

## 基于面形均方根误差的成像主镜拓扑优化设计

陈珂\*, 仇荣生

上海航天控制技术研究所, 上海 201109

**摘要** 为平衡高转速下镜面面形变化过大和主镜轻量化这一对矛盾,对主镜开展拓扑优化设计。使用HyperMesh软件将主镜划分为六面体单元,将主镜的两个镜面所有节点沿主镜中轴线方向的位移定义为响应,利用镜面面形均方根误差(相对于静止面形)评估主镜面形变化并作为优化约束,以最轻量化为目标对主镜进行拓扑优化。将优化后结构进行几何重构,代入OptiStruct软件进行重新计算;依据重构模型加工主镜,利用干涉仪测量光学加工后镜面面形均方根误差。优化结果显示,镜面面形均方根误差在 $0.35\ \mu\text{m}$ 以内,质量减轻了38.54%。单点车加工面形精度为 $0.08\ \mu\text{m}$ (标定得到的结果),故光学加工后镜面均方根误差理论上不超过 $(0.35+0.08)\ \mu\text{m}$ ;利用干涉仪测量光学加工后镜面面形,其镜面1和镜面2的面形相对于单点车理论面形分别相差 $0.36\ \mu\text{m}$ 、 $0.31\ \mu\text{m}$ ,均小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

**关键词** 测量; 光机设计; 拓扑优化; 轻量化; 复杂优化约束

中图分类号 E933.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2012003

## Topological Optimization Design of Imaging Primary Mirror Based on Root-Mean-Square Error of Surface Figures

Chen Ke\*, Qiu Rongsheng

Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China

**Abstract** The topological optimization design of a primary mirror is carried out to resolve the contradiction between the excessive change in the surface figures and the light weight of the primary mirror under high rotation speed. The primary mirror is divided into hexahedral elements by HyperMesh software, and the displacement of all nodes on the two surfaces of the primary mirror along the central axis of the primary mirror is defined as the response. The root-mean-square (RMS) error of surface figures (relative to static surface figures) is used to evaluate the surface figure change of the primary error and is taken as the optimization constraint, and then the topological optimization of the primary mirror is performed with the goal of the lightest weight. The optimized structure is reconstructed geometrically and substituted into OptiStruct for recalculation; the primary mirror is processed according to the reconstructed model, and the RMS error of surface figures after optical fabrication is measured by an interferometer. The optimization results indicate that the RMS error of the surface figures is below  $0.35\ \mu\text{m}$ , and the weight is reduced by 38.54%. The surface figure accuracy of single-point turning is  $0.08\ \mu\text{m}$  (obtained by calibration), and thus the RMS error of surface figures after optical fabrication does not exceed  $(0.35+0.08)\ \mu\text{m}$  in theory. The surface figures of mirror 1 and mirror 2 measured by the interferometer after light addition have an error of  $0.36\ \mu\text{m}$  and  $0.31\ \mu\text{m}$  separately relative to the theoretical surface figures of the single-point turning, which are all less than  $0.5\ \mu\text{m}$ .

**Key words** measurement; optomechanical design; topological optimization; lightweight; complex optimization constraints

## 1 引言

在武器导引头成像系统设计中,实际光学加工后的镜面与理论面形不完全一致,因此组成光路的每面镜子在设计时都会通过光学仿真软件设定面形容差。

当光学加工后的镜面面形偏差处于面形容差值内时,实际搭建的光路成像正常;当光学加工后的镜面面形偏差处于面形容差外时,实际搭建的光路会出现成像质量下降现象。在主镜光学加工过程中,车床主轴带动主镜以 $3500\ \text{r/min}$ 的转速绕主镜中轴线匀速旋转

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(91738302)

通信作者: \*chen\_ke2020@outlook.com

(转速根据车床数量和产品需求量综合计算得到),主镜因离心力发生隐式变形<sup>[1]</sup>。

在工程实践中,随意调整主镜结构会使主镜在光学加工时面形变化加大,进而导致光学加工后面形与理论面形相差 0.8 μm 以上,最终整个成像系统的成像质量下降。使用实心主镜可以降低自转时面形变化(0.6 μm 以内),但是,结构轻量化对于导弹设计具有重要意义——不仅便于士兵携带,还能减少导弹所需的推进剂<sup>[2]</sup>。

魏梦琦等<sup>[3]</sup>对某型机载主镜进行参数优化,对优化参数及基础结构的选择进行定性解释,但参数优化解未必是全局最优解。李颐等<sup>[4]</sup>对机载三面摆镜进行优化设计,但是拓扑优化部分并未将面形均方根(RMS)误差直接作为优化约束,而是采用部分节点位移 < 0.4 μm 的替代性方案,该方案不能与干涉仪测量数据进行定量对标。柯善良等<sup>[5]</sup>在主镜中引入轻质材料减重,但是非一体化主镜存在加工、装调困难等弊端。温晶晶等<sup>[6]</sup>对导弹结构进行拓扑优化,采用等效耦合节点方式定义载荷及对应响应,可以减少优化软件中第一类响应数量,但是该方法对实际工况进行简化,与实际情况存在差异。

为解决主镜轻量化和主镜自转面形变化这一对矛盾,需要开展成像主镜拓扑优化设计。本文基于有限元优化软件 OptiStruct,采用拓扑优化方法对实心主镜进行优化设计,使用 C 语言编写循环修改 FEM 文件,直接采用面形均方根误差作为优化约束,优化得到质量最轻的全局最优解。使用 OptiStruct 软件分析拓扑优化后的结构,利用计算机辅助设计(CAD)工具对其进行几何重构。重构三维模型的面形均方根误差和质量出现不同程度降低。利用干涉仪测量光学加工后的面形,得到的面形与单点车理论面形的均方根误差在光学仿真软件允许容差范围内,可见所设计的主镜可满足主镜面形稳定性及轻量化这一工程要求。

## 2 成像主镜拓扑优化设计

图 1 为主镜隐式变形示意图,其中 Z 轴为转轴,实线表示自转前主镜面形,虚线表示自转后未进行光学加工时主镜面形,点划线表示光学加工后未停止自转时主镜面形。主镜的外径越大,自转面形变化值越大,

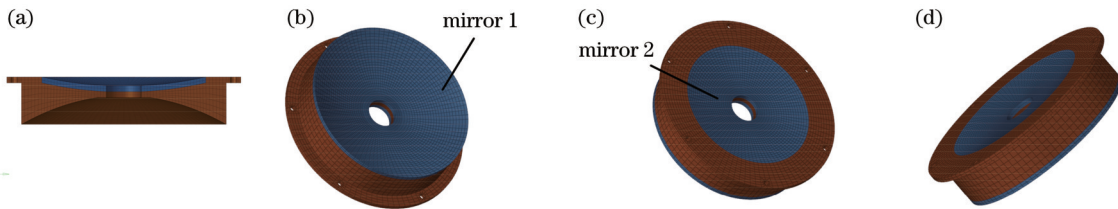


图 2 主镜有限元模型。(a)半剖图;(b)镜面 1;(c)镜面 2;(d)等轴测

Fig. 2 Finite element model of primary mirror. (a) Half cutaway; (b) mirror 1; (c) mirror 2; (d) isometric

### 2.3 成像主镜实际工况

成像主镜通过法兰结构与单点车转轴上的工装连

本实验使用的主镜外径为 70 mm。

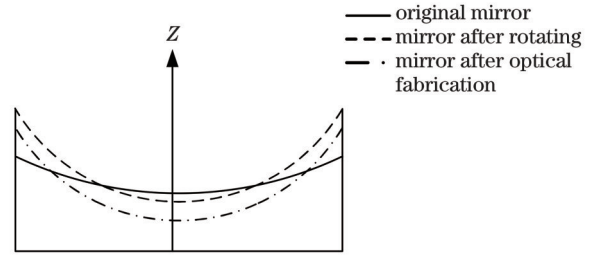


图 1 主镜隐式变形示意图

Fig. 1 Schematic of implicit deformation of primary mirror

### 2.1 主镜面形均方根误差的定义

在光学检测中,面形均方根误差用于衡量实际镜面与理论镜面的面形偏差<sup>[7]</sup>,如式(1)所示, $Z_n$ 表示主镜镜面第  $n$  个点在 Z 方向的位移, $\bar{Z}$ 表示镜面所有点的 Z 向位移均值(相对于理论面形), $N$ 为主镜镜面的总点数。

$$\eta_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (Z_n - \bar{Z})^2} \quad (1)$$

本文的面形均方根误差含义略有不同——结合有限元法与实际情况, $\bar{Z}$ 表示镜面所有节点的 Z 向位移均值(相对于未自转时主镜)。通过约束镜面的面形均方根误差,能够有效控制主镜在自转时的面形变化。

### 2.2 建立主镜有限元模型

选取实心主镜作为优化对象,建立如图 2 所示的有限元模型,采用纯六面体网格划分模型提高计算精度<sup>[8]</sup>。棕色网格区域对应主镜支撑结构,为设计空间,法兰结构用于固定主镜;两块蓝色网格区域分别对应镜面 1 和镜面 2,为非设计空间。有限元模型的材料参数<sup>[9]</sup>见表 1。

表 1 成像主镜材料参数

Table 1 Material parameters of imaging primary mirror

Parameter	Material	Elastic		Density / (g·cm <sup>-3</sup> )
		modulus / MPa	Poisson's ratio	
Value	6061 aluminium alloy	71000	0.31	2.7

接,法兰结构被压紧固定,在光学加工状态下,主镜受到转速为 3500 r/min 的自转载荷及重力载荷作用,如

图 3 所示。

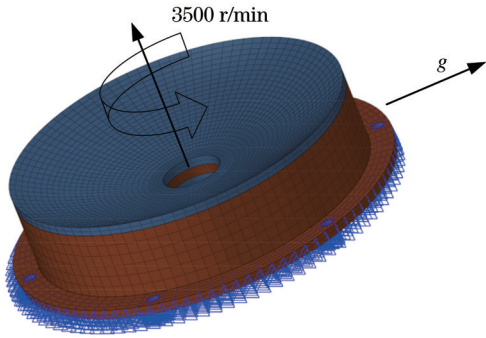


图 3 主镜光学加工工况

Fig. 3 Optical fabrication conditions of primary mirror

## 2.4 拓扑优化分析

### 2.4.1 定义第一类优化响应

计算面形均方根误差时要求镜面上每个节点的 Z 向位移参与计算,因此将每个节点的 Z 向位移定义为第一类响应,利用 renumber 命令对镜面 1 和镜面 2 的节点重新编号:镜面 1 节点编号始于 40000,并依次增大;镜面 2 节点编号始于 45000,并依次增大。主镜的 2 个镜面上的节点共计 3280 个,若通过 GUI 界面逐一一定义显然不合理。OptiStruct 中存在类似 ABAQUS inp 的轻量化文件——FEM 文件,通过修改 FEM 文件可快速创建第一类响应。OptiStruct 中创建第一类响应的命令为 DRESP1,使用方法如表 2 所示,其中 ID number 为响应编号, response name 为响应名称, response ID 为响应类别, direction 为响应方向, node number 为响应对应的节点 ID 号。

表 2 DRESP1 命令

Table 2 DRESP1 commands

No.	Command
1	ID number
2	Response name
3	Response ID
4	Direction
5	Node number

由于 FEM 文件无法使用循环语句,定义 3328 个第一类响应需要 3328 行 DRESP1 命令。利用 C 语言编写循环可快速生成 DRESP1 命令。完成第一类响应定义后,须定义第三类响应面形均方根误差,使用 HyperMath 编写 HML 文件可以完成第三类响应的定义。定义响应的完整流程如图 4 所示。

响应定义的 HML 文件如图 5 所示,其中 summ 表示单个镜面所有节点的 Z 向位移之和, avg 表示单个镜面所有节点的 Z 向位移均值, rresp[1] 表示 RMS1, rresp[2] 表示 RMS2,依据式(1)分别对镜面 1、镜面 2 定义第三类响应 RMS1、RMS2。

### 2.4.2 优化控制参数

将最小成员的尺寸设置为平均网格尺寸的 2~3

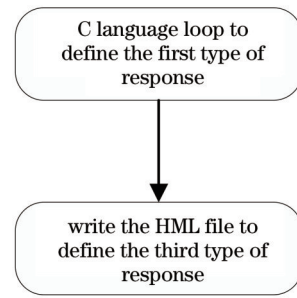


图 4 响应定义

Fig. 4 Response definition

```
function RMSRMS (iparam, rparam, iresp, rresp, udata)
{
    summ = 0;
    rmss = 0;
    i = 1;

    while(i<2017)
    do
        summ = rparam[i]+summ;
        i=i+1;
    end
    avg = summ/2016;

    i = 1;
    while(i<2017)
    do
        rmss = (rparam[i]-avg)*(rparam[i]-avg)+rmss;
        i=i+1;
    end
    rresp[1] = sqrt((rmss/2016));
    summ = 0;
    rmss = 0;
    i = 1;

    while(i<1313)
    do
        summ = rparam[i]+summ;
        i=i+1;
    end
    avg = summ/1312;

    i = 1;
    while(i<1313)
    do
        rmss = (rparam[i]-avg)*(rparam[i]-avg)+rmss;
        i=i+1;
    end
    rresp[2] = sqrt(rmss/1312);
    return true;
}
```

图 5 HML 文件

Fig. 5 HML file

倍(8 mm),以提高拓扑优化结果的离散度,并控制整体结构的周期对称性以增加可制造性,离散度控制参数 CHECKER 设置为 1<sup>[10-11]</sup>。实心主镜在光学加工工况下两镜面的面形均方根误差分别为 0.58 μm 和 0.54 μm,若按不合理结构减重,面形均方根误差达 0.8 μm。此外,面形均方根误差约束不宜设置过低,否则软件易报错。光学仿真软件的计算结果显示,当加工后镜面面形与理论面形相差在 0.5 μm 以内时,主镜成像质量较高,扣除单点车的加工面形精度 0.08 μm(标定得到的结果),将 RMS1、RMS2 约束在 0.35 μm 以内,并以最小体积分数为优化目标提交计算流程。

### 2.4.3 拓扑优化结果

使用 OptiStruct 软件进行拓扑优化,经过 81 步迭代,历时 6 h,求解器输出“ALL CONSTRAINTS SATISFIED”,得到材料密度分布图,图 6 所示为密度阈值设定为 0.20 时的拓扑优化结构。

拓扑优化对于结果密度阈值选择只有定性标准,不同密度区域按照 OptiStruct 软件内置公式转换成对应密度和弹性模量的材料(若区域密度为 1,转换材料

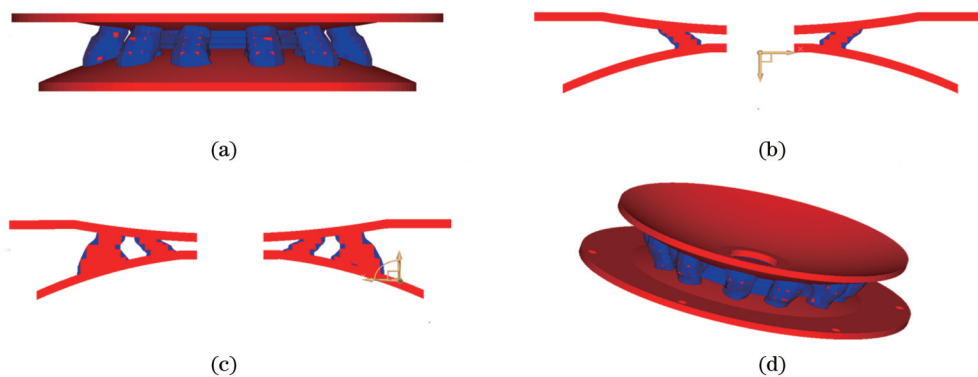


图 6 密度阈值为 0.20 时 OptiStruct 软件输出的拓扑优化结构。(a) 正视图; (b) 剖面(无立柱); (c) 剖面(含立柱); (d) 等轴测  
Fig. 6 Topologically optimized structure obtained from OptiStruct software when the density threshold is 0.20. (a) Front view;

(b) section (no column); (c) section (with column); (d) isometric

的密度和弹性模量与原始材料完全一致;密度为 0, 转换材料的弹性模量、密度的数值均为 0), 且在密度区间内惩罚因子呈非线性分布<sup>[12-15]</sup>。OptiStruct 软件按照变密度法对计算结果是否满足约束条件进行判别: 将设计空间的材料按照密度分布转换成对应材料, 转换完成后依据设定工况计算响应, 若该响应满足约束, 计算收敛。几何重构是在设定密度阈值后, 将所剩结

构全部设定为原始材料, 这与 OptiStruct 中内置的变密度法存在一定差异, 故最科学的方法是对优化结果取不同密度阈值进行对比计算。

利用 OptiStruct 软件的重分析功能, 将不同密度阈值对应的结构提交重新计算, 结果如表 3 所示。可以看到, 密度阈值过低则质量增加, 过高则面形均方根误差增加, 因此本次仿真的密度阈值取中间值 0.20。

表 3 不同密度阈值结果对比

Table 3 Comparison of the results of different density thresholds

Density threshold	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0
RMS1 / $\mu\text{m}$	0.3153	0.3191	0.3239	0.3279	0.3314	0.3367	0.3407	0.5754
RMS2 / $\mu\text{m}$	0.2885	0.2888	0.2862	0.2883	0.2907	0.2907	0.2900	0.5392
Mass /g	671.62	662.84	651.95	643.74	636.52	631.63	625.47	1054.6

### 3 优化结果评估

#### 3.1 CAD 几何重构

将密度阈值为 0.20 的主镜结构导出为 STP 格

式, 在 SOLIDWORKS 软件中依据导出模型尺寸进行几何重构(消除离散点, 采用样条拟合方法对主镜支撑结构进行光滑处理), 所得到的重构模型如图 7 所示。

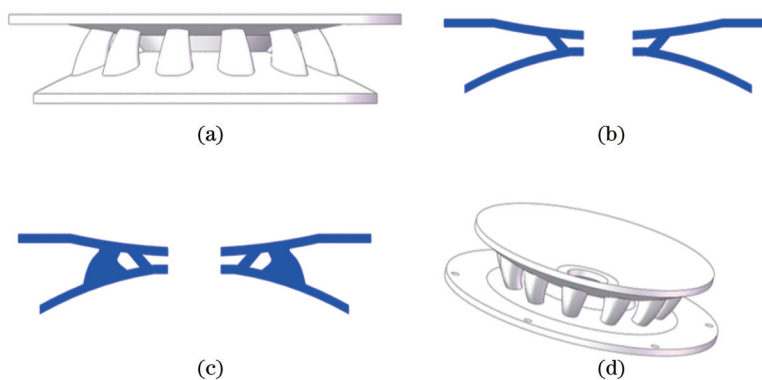


图 7 重构模型。(a) 正视图; (b) 剖面(无立柱); (c) 剖面(含立柱); (d) 等轴测

Fig. 7 Refactoring model. (a) Front view; (b) section (no column); (c) section (with column); (d) isometric

#### 3.2 结果验证

将重构完成的 CAD 模型导入 OptiStruct 软件, 依据 2.3 节定义边界条件提交计算。应力分布如图 8 所示, 最大米氏应力仅 1.597 MPa。重构模型与原始模型性能对比如表 4 所示, 其中镜面 1 的面形均方根误差

减少 43.17%, 镜面 2 的面形均方根误差减少 46.03%, 主镜整体质量减少 38.54%。

依据重构三维模型加工主镜: 主镜支撑立柱单独加工, 其余部分使用铣床进行机械加工; 机械加工完成后, 将立柱焊接到主镜上, 以支撑镜面 1、镜面 2, 焊料使用同

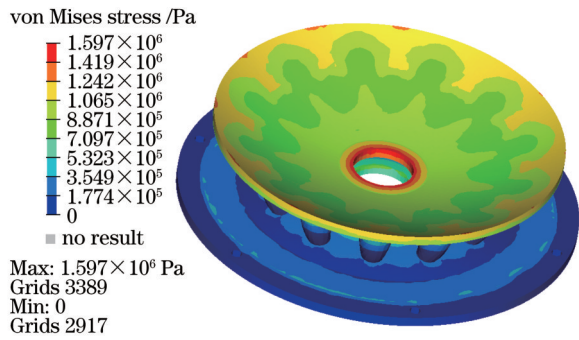


图 8 重构模型应力分布

Fig. 8 Stress distribution of reconstructed model

表 4 重构模型性能对比

Table 4 Comparison of reconstructed model performance

Model	Solid model	Refactoring model
RMS1 / $\mu\text{m}$	0.5754	0.327
RMS2 / $\mu\text{m}$	0.5392	0.291
Mass / g	1054.6	648.21

种材料;焊接完成后使用单点车对镜面 1、镜面 2 进行光学加工。利用干涉仪测量光学加工后的镜面面形,并与单点车设定理论面形对比,结果如表 5 所示。可以看到,镜面 1 和镜面 2 的实际面形与理论面形分别相差  $0.36 \mu\text{m}$  和  $0.31 \mu\text{m}$ 。

表 5 光学加工镜面面形均方根误差对比

Table 5 Comparison of root-mean-square error of mirror surface figures after optical fabrication

Face type	Theoretical face	Actual face
RMS1 / $\mu\text{m}$	7253	7253.36
RMS2 / $\mu\text{m}$	8525	8525.31

## 4 结 论

采用拓扑优化方法对实心主镜进行优化设计,得到满足面形均方根误差和强度要求的轻量化主镜模型。相对于实心主镜,优化模型的质量减轻 38.54%,光学加工后镜面 1、镜面 2 的面形变化分别降低 43.17%、46.03%。利用干涉仪测量光学加工后主镜面形,其镜面 1、镜面 2 的面形与单点车设定理论面形分别相差  $0.36 \mu\text{m}$ 、 $0.31 \mu\text{m}$ ,低于光学仿真软件中的面形容差  $0.5 \mu\text{m}$ ,证明了所提拓扑优化方法的正确性,其可用于解决实际工程问题。

不同于在镜面上取离散点计算面形均方根误差的方法,所提方法将镜面上所有节点定义响应,准确描述镜面变形情况,优化得出满足面形均方根误差约束的全局最优解,对传统试错型主镜设计方法进行了补充和改善,具有参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] 张继真. 铍铝合金反射镜设计和制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019: 35-45.
- [2] 刘恩彩. 基于点阵结构填充的导引头伺服框架轻量化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016: 87-94.
- [3] 魏梦琦, 高世林, 温庆荣, 等. 某机载光电系统主镜的轻量化设计与分析[J]. 激光与红外, 2021, 51(5): 634-639.
- [4] 李颀, 刘伟, 谭亚雄, 等. 机载摆扫式光谱仪高转速三面摆镜设计与优化[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2675-2683.
- [5] 柯善良. 超轻空间相机主支撑结构优化设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018: 43-52.
- [6] 温晶晶, 吴斌, 刘承鹭. 导弹整体式翼面骨架结构的拓扑优化设计[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 81-88.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光学零件的面形偏差: GB/T 2831—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [8] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 37-43.
- [9] 中国机械工程学会. 金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 68-69.
- [10] 方献军, 徐自立, 熊春明. OptiStruct 及 HyperStudy 优化与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 78-79.

- Fang X J, Xu Z L, Xiong C M. Optimization and engineering application of OptiStruct and HyperStudy [M]. Beijing: China Machine Press, 2021: 78-79.
- [11] Majdi B, Reza A. Multi-material topology optimization of compliant mechanisms via solid isotropic material with penalization approach and alternating active phase algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(13): 2631-2642.
- [12] Altair. HyperworksHelp. America: Altair[EB/OL]. (2017-05-27)[2022-01-08]. [https://2017.help.altair.com/2017/altair\\_help/altair\\_help.htm#welcome\\_page.htm](https://2017.help.altair.com/2017/altair_help/altair_help.htm#welcome_page.htm).
- [13] Wang R X, Zhang X M, Zhu B L, et al. Topology optimization of a cable-driven soft robotic gripper[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(5): 2749-2763.
- [14] Yang D J, Hao Y, Li B, et al. Topology optimization design for the lightweight endplate of proton exchange membrane fuel cell stack clamped with bolts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(16): 9680-9689.
- [15] Foroughi A H, Razavi M J. Shape optimization of orthopedic porous scaffolds to enhance mechanical performance[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2022, 128: 105098.