

基于ANSYS的水下机器人的框架优化设计

刘励韬, 安 浩, 李震宇, 孙 坤

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月28日; 录用日期: 2025年1月21日; 发布日期: 2025年1月29日

摘 要

本研究旨在通过ANSYS软件对水下机器人框架进行拓扑优化设计,以提高其结构性能并降低重量。首先,利用SolidWorks构建了水下机器人框架的三维模型,并在ANSYS Workbench中进行了静力学应力应变分析。分析结果表明,初始设计在承受水下压力时结构稳定,但中间部位形状不规则,可能影响应力分布。为了解决这些问题,对框架中间部位进行了精确建模,目标是将该部位的质量减少至原始的37.5%,并进行了进一步的应力和应变分析。优化后的框架在减轻重量的同时,保持了足够的结构强度和刚度,满足了设计要求。应力和应变分析显示,中间部位的应力集中现象得到了显著改善,整体应力分布更加合理,最大应力值远低于材料的屈服强度。此外,优化后的框架设计提高了制造工艺的可行性,确保了轻量化设计中的水下行驶工作条件。拓扑优化过程中,通过移除低应力区域的材料,实现了结构轻量化,同时保留了关键部位的材料,去除了对性能影响较小的部分。最终,优化后的框架模型在保证功能和强度的前提下,成功减少了材料使用量,为降低生产成本提供了依据。本研究为水下机器人框架的轻量化设计和材料优化提供了重要的技术支持,并为降低成本和提升性能提供了可行的工程解决方案。

关键词

水下机器人, 框架设计, 拓扑优化, 有限元分析, ANSYS, 轻量化, 结构强度, 制造工艺

ANSYS-Based Frame Optimization Design for Underwater Robots

Litao Liu, Hao An, Zhenyu Li, Kun Sun

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 28th, 2024; accepted: Jan. 21st, 2025; published: Jan. 29th, 2025

Abstract

The aim of this study is to optimize the topology design of an underwater robot frame by ANSYS

文章引用: 刘励韬, 安浩, 李震宇, 孙坤. 基于ANSYS的水下机器人的框架优化设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1276-1283. DOI: 10.12677/mos.2025.141115

software to improve its structural performance and reduce its weight. Firstly, a 3D model of the underwater robot frame was constructed using SolidWorks and a static stress-strain analysis was performed in ANSYS Workbench. The analysis results show that the initial design is structurally stable when subjected to underwater pressure, but the irregular shape of the middle part may affect the stress distribution and manufacturing process. To address these issues, the team accurately modeled the middle part of the frame with the goal of reducing the mass of the part to 37.5% of the original, and performed further stress and strain analyses. The optimized frame reduced weight while maintaining sufficient structural strength and stiffness to meet the design requirements. The stress and strain analyses show that the stress concentration phenomenon in the middle part has been significantly improved, and the overall stress distribution is more reasonable, with the maximum stress value well below the yield strength of the material. In addition, the optimized frame design improves the feasibility of the manufacturing process and ensures the working conditions for underwater driving in the lightweight design. During the topology optimization process, structural light weighting is achieved by removing materials in low-stress regions, while materials in critical areas are retained and parts with less impact on performance are removed. Ultimately, the optimized frame model successfully reduces the amount of material used while ensuring functionality and strength, providing a basis for reducing production costs. This study provides important technical support for lightweight design and material optimization of underwater robot frames, and offers feasible engineering solutions for cost reduction and performance enhancement.

Keywords

Underwater Robotics, Frame Design, Topology Optimization, FEA, ANSYS, Light Weighting, Structural Strength, Manufacturing Process

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球海洋产业的发展，资本和技术创新的优势使得众多优秀的海工装备进入市场，提升了海洋产业的技术含量。水下机器人作为能够在水下代替人类完成某些操作的极限作业机器人，在我国正处于快速发展阶段。由于水下环境恶劣且人类潜水深度有限，水下机器人成为了开发海洋的重要工具。自 20 世纪 80 年代起，中国便开始了对水下机器人的研究与开发。尽管已经开发了一些产品，但我国水下机器人的研制仍处于起步阶段，距离实际应用还有一段距离[1]。与此同时，我国在海洋开发、海上石油开采及军事领域对水下机器人的需求日益增长[2]。

近年来，水下机器人领域的研究进展显著。曹文强等人[3]通过水下机器人环绕运动，可实现对目标的近距离全方位监测。夏明海等人[4]设计了一种四自由度串级比例 - 积分 - 微分控制器与控制分配算法，提高水下机器人的机动性与稳定性。还有部分学者致力于机器人外框架的减碳与轻量化技术的研究与开发。

水下机器人工作环境的恶劣和复杂性要求其能够承受深海高压以及海浪的冲击。传统的水下试验由于实验条件和时间的限制，难以实现结构分析。此外，减轻水下机器人的重量也是一项基本要求，这可以转化为更大的负载、更长的航程和更高的续航力。近年来，随着计算机技术的高速发展，有限元分析在结构强度分析方面得到了广泛应用，成为解决复杂工程分析计算的有效途径。有限元分析软件 ANSYS 因其多物理场耦合分析功能成为 CAE 软件的主流应用，在工程分析中应用广泛。应用 ANSYS 对水下机

机器人进行结构优化及分析，不仅可以延长其使用寿命，还可以缩短研制周期，降低研制成本。因此，基于有限元的水下机器人框架结构优化及分析具有重要的现实意义。

2. 建模及有限元仿真分析

2.1. 水下机器人框架的建模

采用 SolidWorks 对机器人的受框架进行建模如图 1，有限元分析软件为 ANSYS。通过 SolidWorks 建成框架模型导入到 ANSYS-Workbench 中进行后续的静力学应力应变分析。在 20 米深的水下环境中，水下机器人将面临由水压引起的应力。根据流体静力学原理，水下压强可以通过公式 $P = \rho gh$ 计算，其中 ρ 是水的密度(大约为 1000 kg/m^3)， g 是重力加速度(大约为 10 m/s^2)， h 是水深。因此，在 20 米深度[5]，水下机器人受到的压强为 0.2 Mpa。

考虑到机器人各部分在海水中的受压面积，分别为 0.195 平方米、0.155 平方米和 0.145 平方米，我们可以利用公式 $F = P \times S$ ，其中 F 是受力， P 是压强， S 是面积)来计算各部分受到的压力。这样，不同部分受到的压力分别为 $3.9 \times 10^4 \text{ N}$ 、 $3.1 \times 10^4 \text{ N}$ 和 $2.9 \times 10^4 \text{ N}$ 。

对于水下机器人框架的材料选择，我们选用了 316L 不锈钢，这种材料以其优异的力学性能而著称，具体性能参数如表 1 所示，能够满足水下机器人在深海环境中的稳定性和耐久性需求。

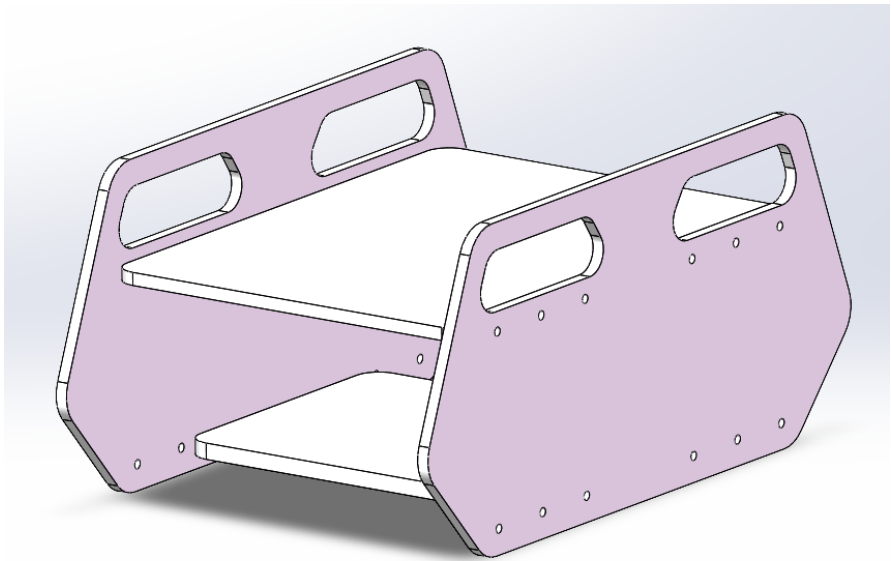


Figure 1. 3D schematic diagram of the robot frame
图 1. 水下机器人框架三维示意图

Table 1. Parameters related to underwater robot frame materials
表 1. 水下机器人框架材料相关参数

零件	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
机器人框架	7.89	193	0.3	177

2.2. 网格划分

根据 2.1 节中的材料参数属性，设置相应的材料参数。并进行网格划分，共生成 36875 个节点，7507 个单元，如图 2 所示。

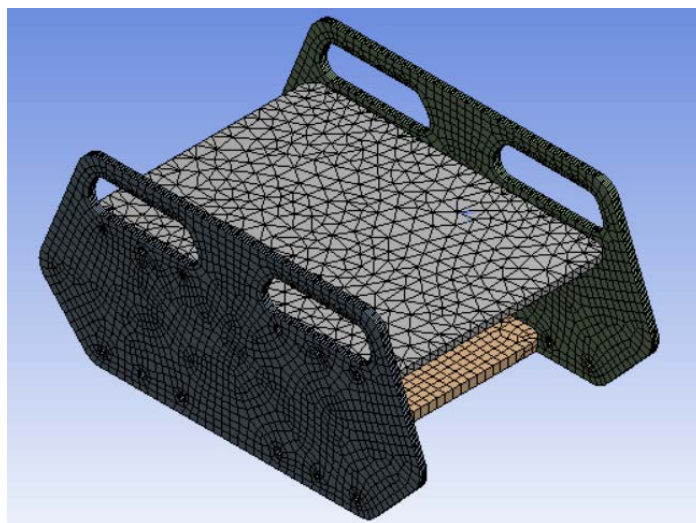


Figure 2. Schematic diagram of the meshing of the underwater robot framework model

图 2. 水下机器人框架模型网格划分示意图

2.3. 框架结构应力、应变分析

水下机器人在海洋环境中遭受来自各个方向的海水压力,这种压力均匀作用于其框架的各个外表面。根据图 3 所示,我们可以了解框架结构各受力面的具体受力状况。由于水下机器人的高度相较于其在海水中的深度较小,我们可以将其简化处理,在计算时假设机器人上部和下部的压力相等,即采用机器人几何中心处的压力作为计算依据。这样的假设有助于简化计算过程,同时对于分析水下机器人的结构强度和稳定性是合理的[6]。

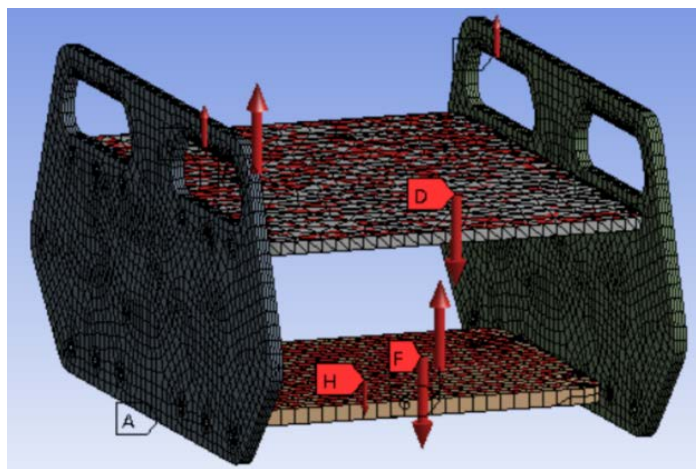


Figure 3. Schematic force diagram of underwater robot frame model

图 3. 水下机器人框架模型受力示意图

在图 3 的设置中, A 点为固定支撑, 而 B、C、H 三点各自承受的力为 10,000 N, D 点的受力为 29,000 N, E 点为 31,000 N, F 点为 39,000 N, G 点则是 41,000 N。通过运用 ANSYS 软件的静态分析模块, 我们对水下机器人的有限元模型进行了计算[7]。在受到外力作用时, 该模型显示出了一定的形变和应力集中, 具体表现在应力和变形上, 如图 4 和图 5 所展示的情况。

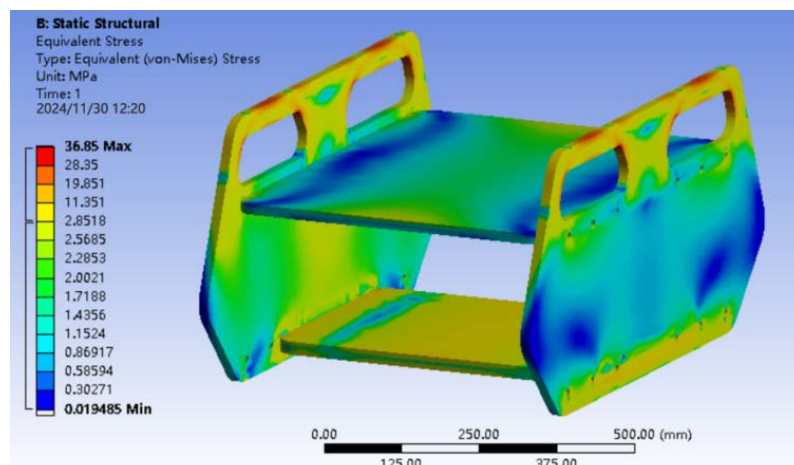


Figure 4. Stress cloud of underwater robot frame model

图 4. 水下机器人框架模型应力云图

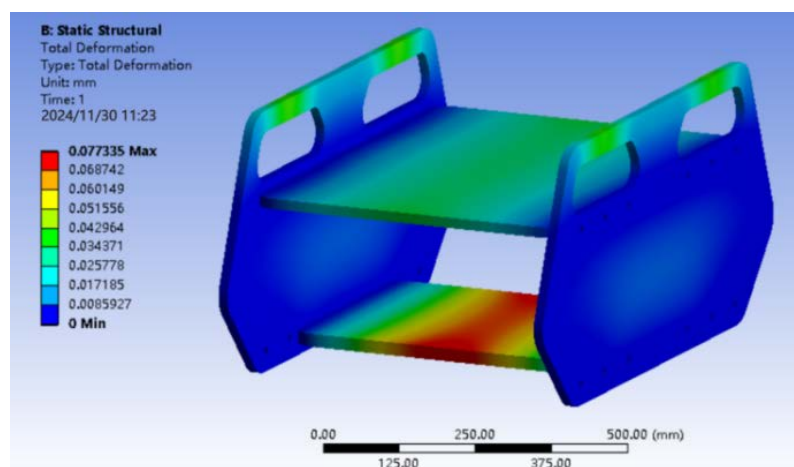


Figure 5. Strain cloud for underwater robot frame model

图 5. 水下机器人框架模型应变云图

根据图 4 的分析结果, 框架承受的最大等效应力为 36.85 Mpa, 这一数值低于 316L 不锈钢的屈服强度 177 Mpa, 因此框架结构符合设计规范。图 5 显示, 框架的最大变形量为 0.077335 mm, 远低于设定的 10 mm 限值。在 ANSYS 的静态力学分析中, 框架在受力时的应力和位移分布与材料力学理论预测一致, 这验证了模型设计的合理性以及结构的稳定性。

3. ANSYS 软件的拓扑优化

3.1. 拓扑优化概述

拓扑优化是一种先进的设计方法, 它专注于在指定的约束条件下, 找到最高效的材料布局。这种优化技术有时也被称作外形优化, 其核心在于优化材料的分布, 以实现结构性能的最大化。与常规的优化设计相比, 拓扑优化在 ANSYS 中拥有预设的目标函数、状态变量和设计变量。在进行分析和计算时, 用户只需提供结构的相关参数, 例如杨氏模量、泊松比以及载荷等, 还有需要移除材料的百分比, 软件便能自动进行优化计算。这种方法允许设计师在满足特定性能要求的同时, 减少材料使用, 优化结构设计 [8]。

对水下机器人优化的过程中主要包含目标函数、设计变量、约束条件三个要素，使用变密度法表达为

$$Find a = (A_1, A_2, \dots, A_n)^T \quad (1)$$

$$\min C(a) = F^T U \quad (2)$$

$$s.t. \begin{cases} V \leq V^* \\ F = KU \\ A_i = \{0,1\} (i=1,2,\dots,n) \end{cases} \quad (3)$$

其中， A_i 为设计变量； K 、 U 分别为外框架的总刚度矩阵和位移向量； F 为外框架所受的外力向量； V 为外框架体积； V^* 为外框架拓扑优化后的体积峰值。

根据 2.3 节的分析结果，为了提升水下机器人的结构效率，我们对机器人外框架的中间部分进行了拓扑优化。优化的目标是将该区域的体积减少到优化前的 30%，同时确保最大应力不超过材料的允许应力，即 177 MPa。通过这种优化，我们旨在保持结构强度的同时，减少材料的使用，从而降低重量和成本。

3.2. ANSYS 软件拓扑优化结果

在这项研究中，我们使用 ANSYS 对水下机器人外框架进行了拓扑优化，优化过程中通过移除低应力区域的材料，实现了结构轻量化。优化过程中，外框架结构逐渐达到最优状态，保留了关键部位的材料，去除了对性能影响小的部分，确保了外框架的承载能力满足设计要求。

图 6 展示了水下机器人框架体积变化曲线。在优化过程中，外框架体积先减少后增加，呈现出一个先下降再回升的趋势。这一趋势说明，在初始阶段，材料的大幅去除使得体积迅速减小，而随着迭代的深入，为满足结构的刚度要求，部分区域的材料又有所恢复，最终趋于稳定[9]。

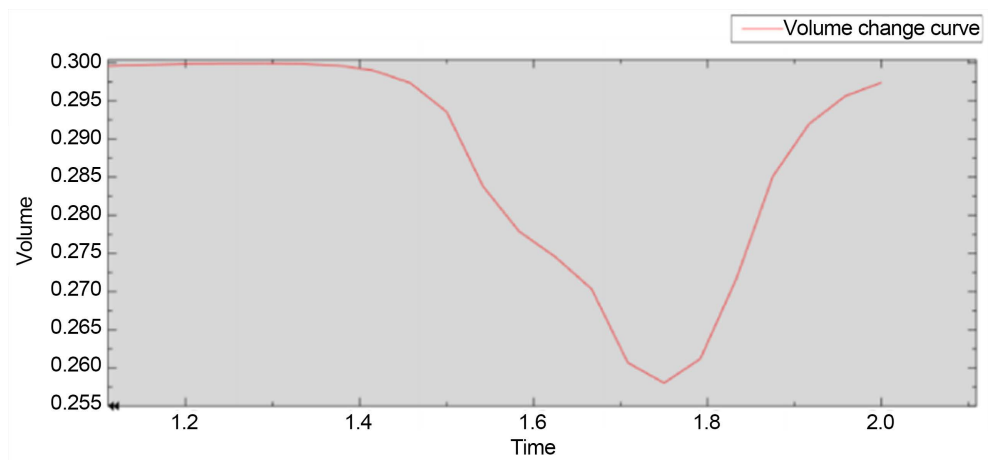


Figure 6. Volume change of underwater robot frame

图 6. 水下机器人框架体积变化

总的来说，这次拓扑优化在确保外框架的功能和强度的同时，有效地实现了结构的减重。优化后的设计不仅减少了材料的使用，还为降低制造成本提供了依据。考虑到框架中可减少的材料分布较为分散，且结构受力较为复杂，特别是在窄边上减少材料容易导致应力集中，因此决定不再对这些部分进行进一步的优化[10]。

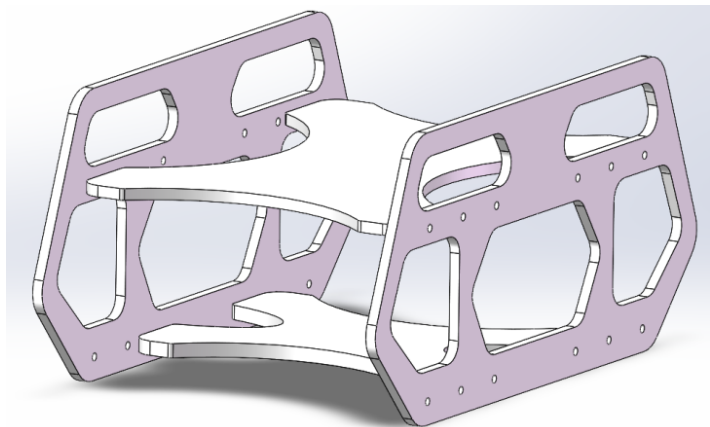


Figure 7. Optimized structure of an underwater robot frame
图 7. 水下机器人框架优化后结构

优化后的水下机器人框架的结构如图 7，为了保证其能够在正常条件下工作。利用图 3 中的施加力的条件继续对优化后的机器人框架进行静力学的应力，应变分析如图 8，图 9。

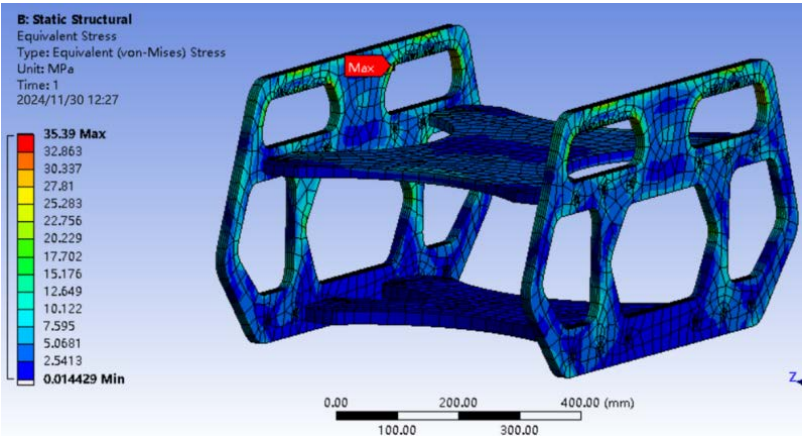


Figure 8. Stresses after optimization of underwater robot frames
图 8. 水下机器人框架优化后应力

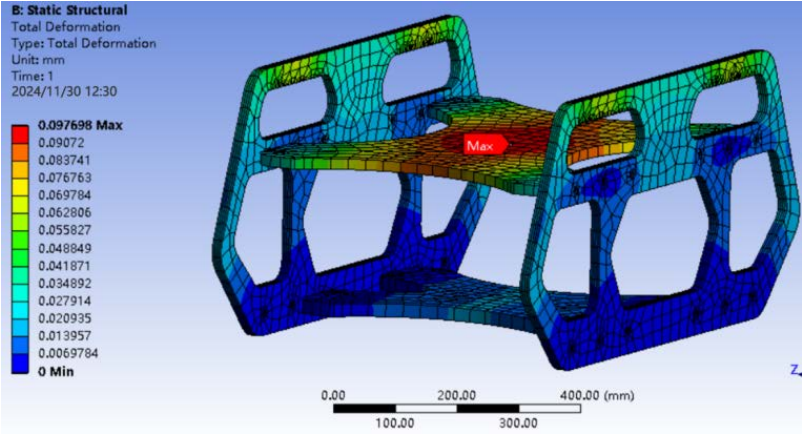


Figure 9. Strain after optimization of underwater robot frame
图 9. 水下机器人框架优化后应变

根据图 8 的数据，框架承受的最大应力为 35.39 MPa，这个数值低于 316L 不锈钢的屈服强度 177 MPa。图 9 显示，框架的最大变形量为 0.097698 mm，这也低于设定的最大变形量。在完成拓扑优化之后，水下机器人外框架的相关参数变化详见表 2。

Table 2. Parameters related to underwater robot frames
表 2. 水下机器人框架相关参数

	应力/MPa	最大位移/mm	质量/kg
框架优化前模型	36.85	0.077335	22.34
框架优化后模型	35.59	0.097698	13.395

4. 结论

在本研究中，使用 ANSYS 软件进行拓扑优化，这是一种先进的设计方法，能够自动寻找最优的材料分布。初步结果显示，框架中间部分的形状不够规则，可能影响整体的应力分布和制造工艺。精确控制框架中间部位的质量至原始的 37.5%，并对该模型进行了应力和应变分析。

分析结果表明，优化后的框架在减轻重量的同时，保持了足够的结构强度和刚度，满足了设计要求。应力，应变分析显示，中间部位的应力集中得到了显著改善，整体应力分布更加均匀，最大应力值远远低于材料的屈服强度。此外，改进后的框架设计提高了制造工艺的可行性，确保了轻量化设计中的水下行驶的工作条件。

通过优化设计和精确的有限元分析，我们不仅实现了框架的减重目标，还确保了其在实际应用中的可靠性和安全性。这为水下机器人框架的轻量化设计和材料优化提供了重要的技术支持，并为降低成本和提升性能提供了可行的工程解决方案。

参考文献

[1] 李帅, 穆瑞芳, 张壮志. 基于 ANSYS Workbench 拓扑优化对止动架轻量化的研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(7): 35-39+48.

[2] 郭政. 试析机械优化设计方法[J]. 山东工业技术, 2018(16): 41.

[3] 曹文强, 闫敬, 杨睨, 等. 基于流速场预测的水下机器人编队包围算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(12): 2794-2810.

[4] 夏明海, 尚建忠, 殷谦, 等. 水下机器人桨鳍协同推进姿态控制[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(6): 184-193.

[5] Shi, T., Liu, M., Niu, Y., Yang, Y. and Huang, Y. (2020) Underwater Targets Detection and Classification in Complex Scenes Based on an Improved Yolov3 Algorithm. *Journal of Electronic Imaging*, **29**, Article ID: 043013. <https://doi.org/10.1117/1.jei.29.4.043013>

[6] 国海芝. 海参捕捞机器人水下运动仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2018.

[7] 李迎, 邢心魁, 宋若翔, 张坚. 基于 ANSYS 平台的结构拓扑优化实现途径[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(4): 53-55.

[8] Zhuang, P., Li, C. and Wu, J. (2021) Bayesian Retinex Underwater Image Enhancement. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **101**, Article ID: 104171. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104171>

[9] 赵阳. 小型水下机器人耐压壳基本设计研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.

[10] 徐晟最, 王伟, 王国顺, 等. 仿生鳍式水下机器人轨迹优化运动控制[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(12): 1236-1242. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20241203.1603.012.html>