

基于非线性特性的空间站转位机构拓扑优化*

刘汉武^{1,2,3} 李长军¹ 金小萍¹ 张 华^{1,2,3}

1(上海宇航系统工程研究所 上海 201109)

2(宇航空间机构全国重点实验室 上海 201108)

3(上海市空间飞行器机构重点实验室 上海 201108)

摘 要 针对含非线性特性的空间站转位机构轻量化设计问题,建立了考虑非线性特性的结构/机构拓扑优化分析方法,通过模拟静力试验过程方法得到其力-位移曲线,按照特定的原则提取出非线性结构的等效刚度,得出转位机构捕获连接机构考虑非线性特性的分析结果与静刚度试验结果误差在 10% 以内,满足工程实际应用需要,说明了捕获连接机构非线性刚度分析方法的可行性.采用变密度法 (SIMP),建立了含非线性特性的转位机构拓扑优化模型,开展了空间站转位机构中间支架拓扑优化分析和减重设计,结构减重 24%.分析结果表明,转位机构满足刚度和强度要求,实现了空间站转位机构轻量化设计的目标,说明了该分析方法的有效性.本研究建立的含局部非线性特性的拓扑优化分析方法为空间站转位机构轻量化设计提供了解决途径,也为其他非线性结构机构拓扑优化提供了参考,同时为中国空间站重点工程项目的建设提供了技术支撑.

关键词 中国空间站, 转位机构, 非线性, 等效刚度, 拓扑优化

中图分类号 O343.5

Topological Optimization of Spatial Indexing Mechanisms Based on Nonlinear Characteristics

LIU Hanwu^{1,2,3} LI Changjun¹ JIN Xiaoping¹ ZHANG Hua^{1,2,3}

1(Aerospace Systems Engineering Shanghai, Shanghai 201109)

2(National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Shanghai 201108)

3(Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201108)

Abstract For the lightweight design of the space station transfer mechanism with nonlinear characteristics, a structural/mechanism topology optimization method considering nonlinear characteristics was established, and the force-displacement curve was obtained by simulating the static test process. The equivalent stiffness of the nonlinear structure was extracted according to a specific principle, which could match the test results well. The topology optimization analysis and weight reduction design of the intermediate bracket of the space station transfer mechanism were carried out using the method of Solid

* 国家自然科学基金项目资助 (52275287)

2023-08-18 收到原稿, 2024-03-15 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Isotropic Material with Penalization (SIMP), and the structure was reduced by 24%, achieving the goal of lightweight design for the space station transfer mechanism. This shows the effectiveness of the analysis method. The topology optimization method established for the lightweight design of the space station transfer mechanism with local nonlinear characteristics provides a solution for the lightweight design of other nonlinear structure mechanisms, and also provides a reference for other nonlinear structure mechanisms. As the demand for advanced materials and structures with improved performance continues to grow, the topology optimization method established for the space station transfer mechanism will serve as a valuable tool for engineers working in various fields. For example, it can be applied to the development of lightweight automobiles, aircraft, and spacecraft, as well as to the design of renewable energy systems, robotics, and other advanced technologies. By incorporating the method into their design processes, engineers can create more innovative and efficient products that will help to drive progress and advancements in these industries. In conclusion, the topology optimization method developed for the lightweight design of the space station transfer mechanism with local nonlinear characteristics has demonstrated its effectiveness and versatility in addressing complex engineering design challenges. By providing a systematic approach to the design process that considers both structural and mechanical properties, this method has the potential to impact various industries and applications, contributing to the development of more advanced and sustainable structures and mechanisms for years to come.

Key words Chinese space station, Transposition mechanism, Nonlinear, Stiffness, Topology optimization

0 引言

空间站转位机构作为中国空间站重要的机构部件, 主要实现飞船与核心舱的对接转向、停泊, 由齿轮支架、臂杆、捕获连接机构等组成, 是空间站组建过程中的核心机构之一. 空间站结构机构的减重是一个永恒的话题, 在现有运载火箭的运载能力下, 较轻的结构机构重量代价可以搭载更多的载荷, 极大地提升了转位机构的适用能力, 随着拓扑优化方法的提出和计算机能力的提升, 使得结构轻量化设计成为很多研究的热点话题. Bendsøe 等^[1]在均匀化连续体拓扑优化的基础上提出了变密度法; Sui 等^[2]提出了独立连续映射法; Xie 等^[3]为连续体结构拓扑优化计算提出了渐进结构优化法; Jiang 等^[4]基于径向基函数插值得到参数化水平集方法, 提出了一种新的可扫描有遮蔽区域的边界搜索方法的拓扑优化设计; Xu 等^[5]提出一种对生物可降解复合材料微结构的时变刚度特性进行调控设计的拓扑优化方法; Ji 等^[6]采用基于变密度法的拓扑优化方法对强制对流空气热沉结构进行优化设计, 有效地增强了新型热沉翅片结构换热效果; Liu 等^[7]考虑疲劳寿命结合双向单元生长进化拓扑优化算法; Hou 等^[8]开展了

冲击载荷下的结构拓扑优化; Wu 等^[9]考虑了基于瞬态效应的结构拓扑优化的设计和求解方法; Li 等^[10]提出了基于不确定因素的可靠性拓扑优化方法. 上述研究均未考虑结构的非线性特性, 而转位机构的捕获连接机构内含有预紧、接触、摩擦等复杂的非线性因素, 直接影响空间转位机构的动力学特性, 故而该结构的非线性特性在空间转位机构拓扑优化设计中尤为重要.

针对含有非线性特性结构的机构动力学问题, Wang 等^[11]考虑了航天器附件展开铰链间隙的动力学建模和影响分析; Xu 等^[12]提出了一种基于航天器部件模态特性的粗略推算柔性航天器频率的工程方法; Xu 等^[13]采用改进的 Iwan 模型对螺栓连接梁开展了非线性动力学响应分析; Song 等^[14]提出了适用于三维单元的改进 Iwan 模型, 并对模型参数进行了识别. 上述研究仅针对简单的非线性模型进行理论研究或粗略估算, 不能应用于具有复杂非线性连接关系的工程实际问题, 故本文结合结构非线性特性提出了一种含非线性特性的拓扑优化分析方法, 该方法考虑了局部复杂连接结构的非线性特性, 通过变密度拓扑优化方法 (SIMP) 开展含非线性的空间站转位机构的轻量化设计.

1 捕获连接机构非线性分析

1.1 建立非线性模型

空间站转位机构是实现空间站舱体转向的重要机构(见图1),通过关节1、关节2实现其舱体空间位置的变换,其捕获机构通过复杂非线性机构系统实现目标捕获、连接和锁定功能(见图2),最终完成空间站舱体的位置转换。

空间站转位机构的捕获机构通过接触碰撞局部区域微小变形,实现抓捕、锁紧动作.接触体在任意接触点 C_i (见图3)法向、切向接触力可表示为

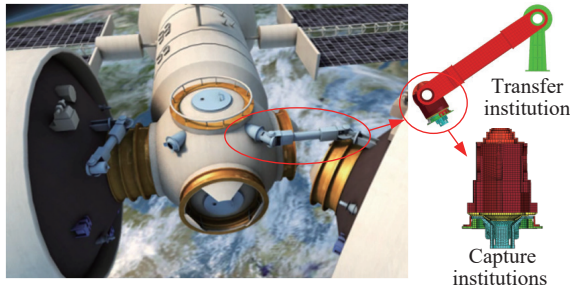


图1 空间站转位机构

Fig. 1 Space station transposition mechanism

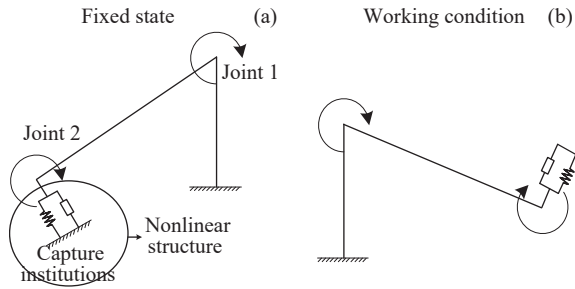


图2 转位机构工作原理

Fig. 2 Working principle of indexing mechanism

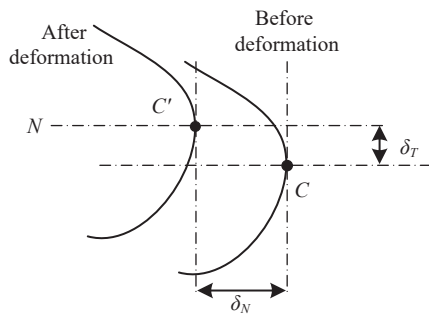


图3 捕获机构接触原理模型

Fig. 3 Capture mechanism contact principle model

$$F_{Ni} = K_{Ni}(\delta_{Ni}) + \varphi_{Ni}(\delta_{Ni}, \dot{\delta}_{Ni}), i = 1, 2, 3 \dots; \quad (1)$$

$$F_{Ti} = K_{Ti}(\delta_{Ti}) + \varphi_{Ti}(\delta_{Ti}, \dot{\delta}_{Ti}), i = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

式中, δ_N 和 δ_T 为法向和切向变形量; K_{Ni}, K_{Ti} 为接触面的切向和法向刚度; $\varphi_{Ni}, \varphi_{Ti}$ 为法向和切向阻尼。

在转位机构振动过程中,捕获机构主要有相对静止和滑移两种状态,即

$$\begin{cases} \Delta F_S = \mu_0 F_N - |F_T| > 0, & v = 0; \\ F_T = -\mu_d F_N \text{sgn}(v), & v \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{sgn}(v) = \begin{cases} -1, & v < 0; \\ 0, & v = 0; \\ 1, & v > 0. \end{cases} \quad (4)$$

式中, ΔF_S 为最大静摩擦力与滑移力之差; v 为相对滑移速度; μ_0 为静摩擦系数; μ_d 为动摩擦系数。

根据捕获机构实际设计状态,主要采用六面体单元和五面体单元,分别建立了线性和非线性两种捕获机构有限元模型(见图4):线性有限元模型在图中所示接触区域采用绑定约束,振动过程中无滑移;非线性有限元模型在图中所示接触区域中设置了接触属性,采用库伦摩擦模型,摩擦系数设置为0.2。

1.2 非线性刚度分析

由捕获机构(见图4)6个方向刚度对转位机构系统刚度的敏感性分析可得,捕获机构3个平动刚度对转位机构系统刚度贡献最大,因此着重分析捕获机构3个平动方向刚度.对捕获连接机构分别单独施加3个方向载荷 F_x, F_y, F_z (F_x 为 x 方向力, F_y 为 y 方向力, F_z 为 z 方向力),得到3个平动方向(x, y, z)力一位

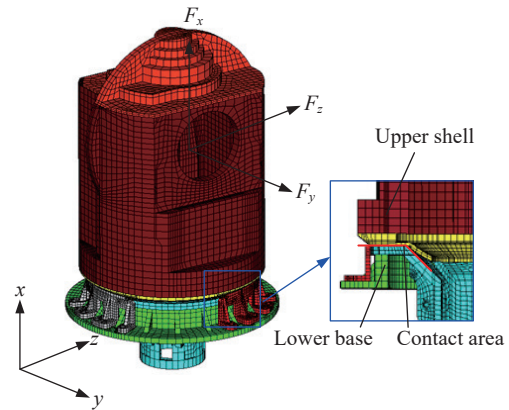


图4 捕获机构非线性模型及加载坐标

Fig. 4 Capture the nonlinear model and loading coordinates of the mechanism

移曲线(见图5~7)及位移-刚度曲线(见图8~10)。

由图5~10三个方向的力-位移和位移-刚度曲线可知, 考虑非线性结构和不考虑非线性结构刚度差别很大, 不考虑非线性结构为线性结构, 力和位移呈线性关系, 即刚度值为恒定值; 考虑非线性结构力和位移呈非线性关系, 小位移时结构刚度较大, 随着位

移增加刚度逐渐变小, 加载载荷大于临界值(拐点)后, 非线性结构连接状态趋于稳定, 刚度值基本保持恒定。按照实际振动载荷(x 为190 kN, y 为50 kN, z 为50 kN)对捕获机构刚度进行识别, 三个方向刚度(P_x 为 x 方向刚度, P_y 为 y 方向刚度, P_z 为 z 方向刚度)取值见表1。

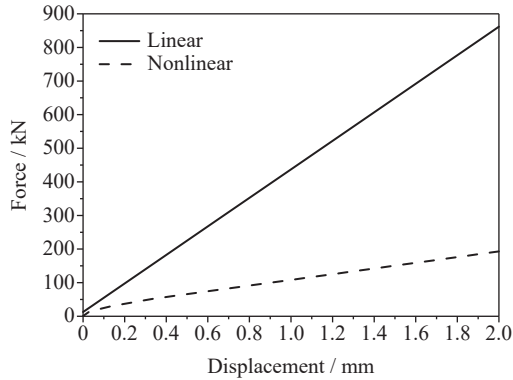


图5 x 方向力-位移曲线

Fig. 5 x -axis force-displacement curve

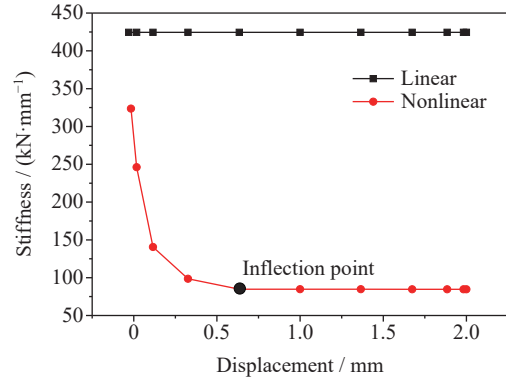


图8 x 方向刚度-位移曲线

Fig. 8 x -axis stiffness-displacement curve

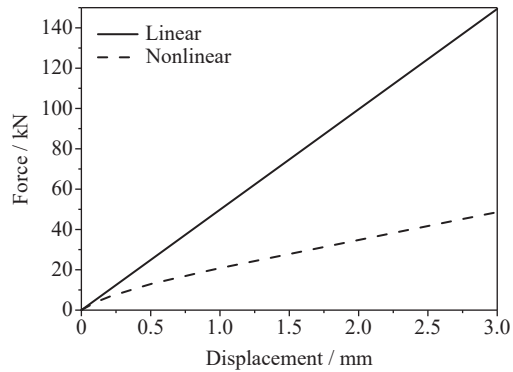


图6 y 方向力-位移曲线

Fig. 6 y -axis force-displacement curve

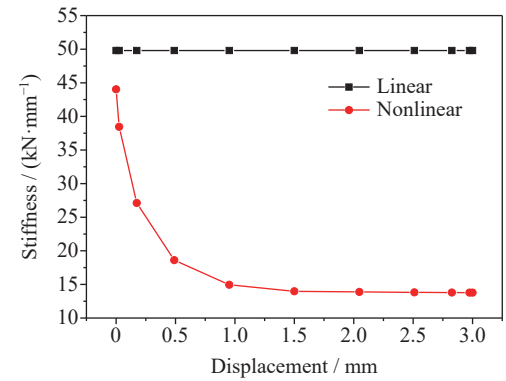


图9 y 方向位移-刚度曲线

Fig. 9 y -axis stiffness-displacement curve

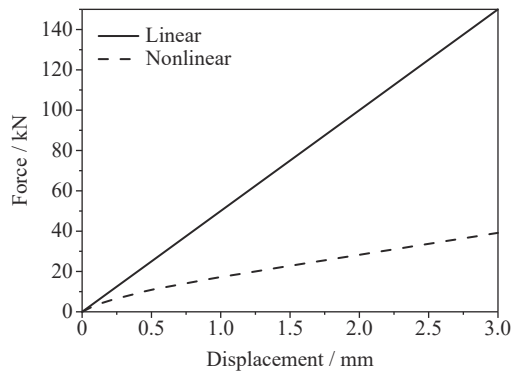


图7 z 方向力-位移曲线

Fig. 7 z -axis force-displacement curve

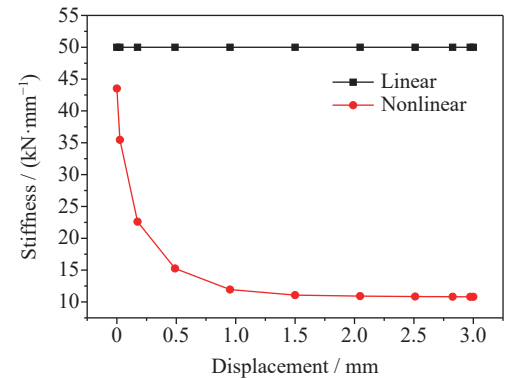


图10 z 方向位移-刚度曲线

Fig. 10 z -axis stiffness-displacement curve

由表 1 可知, 考虑非线性特性的捕获连接机构刚度显著低于不考虑非线性特性的结构刚度, 捕获连接机构在转位机构上作为主要承力部件, 将极大地影响转位机构的动力学性能, 由此可见, 要准确预示转位机构动力学特性必须考虑结构的非线性特性影响.

1.3 非线性刚度试验验证

捕获连接结构刚度对转位机构动力学分析至关重要, 为了验证捕获连接结构刚度的合理性, 开展了捕获连接机构的静刚度试验 (见图 11), 以获得捕获连接机构刚度值, 为捕获连接机构的刚度选取、转位机构动力学特性分析和结构拓扑优化奠定基础.

试验通过逐步加载方式进行, 获得了捕获连接机构三个方向力-位移曲线, 处理后得到位移-刚度曲线, 分析考虑非线性特性的曲线和刚度值与试验测试结果对比如图 12~14 和表 2 所示.

由图 12~14 和表 2 可知, 捕获连接机构主要方向刚度分析值与试验值误差均在 10% 以内, 满足工程应用, 说明了捕获连接机构非线性刚度分析方法的可行性.

表 1 分析刚度值 (单位: $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)
Table 1 Analysis values of the stiffness (Unit: $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)

工况	线性	非线性
P_x	424.5	84.6
P_y	49.8	13.8
P_z	50.0	10.8

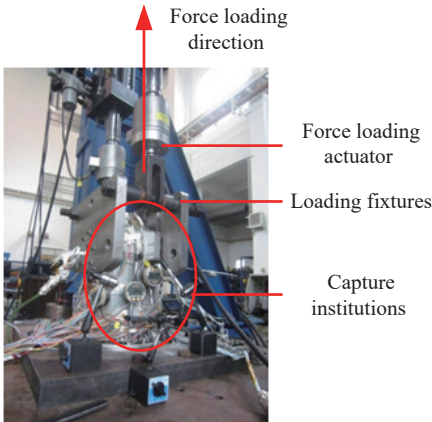


图 11 捕获连接机构静刚度试验
Fig. 11 Capture the static stiffness test of the connection mechanism

2 动力学分析模型

空间站转位机构中除了含非线性特性的捕获连接机构以外, 模型中还有两个齿轮旋转关节 (肩旋转

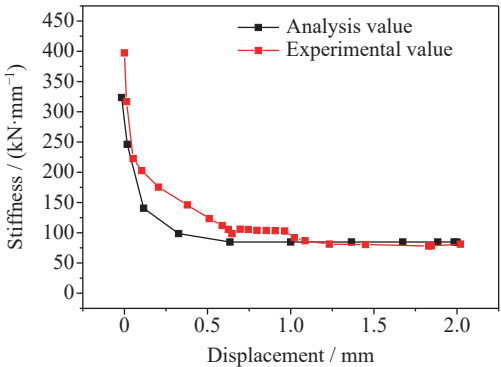


图 12 x 方向位移-刚度曲线试验与对比
Fig. 12 Comparison of x -axis stiffness-displacement curve testing and analysis

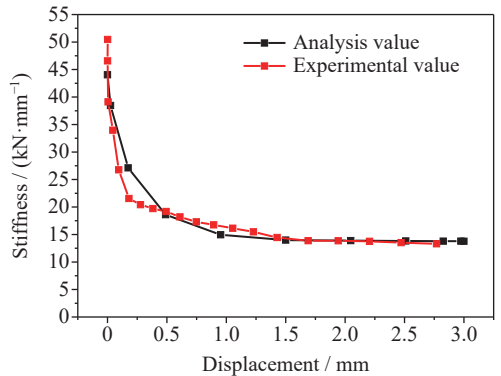


图 13 y 方向位移-刚度曲线试验与对比
Fig. 13 Comparison of y -axis stiffness-displacement curve testing and analysis

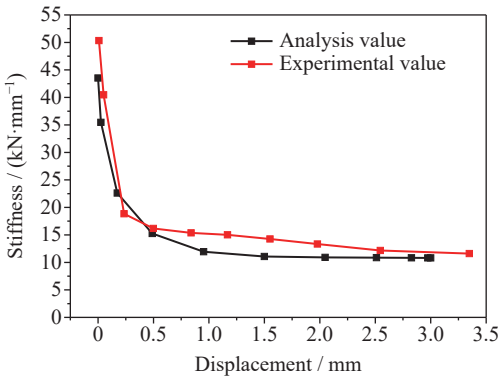


图 14 z 方向位移-刚度曲线试验与对比
Fig. 14 Comparison of z -axis stiffness-displacement curve testing and analysis

关节和腕旋转关节)、中间压紧释放机构, 齿轮旋转关节和压紧释放机构同样含有接触、碰撞、摩擦等非线性特性, 采用模拟加载的非线性刚度识别方法, 得到捕获连接机构的等效刚度, 建立了空间转位机构系统动力学分析模型 (见图 15 和图 16), 为拓扑优化分析建立基础。

3 拓扑优化建模

转位机构由于跨度比较大, 为满足一定的刚度和

表 2 刚度值对比
Table 2 Comparison of stiffness values

工况	刚度/(kN·mm ⁻¹)		误差/(%)
	分析值	试验值	
P_x	84.6	78.1	8.3
P_y	13.8	13.3	3.8
P_z	10.8	11.6	-6.9

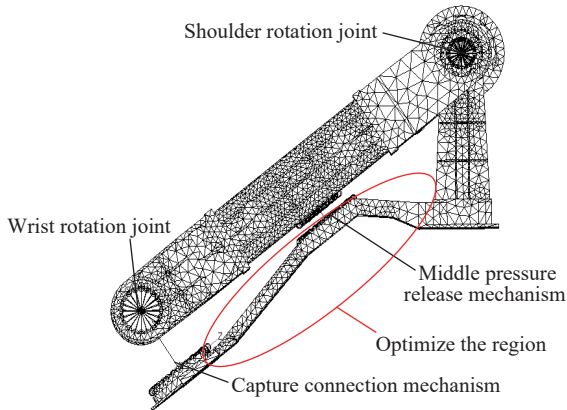


图 15 空间站转位机构分析模型

Fig. 15 Analysis model of the space station's transposition mechanism

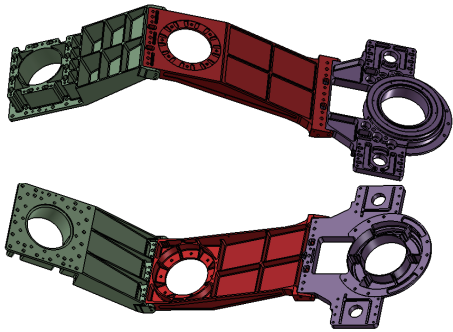


图 16 优化区域初始模型

Fig. 16 Initial optimization area model

强度要求, 需要增加中间支撑支架, 同时由于整个机构的重量指标限制, 现有的支架需要开展减重设计, 采用变密度法建立转位机构拓扑优化模型, 开展转位机构拓扑优化设计, 优化区域如图 15 和图 16 所示。

3.1 SIMP 模型

为建立转位机构的 SIMP 模型, 对其弹性矩阵 D 和质量矩阵 M 进行插值, 有

$$D = \rho^P D_0, \quad (5)$$

$$M = \rho^Q M_0. \quad (6)$$

式中, P 和 Q 表示惩罚因子; ρ 表示材料相对密度, 当 $\rho = 1$ 时表示具有实体材料, 当 $\rho = 0$ 时表示没有材料。

根据 Hashin-Shtrikman 上下限定理, 有下列不等式:

$$0 \leq K \leq \frac{\rho K^0 G^0}{(1 - \rho(x))K^0 + G^0}, \quad (7)$$

$$0 \leq G \leq \frac{\rho K^0 G^0}{(1 - \rho)(K^0 + 2G^0) + K^0}. \quad (8)$$

式中, K 和 G 为体积模量和剪切模量; K^0 和 G^0 为初始值。

3.2 拓扑优化模型

转位机构以单元相对密度 ρ 为设计变量, 施加体积约束, 建立以寻求结构动柔度 C_d 最小值为目标函数的拓扑优化模型, 可以进行如下表达。

求得密度向量

$$S = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}, \quad \rho_i \in \Omega,$$

最小化

$$C_d = (F_A^T U_A)^2;$$

约束条件

$$\begin{aligned} V' &= fV, \\ (K - \omega^2 M)U_A &= F_A, \\ D &= \rho^P D_0, \\ M &= \rho^Q M_0, \\ 0 < \rho_{\min} &\leq \rho_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (9)$$

式中, f 为体积分; V 为结构体积, V' 为其下限值。采用优化准则法 (OC) 求解转位机构拓扑优化模型, 将有约束的求极值问题转化为无约束问题, 设计变量更新迭代如下:

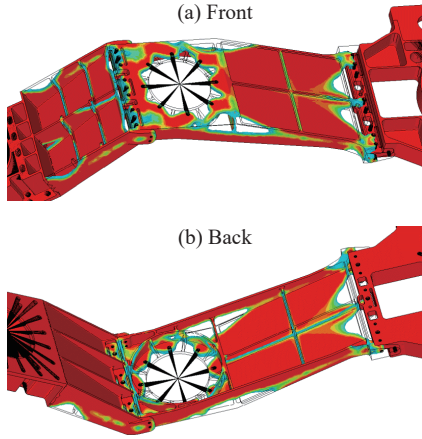


图 17 拓扑优化结果

Fig. 17 Topology optimization results

$$\rho_i' = \begin{cases} \max(\rho_{\min}, \rho_i - t), & \rho_i B_i^\eta \leq \max(\rho_{\min}, \rho_i - t); \\ \rho_i B_i^\eta, & \max(\rho_{\min}, \rho_i - t) < \rho_i B_i^\eta < \min(1, \rho_i + t); \\ \min(1, \rho_i + t), & \min(1, \rho_i + t) \leq \rho_i B_i^\eta. \end{cases} \quad (10)$$

式中, ρ_i' 为更新后的设计变量, t 为移动极限常数, η 为阻尼系数. B_i 可以表示为

$$B_i = \frac{-\partial C_d / \partial \rho_i}{\lambda \partial V / \partial \rho_i}. \quad (11)$$

式中, $\partial C_d / \partial \rho_i$, $\partial V / \partial \rho_i$ 分别为动柔度、体积对 ρ 的灵敏度; λ 为 Lagrange 乘子.

3.3 灵敏度分析

通过伴随分析法求解转位机构拓扑优化模型目标函数以及约束的灵敏度, 有

$$C_d = (\mathbf{F}_A^T \mathbf{U}_A)^2 - \mathbf{A}^T [(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U}_A - \mathbf{F}_A]. \quad (12)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为任意实向量.

对式 (12) 求导, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_d}{\partial \rho_i} &= 2(\mathbf{F}_A^T \mathbf{U}_A) \mathbf{F}_A^T \frac{\partial \mathbf{U}_A}{\partial \rho_i} - \mathbf{A}^T (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \frac{\partial \mathbf{U}_A}{\partial \rho_i} - \\ &\quad \mathbf{A}^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_i} \right) \mathbf{U}_A = [2(\mathbf{F}_A^T \mathbf{U}_A) \mathbf{F}_A^T - \\ &\quad \mathbf{A}^T (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})] \frac{\partial \mathbf{U}_A}{\partial \rho_i} - \mathbf{A}^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_i} \right) \mathbf{U}_A. \end{aligned} \quad (13)$$

伴随矩阵 $\mathbf{A}$ 需使上式右端第一项为 0, 通过计算 $\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i}$ 和 $\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_i}$, 再将 $\mathbf{A}$ 代入, 即可确定动柔度的灵敏度, 有

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_i} = \int_{\Omega} \mathbf{P} \mathbf{B}^T \rho^{p-1} \mathbf{D} \mathbf{B} \frac{\partial \rho}{\partial \rho_i} d\Omega, \quad (14)$$

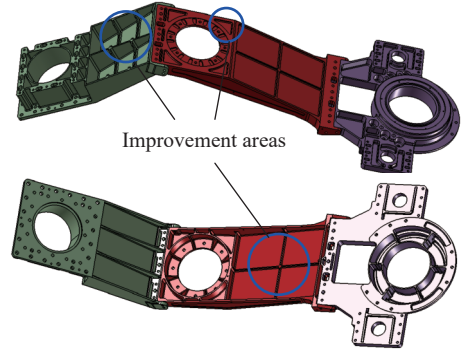


图 18 优化改进后模型

Fig. 18 Optimized and improved model

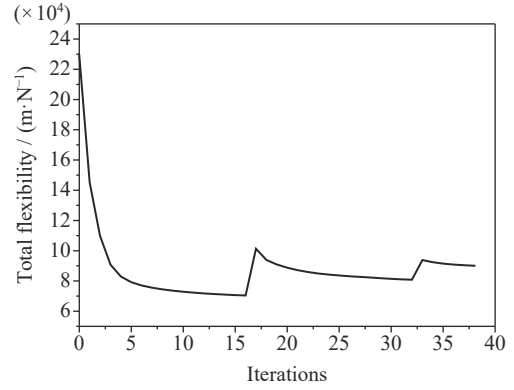


图 19 总柔度收敛曲线

Fig. 19 Total softness convergence curve

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_i} = \int_{\Omega} \mathbf{Q} \rho^{Q-1} \rho_m \mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi} \frac{\partial \rho}{\partial \rho_i} d\Omega. \quad (15)$$

其中, $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 为模态矢量. 转位机构支架的体积灵敏度可以表示为

$$V = \int_{\Omega} \rho d\Omega, \quad (16)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_i} = \int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial \rho_i} d\Omega. \quad (17)$$

4 拓扑优化结果

转位机构拓扑优化模型共有 344044 个实体单元, 580391 个节点, 采用 Altair 公司的 Optistruct 求解器进行求解, 最终得到拓扑优化后支架的最佳传力路径和材料分布如图 17 所示, 减重优化后的模型如图 18 所示, 总柔度收敛曲线如图 19 所示.

由图 17 可知, 图中红色区域材料密度接近于 1,

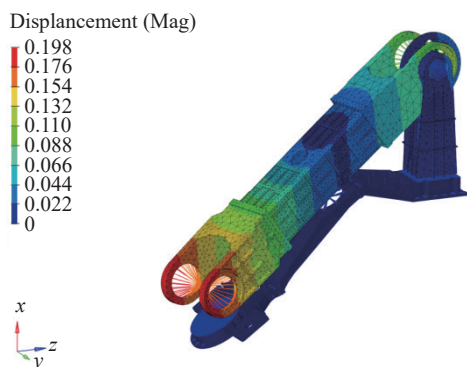


图 20 转位机构基频 44.2 Hz

Fig. 20 Sublocation mechanism has a fundamental frequency of 44.2 Hz

结构保留, 空白区域即是可去除区域, 为转位机构支架减重提供参考, 图 18 即为减重优化后的模型. 由图 19 可以看出, 转位机构支架总柔度在迭代 38 次后收敛, 说明支架的刚度在满足约束条件时达到最大, 此时设计区域的单元密度分布即为转位机构支架材料的最优分布.

针对转位机构支架拓扑优化结果进行了结构减重设计, 设计空间减重达到 24%, 同时对转位机构刚度和强度进行了验证, 验证结果如图 20 和图 21 所示.

由图 20 和图 21 可知, 优化后的转位机构基频为 44.2 Hz, 满足指标大于 40 Hz 的要求, 支架最大 Miss 应力为 198 MPa, 小于铝合金屈服强度 250 MPa.

5 结论

建立了转位机构捕获连接机构非线性结构模型, 通过模拟加载分析方法得到含非线性特性捕获连接机构的力-位移曲线, 根据实际工作载荷合理选取该结构的等效刚度, 并通过试验进行了验证; 同时基于建立的转位机构含非线性特性的动力学模型, 采用变密度拓扑优化方法开展了转位机构支架轻量化设计, 得到以下结论.

(1) 转位机构捕获连接机构考虑非线性特性分析结果与静刚度试验结果误差在 10% 以内, 满足工程实际应用需要, 说明了捕获连接机构非线性刚度分析方法的可行性.

(2) 对含非线性特性的转位机构进行了拓扑优化分析, 降低结构重量达到 24%, 同时分析结果表明转位机构满足刚度和强度要求, 达到了转位机构轻量化

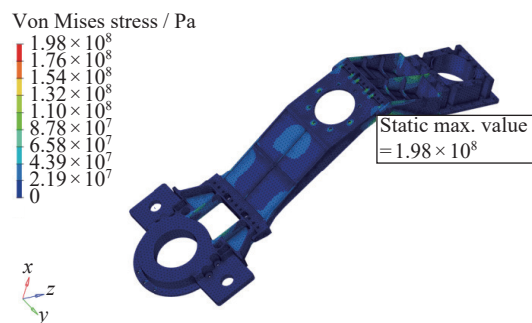


图 21 支架应力云图

Fig. 21 Stent stress cloud map

设计的目的.

含非线性特征的结构拓扑优化分析方法解决了含较多非线性特性的空间站转位机构拓扑优化分析, 分析结果满足工程需求, 为非线性特性的空间结构机构轻量设计提供一种解决途径, 为中国空间站重点工程项目的建设提供了技术支撑.

参考文献

- [1] BENDSOE M P, SIGMUND O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, **69**(9/10): 635-654
- [2] SUI Y K, YANG D Q. A new method for structural topological optimization based on the concept of independent continuous variables and smooth model[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1998, **14**(2): 179-185
- [3] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. *Computers & Structures*, 1993, **49**(5): 885-896
- [4] JIANG Yuanteng, ZHAO Min. Topology optimization of underwater pressure structure design with parametric level set method[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, **26**(3): 400-413 (蒋垣腾, 赵敏. 基于参数化水平集方法的水下耐压结构的拓扑优化[J]. *船舶力学*, 2022, **26**(3): 400-413)
- [5] XU Shipeng, DING Xiaohong, DUAN Pengyun, et al. Topology optimization of composite material microstructure considering time-changeable stiffness[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, **54**(1): 134-146 (徐世鹏, 丁晓红, 段朋云, 等. 考虑时变刚度特性的复合材料微结构拓扑优化设计方法[J]. *力学学报*, 2022, **54**(1): 134-146)
- [6] JI Xiaotong, XIE Liyao, WANG Kun, et al. Topology optimization of heat sink structure based on variable density method[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2022, **51**(1): 61-67, 87 (季晓彤, 解立垚, 王坤, 等. 基于拓扑优化的新型热沉翅片结构设计[J]. *河北工业大学学报*, 2022,

- 51(1): 61-67,87)
- [7] LIU Hongliang, FU Ling. A load cycle decomposition based fatigue calculation considered structural topology optimization method[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2022, **20**(1): 22-29 (刘宏亮, 付玲. 一种考虑载荷周期分解疲劳寿命计算的结构拓扑优化方法 [J]. 中国工程机械学报, 2022, **20**(1): 22-29)
- [8] HOU Liang, CHAI Xianghai, BAI Guojuan, *et al.* Research on topology optimization technology of shock loading structure of aeroengine nacelle relief valve[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, **33**(1): 58-65 (侯亮, 柴象海, 白国娟, 等. 航空发动机短舱泄压门冲击载荷结构拓扑优化技术研究 [J]. 航空科学技术, 2022, **33**(1): 58-65)
- [9] WU Shuhao, ZHANG Yongcun, LIU Shutian. Topology optimization for multi-functional structure with both load-bearing and thermal insulation capability considering transient effect[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(2): 142-149 (吴书豪, 张永存, 刘书田. 考虑瞬态效应的承载隔热多功能结构拓扑优化 [J]. 计算力学学报, 2022, **39**(2): 142-149)
- [10] LI Kongwei, XU Baoliang, LUO Yi, *et al.* Topology optimization design of reliability strategy for tent frame based on uncertainty theory[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, **44**(2): 348-355 (李孔伟, 徐宝亮, 罗益, 等. 基于不确定理论帐篷框架可靠性拓扑优化设计 [J]. 机械强度, 2022, **44**(2): 348-355)
- [11] WANG Tianshu, KONG Xianren, WANG Benli, *et al.* Analysis of deployment of spacecraft appendages with hinge gap[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001, **33**(3): 283-286 (王天舒, 孔宪仁, 王本利, 等. 含铰间间隙的航天器附件展开过程分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, **33**(3): 283-286)
- [12] XU Xiaosheng, YU Dengyun, QU Guangji. The natural frequency calculating for flexible spacecraft in free flight[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, **25**(2): 208-212 (徐小胜, 于登云, 曲广吉. 柔性航天器自由飞行状态系统基频的估算方法 [J]. 宇航学报, 2004, **25**(2): 208-212)
- [13] XU Chao, YANG Xuhui, ZHANG Duo. Study on nonlinear dynamic response of bolted jointed beam[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, **38**(2): 1-5 (徐超, 杨旭辉, 张铎. 螺栓连接梁的非线性动力学响应分析 [J]. 强度与环境, 2011, **38**(2): 1-5)
- [14] SONG Y, HARTWIGSEN C J, MCFARLAND D M, *et al.* Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, **273**(1/2): 249-276

作者简介



刘汉武 男, 1986年5月出生于四川绵阳市, 现为上海宇航系统工程研究所、宇航空间机构全国重点实验室高级工程师, 主要研究方向为结构与机构动力学、非线性动力学和拓扑优化分析等。
E-mail: jingxi105@163.com



张 华 (通信作者) 男, 1977年10月生, 现为上海宇航系统工程研究所、宇航空间机构全国重点实验室研究员, 研究方向为系统动力学与控制、复杂空间结构机构设计与优化等。
E-mail: ases_zhang@163.com