的轻量化特征。对仪器舱的设计是典型的多约束条件下的优化设计过程。文献[1]利用 iSIGHT 优化软件, 研究了导弹复合材料仪器舱结构多变量多约束优化问题, 通过优化复合材料铺层角度、铺层厚度及其他主要结构尺寸实现了仪器舱结构的轻量化, 但并未涉及结构的拓扑优化。随着结构拓扑优化方法的深入研究, 对产品轻量化要求较高、且在国内处于自主研发设计的航天航空业, 对拓扑优化的应用要求显得尤为急迫。文献[2]完成了某巡航导弹外壳的拓扑优化设计, 优化模型中包括了结构静态应变能与动态频率目标, 并采用 OptiStruct 软件建立了多目标的理想点模型; 文献[3]采用拓扑优化与尺寸优化方法实现了星载电子设备机箱加强筋的优化设计; 文献[4]提出了中面应力基准法, 基于双向渐进结构优化方法对叶片内部结构进行了拓扑优化; 文献[5]采用拓扑优化方法有效解决了卫星铰链机构超重问题; 文献[6]对机载合成孔径雷达天线座连接支架进行了拓扑优化设计, 优化结果符合仿生学原理; 文献[7]采用拓扑优化设计及金属 3D 打印成型相结合的手段实现了支撑架底座的轻量化设计。

本文以新型仪器舱作为优化对象, 以轻量化、高刚度、高强度为优化目标, 以 3D 打印为制造手段, 研究面向航天高性能需求的新型舱体结构的优化设计方法。

### 1 拓扑优化的基本原理

拓扑优化是一种数学方法, 能够在给定的设计空间内找到最优的材料分布。拓扑优化通常采用密度法定义材

料的流动规律，密度法是将单元密度作为设计变量，该单元密度与材料的弹性模量之间具有某种函数关系，在 0~1 之间连续取值。优化求解后单元密度为 1(或接近 1)，表示该单元位置处的材料很重要，需要保留；单元密度为 0(或接近 0)，表示该单元处的材料不重要，可以去除，从而达到材料的高效利用，实现轻量化设计<sup>[8]</sup>。

以结构的最小应变能设计问题为例，拓扑优化模型可表示为<sup>[9]</sup>：

$$\begin{cases} \text{find } \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{min } C = \mathbf{F}^T \mathbf{U} \\ \text{s.t. } V = f_v V_0; \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{X}$  为设计变量，即单元的密度； $C$  为结构的总体应变能； $\mathbf{F}$  为力矢量； $\mathbf{U}$  为位移列阵； $V$  为优化后的结构体积； $f_v$  为优化体积比； $V_0$  为设计空间的初始体积； $\mathbf{K}$  是结构的刚度矩阵。

## 2 仪器舱的拓扑优化设计

### 2.1 建立优化模型

图 1 为仪器舱的结构形式。安装支架上装有惯性导航装置和电气控制组合，这 2 个设备在轴向需要最大化安装刚度。优化区域为舱体模型实体包络内部空间，优化后的结构不能超出实体轮廓，需保留对接孔、螺母安装槽和外壁槽孔，不能出现其余贯穿性的孔洞。

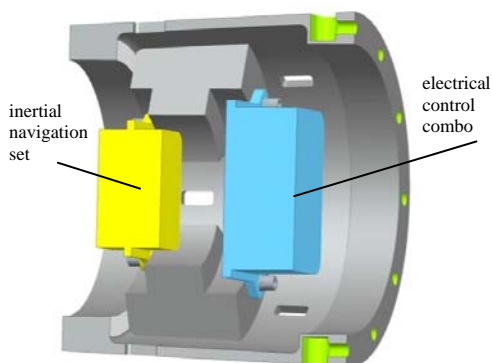


Fig.1 Structure of the instrument cabin  
图 1 仪器舱的结构形式

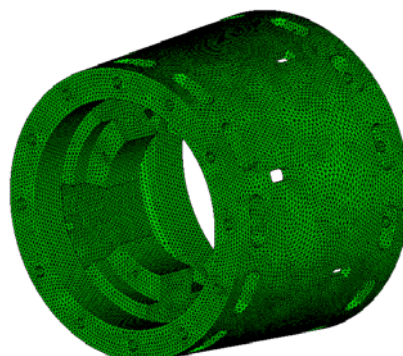


Fig.2 Topology optimization model of the instrument cabin  
图 2 仪器舱的拓扑优化模型

利用 HyperMesh 建立仪器舱的拓扑优化模型。拓扑优化的目的在于生成优化的材料分布，采用低阶四面体单元对模型划分较为细密的网格，实际单元数量为 589 050，节点数量为 121 157。图 2 为仪器舱的拓扑优化模型，初始结构即为设计空间。

### 2.2 优化目标及约束条件

拓扑优化的约束条件为设计空间减重 70%；优化目标为加权应变能最小化，即加权刚度最大化。加权应变能是在拓扑优化中考虑多个子工况的一种方法，该响应是每个子工况应变能的加权和，即

$$C_w = \sum w_i C_i = \frac{1}{2} w_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{f}_i \quad (2)$$

式中： $C_w$  为加权应变能； $i$  为第  $i$  个工况； $w_i$  为加权系数； $C_i$  为应变能； $f_i$  为载荷； $\mathbf{u}_i^T$  为载荷  $f_i$  作用下的位移矩阵的转置。

为加强仪器舱设备安装支架的刚度，分别在安装惯性导航装置和电气控制组合的螺栓孔位置施加合力为 2 000 N 的轴向载荷，设为工况 1 和工况 2。此外，为加强仪器舱的整体弯曲刚度，在安装工装的螺栓孔位置施加合力为 2 000 N 的横向载荷，设为工况 3。对于各载荷工况，取权重系数为 1。

考虑到结构美观和对称性，在设计空间添加 4 个扇区的周向循环对称，以及每个扇区内的平面对称约束，以生成对称的优化结果。考虑到可用 3D 打印制造，不再添加其余制造工艺约束。

### 2.3 优化结果及 3D 打印样件

利用结构优化软件 OptiStruct 对设计空间进行拓扑优化求解。单元密度阈值取 0.5 时的等值面如图 3~图 5 所示。优化结构由薄壁圆筒和 4 个安装支架组成，整体呈对称结构。安装支架内部存在孔洞，适合采用 3D 打印制

造。基于优化结果，使用 PROE 软件重构优化结构的几何模型。在模型重构过程中，除去必要的细节调整，尽量逼近原始的拓扑优化结果。图 6 显示了由 3D 打印制造的聚乳酸树脂样件，可用于初步的性能对比测试。

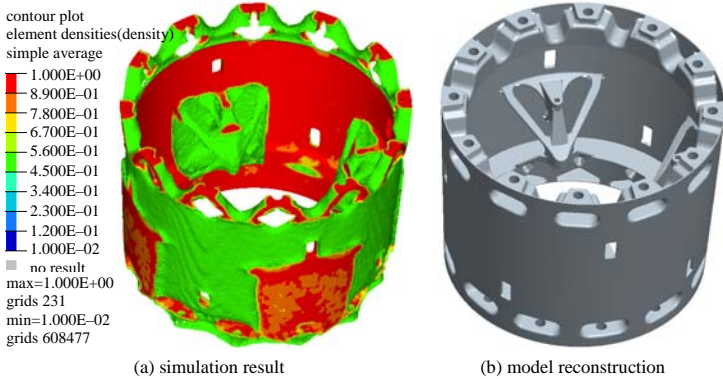


Fig.3 Topology optimization results of the instrument cabin-view 1  
图 3 仪器舱的拓扑优化结果-视图 1

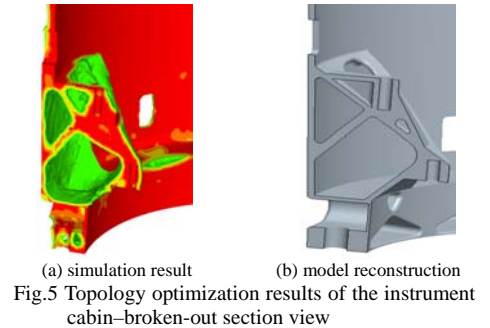


Fig.5 Topology optimization results of the instrument cabin-broken-out section view  
图 5 仪器舱的拓扑优化结果-局部剖视图

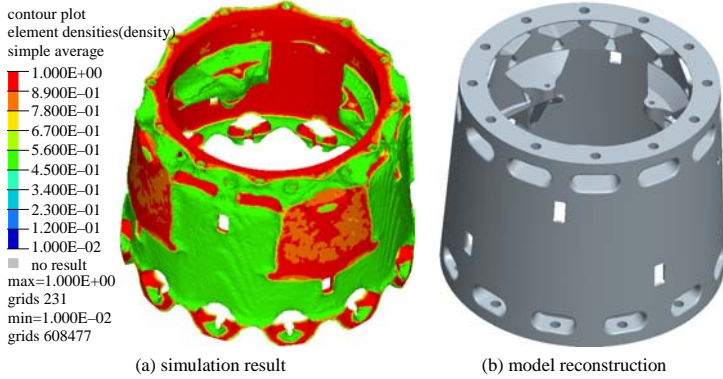


Fig.4 Topology optimization results of the instrument cabin-view 2  
图 4 仪器舱的拓扑优化结果-视图 2

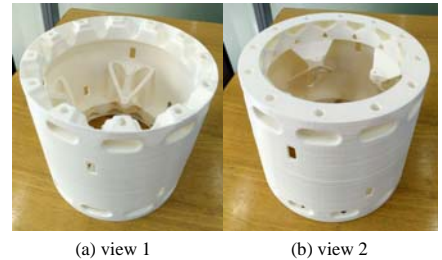


Fig.6 3D print sample  
图 6 3D 打印样件

### 2.4 3D 打印样件结构性能对比分析

#### 2.4.1 试验过程

通过台架试验测试 3D 打印样件的安装支架轴向刚度(+X 方向和-X 方向)、样件整体弯曲刚度/强度。在测试安装支架轴向刚度时，在支架上安装模拟仪器，对模拟仪器的几何中心处施加集中轴压载荷，通过顶杆式位移传感器记录模拟仪器的轴向位移。为避免轴压加载过程中出现偏心加载情况，在模拟仪器几何中心处加工球形凹槽，并使用一球头进行加载。图 7 为安装支架刚度测试原理图。

进行样件整体弯曲刚度/强度试验时，将样件后端固定在固支工装上，并在样件前端安装一加载工装，使用吊带对加载工装前端进行侧拉加载，通过顶杆式位移传感器记录样件顶端的横向位移。图 8 为样件弯曲刚度/强度测试原理图。

#### 2.4.2 试验结果对比分析

为对比不同设计思路的实际效果，多个设计团队给出了不同的设计方案，并进行了相同的试验测试。依据试验结果，挑选 3 个强度最优的设计方案进行对比，表 1 为实测数据。

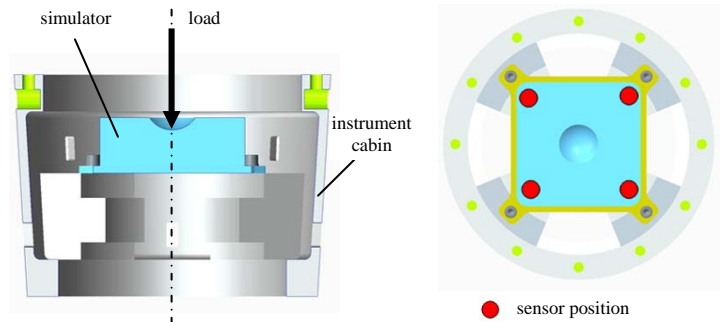


Fig.7 Principle diagram of stiffness test for mounting bracket  
图 7 安装支架刚度测试原理图

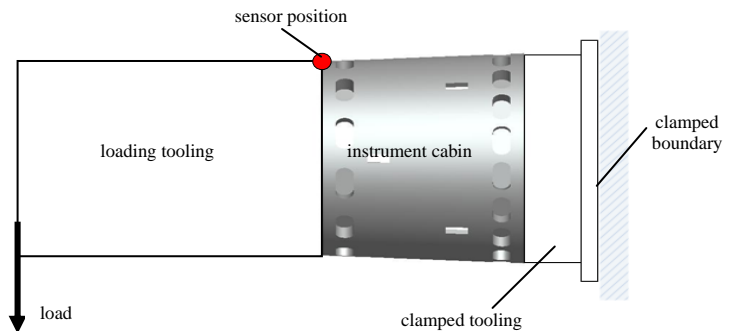


Fig.8 Principle diagram of sample bending stiffness/strength test  
图 8 样件弯曲刚度/强度测试原理图

表1 3种设计方案的实测数据

Table1 Measured data of three design schemes

|          | mass/g | +X bracket stiffness/(N·mm <sup>-1</sup> ) | -X bracket stiffness/(N·mm <sup>-1</sup> ) | bending stiffness/(N·mm <sup>-1</sup> ) | bending strength/N |
|----------|--------|--|--|---|--------------------|
| scheme A | 218    | 1 559                                      | 3 124                                      | 1 536                                   | 1 882              |
| scheme B | 222    | 954  | 1 868                                      | 1 958                                   | 2 800              |
| scheme C | 222    | 1 346                                      | 2 165                                      | 1 029                                   | 2 200              |

方案 A 为本文给出的基于加权刚度最优的设计方案。该方案将质量控制到最轻,实测+X 支架刚度和-X 支架刚度达到最优,实现了初始设计目标,弯曲刚度居于中等,弯曲强度较其余 2 个方案偏弱。这是由于拓扑优化主要基于刚度最优,局部的强度可以通过后续优化改善。

### 3 结论

对比试验表明,基于加权刚度最优的设计方案,在质量最轻的前提下,安装支架的刚度达到最优,实现了初始设计目标。依据各载荷工况的重要性,调节相应的权重系数,就能实现期望的刚度设计。一般来说,基于刚度最优的设计,强度不会成为薄弱环节,后期可通过更细致的尺寸优化、形状优化等手段,进一步提高结构的强度性能。基于刚度最优的拓扑优化方法与航空航天业对轻量化的需求高度吻合。特别的,随着 3D 打印技术的进一步成熟,拓扑优化以其天生优势,能够最大限度地发挥结构的潜能。

#### 参考文献:

- [1] 甄英霞,朱瑾,陈刚. 基于 iSIGHT 的复合材料仪器舱结构优化研究[J]. 现代防御技术, 2009,37(2):26-30. (ZHEN Yingxia,ZHU Jin,CHEN Gang. Composite structure optimization of instrument cabin with iSIGHT software[J]. Modern Defence Technology, 2009,37(2):26-30.)
- [2] LUO Zhen,YANG Jingzhou,CHEN Liping. A new procedure for aerodynamic missile designs using topological optimization approach of continuum structures[J]. Aerospace Science and Technology, 2006(10):364-373.
- [3] 范文杰,李宁. 星载电子设备加筋板优化设计[J]. 机械设计与研究, 2011,27(2):40-43. (FAN Wenjie,LI Ning. Optimization design research on stiffened panels of spaceborne electronic equipment[J]. Machine Design and Research, 2011,27(2):40-43.)
- [4] 李琳,薛铮. 等强度三维空心叶片的内部拓扑结构[J]. 航空动力学学报, 2012,27(10):2229-2235. (LI Lin,XUE Zheng. Internal structure of three-dimensional hollow blade with equal strength[J]. Journal of Aerospace Power, 2012,27(10):2229-2235.)
- [5] 张华,杜三虎,肖余之. 基于拓扑优化的卫星铰链机构设计[J]. 机械设计与研究, 2012,28(5):10-14. (ZHANG Hua,DU Sanhu,XIAO Yuzhi. Study on topology optimization of satellite hinge mechanism[J]. Machine Design and Research, 2012,28(5):10-14.)
- [6] 贺李平. 机载 SAR 天线座连接支架的拓扑优化设计[J]. 电子机械工程, 2014,30(1):52-54. (HE Liping. Topology optimization design of connecting bracket of antenna pedestal in airborne SAR[J]. Machine Design and Research, 2014,30(1):52-54.)
- [7] 付远,罗哲,辛增念,等. 支撑架底座的拓扑优化及 3D 打印一体化成型技术[J]. 机械工程师, 2016(11):36-39. (FU Yuan,LUO Zhe,XIN Zengnian,et al. Integration molding of pedestal using topological optimization and 3D printing[J]. Mechanical Engineer, 2016(11):36-39.)
- [8] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2013. (HONG Qingquan,ZHAO Kang,ZHANG Pan,et al. Theoretical basis and engineering application of OptiStruct & HyperStudy[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2013.)
- [9] 左孔天,陈立平,钟毅芳,等. 基于人工材料密度的新型拓扑优化理论和算法研究[J]. 机械工程学报, 2004,40(12):31-37. (ZUO Kongtian,CHEN Liping,ZHONG Yifang,et al. New theory and algorithm research about topology optimization based on artificial material density[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(12):31-37.)

#### 作者简介:



贺李平(1982-),男,四川省遂宁市人,博士,高级工程师,主要研究方向为有限元方法、动力学建模及仿真、结构优化.email:bithlp@sina.com.

吴瑕(1983-),女,四川省遂宁市人,硕士,副教授,主要研究方向为计算机应用。

刘建壮(1987-),男,河北省邯郸市人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达伺服系统结构设计。