

# 基于Workbench的汽车发动机连杆有限元分析

马富军<sup>1</sup>, 李欢<sup>2</sup>, 侯重阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海

<sup>2</sup>河南工程学院外语学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年10月24日; 录用日期: 2024年11月14日; 发布日期: 2024年11月21日

## 摘要

本研究以汽车发动机连杆为对象, 基于ANSYS Workbench软件进行了系统的静力学分析、模态分析及拓扑优化设计。首先, 通过静力学分析得出了连杆在特定工况下的应力和位移分布, 并通过模态分析确定了连杆在不同频率下的动态响应特性。分析结果表明, 连杆在实际工况下能够满足强度要求, 其应力集中区域主要位于连杆小头和杆身连接处。基于前期分析结果, 采用拓扑优化技术对连杆中间部位进行优化处理, 使中间部分保持原有重量的70%以减少材料的使用。在优化过程中, 通过重新建模, 修正了初步拓扑优化结果中的几何不规则问题。最终, 通过有限元仿真分析验证了优化后连杆的力学性能, 结果显示, 优化后的连杆不仅大幅减轻了质量, 同时在应力和模态特性上仍符合设计要求。该研究提出了一种通过有限元仿真与拓扑优化相结合的轻量化设计方案, 为连杆优化设计提供了理论依据和实践指导。

## 关键词

汽车发动机连杆, 静力学分析, 模态分析, 拓扑优化

# Finite Element Analysis of Automobile Engine Connecting Rod Based on Workbench

Fujun Ma<sup>1</sup>, Huan Li<sup>2</sup>, Chongyang Hou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Foreign Languages, Henan University of Engineering, Zhengzhou Henan

Received: Oct. 24<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 14<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

This study focuses on the automobile engine connecting rod, conducting systematic static analysis, modal analysis, and topology optimization using ANSYS Workbench software. First, a static analysis was performed to obtain the stress and displacement distribution of the connecting rod under

specific working conditions, and modal analysis was conducted to determine the dynamic response characteristics of the connecting rod at various frequencies. The results indicate that the connecting rod meets the strength requirements under actual working conditions, with stress concentration primarily located at the junction of the small end and the rod body. Based on the preliminary analysis, topology optimization was applied to the central section of the connecting rod, reducing material usage by maintaining 70% of the original weight in this region. During the optimization process, the geometric irregularities in the initial topology optimization results were corrected through remodelling. The final finite element analysis results show that the optimized connecting rod significantly reduces weight while maintaining the stress and modal characteristics within design specifications. This study proposes a lightweight design approach by combining finite element simulation and topology optimization, providing theoretical support and practical guidance for the optimization of connecting rod design.

## Keywords

Automobile Engine Connecting Rod, Static Analysis, Modal Analysis, Topology Optimization

Copyright © 2024 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

汽车发动机连杆作为发动机中承受往复运动的重要部件，严格把控发动机连杆的机械加工质量十分重要[1]，其性能直接影响发动机的工作效率和寿命。因此，优化连杆的结构设计、减轻其质量、提升其工作可靠性，成为了工程设计中的关键问题。有限元仿真技术的应用，为发动机连杆的结构分析和性能评估提供了科学依据，通过模拟真实工作条件下的应力应变分布，可以有效预测连杆在不同工况下的力学性能。同时，利用 ANSYS 等有限元分析软件进行拓扑优化设计，可以在满足强度和刚度要求的前提下，进一步减轻连杆的重量，优化其结构，从而降低生产成本，提高发动机的综合性能。因此，基于 ANSYS 的有限元仿真和拓扑优化方法，不仅能够提高连杆设计的效率，还为现代汽车发动机轻量化设计提供了有效的技术手段。

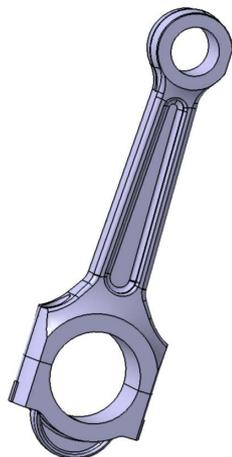
国内众多学者对发动机连杆展开了广泛的研究。程彬彬等人[2]通过数值模拟分析了发动机连杆在最大拉伸和最大压缩工况下的行为。此外，还有部分学者致力于发动机连杆的减碳与轻量化技术的研究与开发[3] [4]。

文章中所研究的发动机连杆受力情况复杂，工况极其恶劣，其可靠性和耐久性很大程度上决定了整个汽车发动机的可靠性和耐久性。汽车连杆一旦发生断裂失效，会对整个发动机造成极为严重的影响[5]。

## 2. 建模及有限元仿真分析

### 2.1. 发动机连杆的建模

采用 Catia 软件对发动机连杆进行建模，有限元分析软件为 ANSYS。通过 Catia 建成的连杆模型导入到 ANSYS 软件中进行后续的静力学模态仿真分析，模型如图 1 所示。汽车发动机连杆的材料选择 35 CrMo 调质钢。35 CrMo 材料相关的力学属性如表 1 所示。



**Figure 1.** The three-dimensional schematic diagram of an automobile engine connecting rod

**图 1.** 汽车发动机连杆三维示意图

**Table 1.** Material-related parameters of an automobile engine connecting rod

**表 1.** 汽车发动机连杆材料相关参数

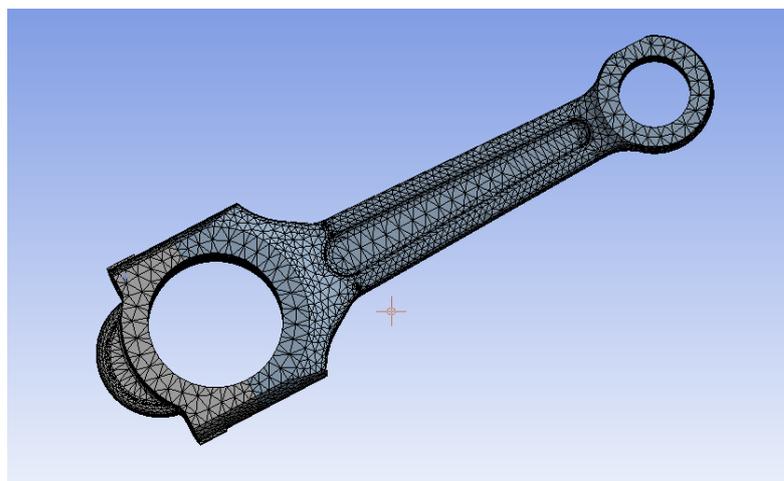
零件	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	屈服强度/MPa
发动机连杆	7850	206	0.286	835

## 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 48,967 个节点, 27,644 个单元, 如图 2 所示。

## 2.3. 模态分析

通过 ANSYS WORKBENCH 软件对发动机连杆的前六阶模态进行计算, 进而研究其固有频率对应的应力与应变特性。图 3~8 展示了模态分析的计算结果示意图。相关频率计算结果如表 2 所示。



**Figure 2.** Mesh division diagram of the automobile engine connecting rod model

**图 2.** 汽车发动机连杆模型网格划分示意图

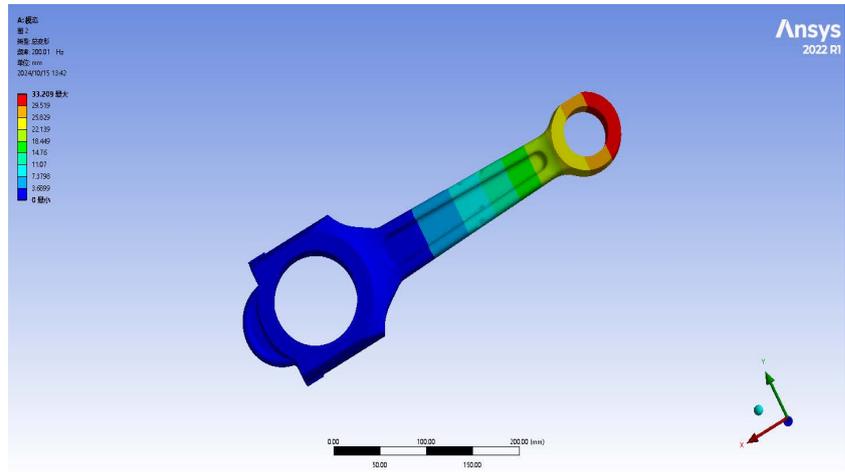


Figure 3. First mode shape diagram  
图 3. 一阶变形图

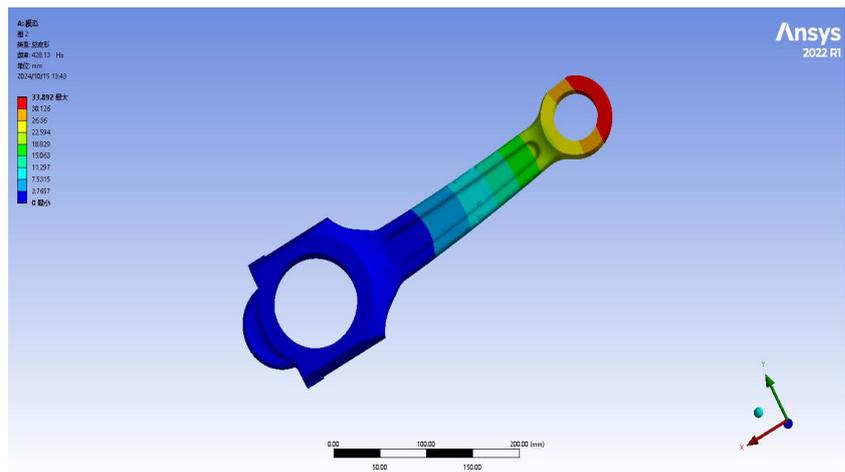


Figure 4. Second mode shape diagram  
图 4. 二阶变形图

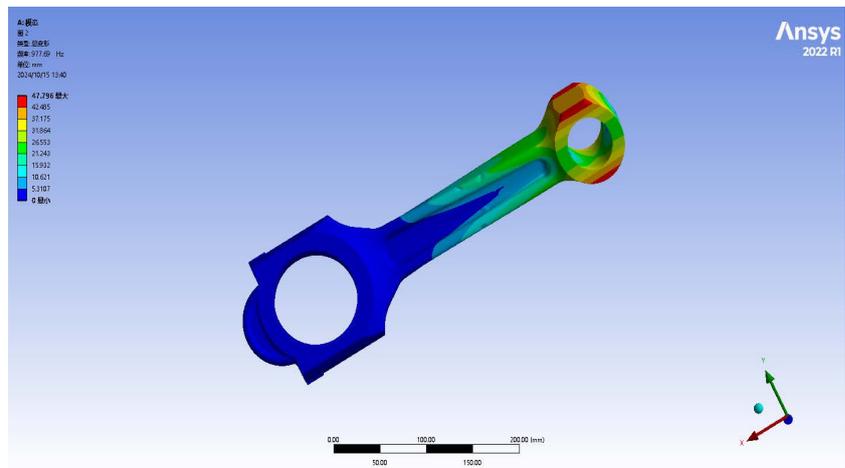


Figure 5. Third mode shape diagram  
图 5. 三阶变形图

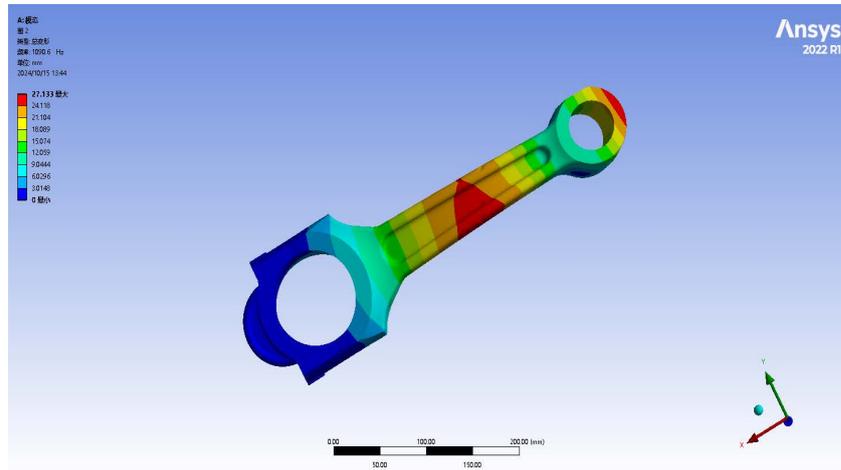


Figure 6. Fourth mode shape diagram  
图 6. 四阶变形图

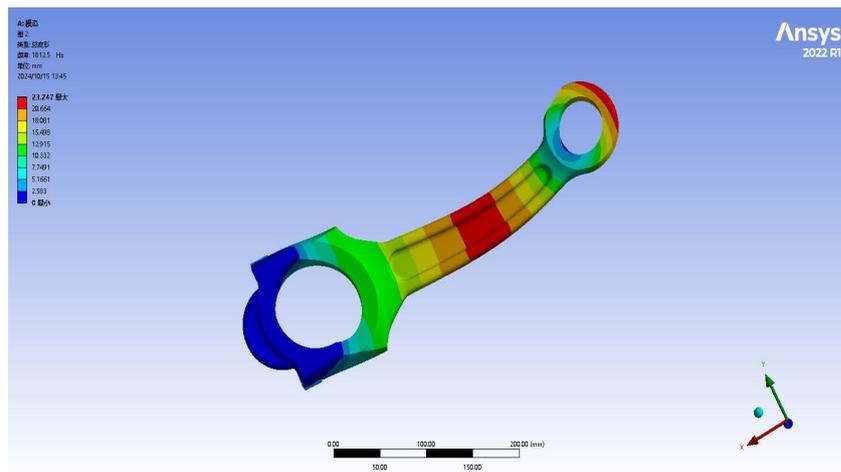


Figure 7. Fifth mode shape diagram  
图 7. 五阶变形图

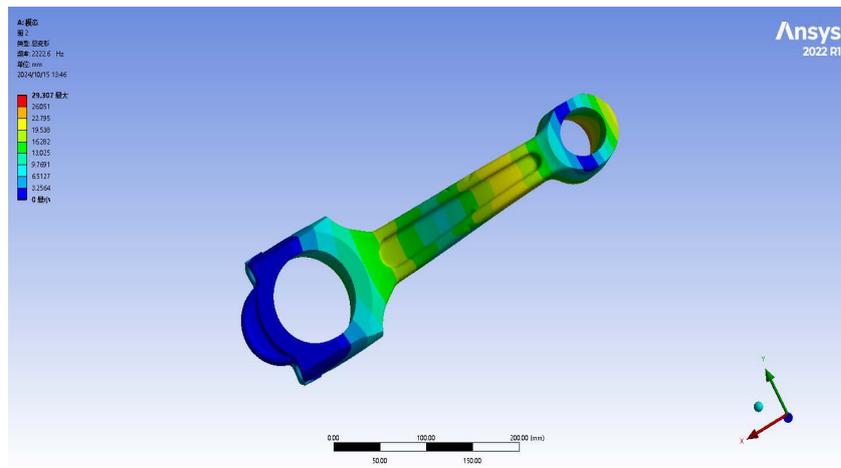


Figure 8. Sixth mode shape diagram  
图 8. 六阶变形图

**Table 2.** Modal frequencies related to the automobile engine connecting rod  
**表 2.** 汽车发动机连杆相关模态频率

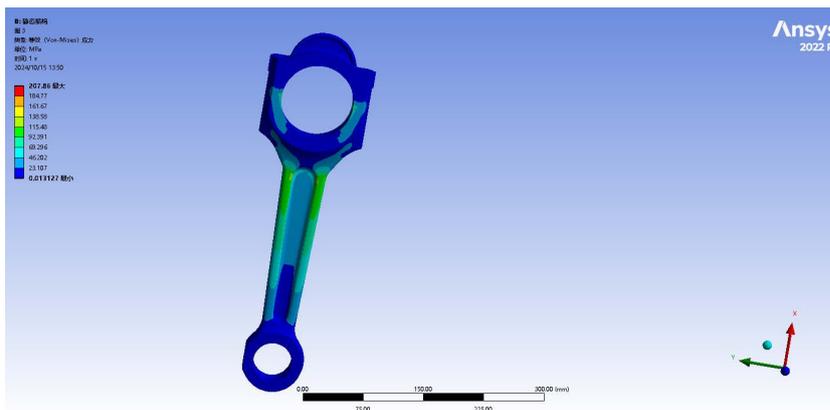
模态阶数	频率(HZ)	模态阶数	频率(HZ)
一阶模态	200.01	四阶模态	1090.6
二阶模态	428.13	五阶模态	1812.5
三阶模态	977.69	六阶模态	2222.6

在本研究中，我们对汽车发动机连杆进行了有限元模态分析，得到了该结构的前六阶固有模态频率。具体结果显示，一阶模态频率为 200.01 Hz，二阶模态频率为 428.13 Hz，三阶模态频率为 977.69 Hz，四阶模态频率为 1090.6 Hz，五阶模态频率为 1812.5 Hz，六阶模态频率为 2222.6 Hz。这些数据揭示了连杆在不同模态下的振动特性，频率随模态阶数的增加呈现上升趋势，表明高阶模态下连杆的振动形态更加复杂。

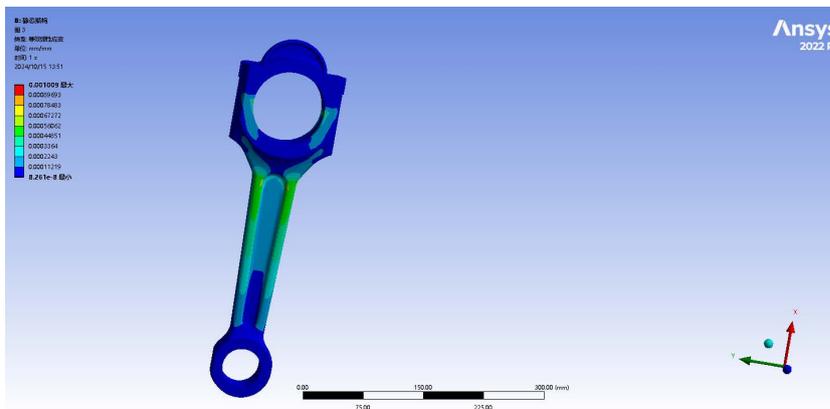
本次模态分析为连杆设计及性能评估提供了理论依据。未来的研究可以进一步结合实验数据，优化设计参数，从而提高连杆在实际工作中的抗振性能。

### 2.4. 应力应变分析

使用有限元仿真分析软件发动机连杆进行静力学分析[6]，在已完成网格划分的发动机连杆模型上，



**Figure 9.** Stress cloud diagram  
**图 9.** 应力云图



**Figure 10.** Strain cloud diagram  
**图 10.** 应变云图

针对小端耦合点施加 2000 N 载荷，并在大端施加固定边界条件，进行了静力学分析。分析结果如图 9 和图 10 所示。根据图 9 的结果，连杆的最大应力值为 207.86 MPa，远低于材料的许用应力，且最大应力的分布位置与应力集中区域的分布规律相符，该区域的弯曲应力达到最大值。图 10 显示，最大位移为  $1 \times 10^{-3}$  mm，位移值极小，基本可以忽略不计。该位移分布也与材料力学中受力构件的位移分布规律一致。

综上所述，通过基于 ANSYS Workbench 的静力学分析，连杆在受载条件下的应力和位移分布均符合材料力学的理论预期，验证了模型设计的合理性和结构稳定性。

### 3. ANSYS 软件的拓扑优化

#### 3.1. 拓扑优化概述

拓扑优化是在特定工况和参数约束条件下，针对构件进行结构优化的一种方法。其原理是通过优化材料的空间分布，寻找最优的布置方案，从而选择需要优化的对象。拓扑优化能够实现构件的轻量化设计[7]，从而通过减少材料的使用来降低生产成本。

对发动机连杆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； $K$ 、 $U$  分别为总刚度矩阵和连杆位移向量； $F$  为连杆所受的外力向量； $V$  为连杆体积； $V^*$  为连杆拓扑优化后的体积峰值。

根据 2.3 节的分析结果，对发动机连杆的中间部位进行拓扑优化，设置优化目标区域优化后的体积为优化前的 70%，最大应力需不超过材料的许用应力值 835 MPa。

#### 3.2. ABAQUS 软件的拓扑优化结果

在本次研究中，采用 ANSYS Workbench 对发动机连杆进行了拓扑优化。图 11 展示了拓扑优化区域的迭代结果，通过逐步去除低应力区域的材料，实现了结构的轻量化设计。在优化过程中，连杆的结构逐渐趋于最优状态，保留了关键部位的材料，同时去除了对整体性能影响较小的部分。该过程确保了连杆的承载能力满足设计要求。

图 12 显示了体积变化曲线。在优化过程中，连杆的体积先减少后增加，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

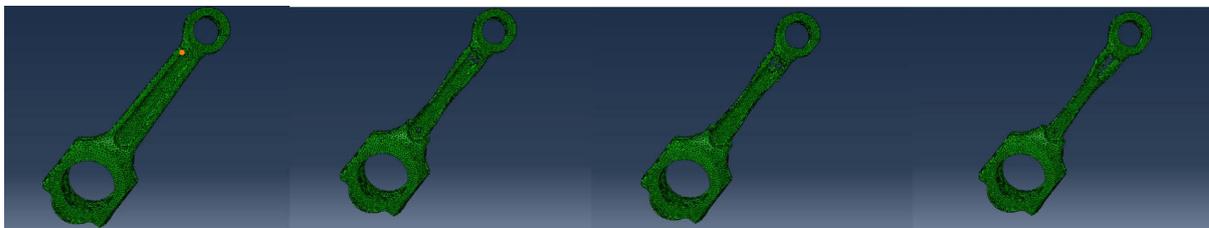


Figure 11. ANSYS topology optimization region iteration results  
图 11. ANSYS 拓扑优化区域迭代结果

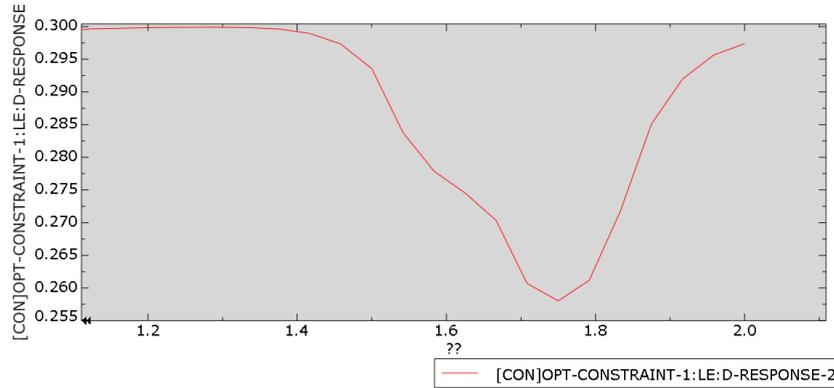


Figure 12. Volume change curve  
图 12. 体积变化曲线

构的刚度要求，部分区域的材料又有所恢复，最终趋于稳定。

总体而言，本次拓扑优化在保证连杆功能和强度的前提下，成功实现了结构的轻量化，优化后的设计不仅减少了材料使用量，还为降低生产成本提供了有力依据。

优化后的汽车发动机连杆应力应变如图 13、图 14 所示，优化前后发动机连杆相关参数见表 3：

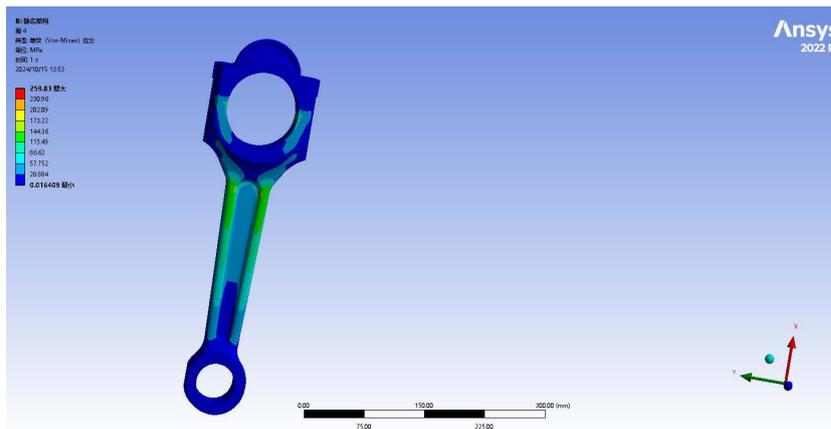


Figure 13. Stress contour plot after topology optimization adjustment  
图 13. 拓朴优化后修正应力云图

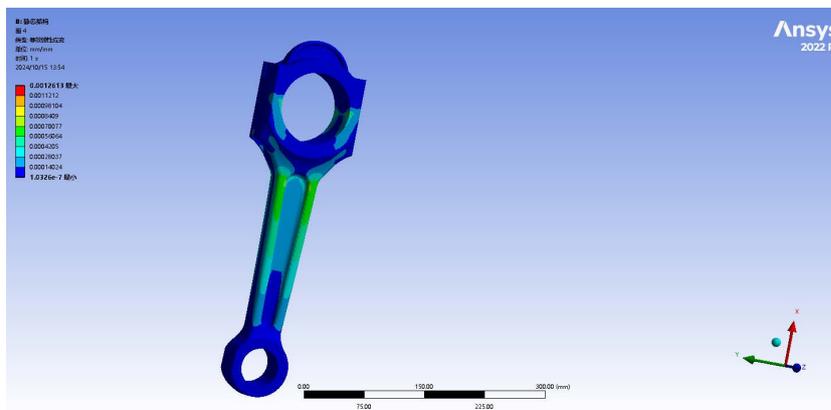


Figure 14. Strain contour plot after topology optimization adjustment  
图 14. 拓朴优化后修正应变云图

**Table 3.** Material-related parameters of an automobile engine connecting rod  
**表 3.** 汽车发动机连杆材料相关参数

结构	最大应力	最大位移
连杆优化前模型	207.86 MPa	$1.009 \times 10^{-3}$ mm
连杆优化后模型	259.83 MPa	$1.121 \times 10^{-3}$ mm

## 4. 结论

在本研究中, 基于 ANSYS 软件对汽车发动机连杆进行了拓扑优化设计。初步拓扑优化结果显示, 连杆中间部位的形状不够圆整, 存在一定的结构不规则性, 这可能对整体应力分布和加工工艺造成不利影响。为解决这一问题, 我在拓扑优化的基础上重新进行了精确建模, 特意使连杆中间部位的质量保持在原有的 70% 水平, 并对改进后的模型进行了进一步的应力和应变分析。

通过有限元分析得出的结果表明, 优化后的连杆模型在大幅度减轻质量的同时, 其结构强度和刚度依然满足设计要求。应力应变分析结果显示, 中间部位的应力集中现象得到了显著改善, 连杆整体的应力分布更加合理, 局部最大应力值远低于材料的屈服强度。此外, 重新建模后的连杆设计有效改善了制造工艺的可行性, 确保了在轻量化设计过程中连杆的加工和装配精度。

本次研究充分证明了在 ANSYS 平台上进行拓扑优化和有限元仿真的有效性与准确性。通过优化设计与精确的有限元分析, 不仅实现了连杆结构的减重目标, 还确保了其在实际工况下的可靠性和安全性。这为未来连杆的轻量化设计和材料优化提供了重要的技术支持, 并为降低生产成本和提升性能提供了可行的工程解决方案。

## 参考文献

- [1] 张岚. 发动机连杆机械加工工艺绿色化研究[J]. 内燃机与配件, 2024(18): 57-59.
- [2] 程彬彬. 基于数值模拟的发动机连杆强度分析及结构改进[J]. 机械工程师, 2024(5): 18-20.
- [3] 渠娜, 刘俊杰. 发动机连杆减碳技术研究及开发[J]. 内燃机与配件, 2022(11): 31-33.
- [4] Shenoy, P.S. and Fatemi, A. (2006) Dynamic Analysis of Loads and Stresses in Connecting Rods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **220**, 615-624.
- [5] 李宁, 周惠芳, 赵金铭, 卢冰燕, 聂志水, 崔亮. 发动机连杆断裂失效分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2022, 50(3): 32-36.
- [6] 罗勇, 成刚虎. 模切机连杆机构的弹性静力学分析[J]. 轻工机械, 2008, 26(4): 29-31.
- [7] 陈潇凯, 李超, 白影春, 等. 汽车多材料控制臂拓扑优化方法[J]. 汽车工程, 2021, 43(7): 1088-1095.