

# 麦弗逊悬架汽车转向节结构有限元分析与拓扑优化

梁林森

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月24日

## 摘要

汽车转向节的主要功能是连接汽车的车轮和转向系统, 通过转向器向车轮传递转向力, 实现汽车的转向。由于其在汽车行驶中的重要性, 任何对其性能的改进或优化都将对整边汽车的安全性和可靠性产生显著的影响。特别是在新能源汽车领域, 由于需要考虑到能源效率和环保要求, 轻量化设计成为了一种重要的设计策略。本研究基于ANSYS Workbench软件对转向节进行有限元分析, 负荷和边界条件的设置是基于汽车在实际行驶中的真实情况, 以及转向节在汽车中的装配情况。通过求解有限元模型, 研究者得出了转向节在各种工况下的应力分布。针对转向节在各种工况下的受力特点, 进行拓扑优化设计。优化设计的结果再一次导入到ANSYS软件中, 进行强度和稳定性的验证。这个验证的结果被用来比较优化前后的数据, 以证明优化的可行性和可靠性。通过这种方法, 本研究为各类车型转向节的轻量化设计提供了一个科学、实用的参考。

## 关键词

汽车转向节, 拓扑优化, 轻量化, 有限元分析

# Finite Element Analysis and Topology Optimization of McPherson Suspension Automobile Steering Knuckle Structure

Linsen Liang

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

Received: Dec. 24<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 17<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 24<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The main function of the automobile steering knuckle is to connect the automobile wheel and steering system, and transfer the steering force to the wheel through the steering gear to realize the steering of the automobile. Due to its importance in car driving, any improvement or optimization of its performance will have a significant impact on the safety and reliability of the full-sided vehicle. Especially in the field of new energy vehicles, lightweight design has become an important design strategy due to the need to take into account energy efficiency and environmental protection requirements. This research is based on ANSYS Workbench software for the finite element analysis of steering knuckles. The load and boundary conditions are set based on the real situation of the car in actual driving and the assembly of steering knuckles in the car. By solving the finite element model, the stress distribution of the knuckle under various working conditions was obtained. According to the stress characteristics of the steering knuckle under various working conditions, the topology optimization design is carried out. The results of the optimized design were once again imported into ANSYS software for strength and stability verification. The results of this verification are used to compare the data before and after optimization to prove the feasibility and reliability of the optimization. Through this method, the research provides a scientific and practical reference for the lightweight design of various types of vehicle steering knuckles.

## Keywords

Automobile Steering Knuckle, Topology Optimization, Light Weight, Finite Element Analysis

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

汽车转向节作为汽车转向系统的核心部件，其设计和表现直接决定了汽车的驾驶和安全性[1]。传统的设计方法常常采用基于经验的设计和尝试错误的方法，这导致了设计过程耗时长、成本高和效率低，同时也难以满足不同情况下的需求。然而，随着计算机模拟技术的进步，基于拓扑优化的汽车转向节设计已经成为一个研究焦点。在考虑不同技术限制的情况下，通过建立多目标拓扑优化目标函数，可以快速有效地获取优化结果，从而显著提高转向节的性能和质量。另外，拓扑优化设计也能大大减少设计的时间和成本，提高设计的效率和可靠性，同时也能降低产品的开发风险，因此有着广泛的应用前景。虽然国内外的学者已经进行了大量的研究，包括一些基于 ANSYS 平台的模态分析，然而，当前对于转向节的综合及详细分析仍有所匮乏。因此，在深入研究模态分析理论的基础上，本研究利用了 ANSYS 的结构动力学分析模块，对转向节进行了模态分析，并计算和获取其振动特性，寻找出自然振型和频率，进一步分析其模态特性。该研究旨在为汽车转向节的结构设计和性能优化提供有益的参考，并对汽车工业的发展做出贡献[2]。

## 2. 拓扑优化的原理和方法

拓扑优化的基本原理建立在材料优化理论和结构力学原理上，其主要目的就是通过对建筑结构的材料分布和形状的重新设计和优化，从而实现在满足某些特定约束条件的前提下，让结构变得更轻便、强度更高、刚性更强等多项优化目标。在实践中，拓扑优化的流程一般包括以下几个步骤：首先，在建立

起结构的初始模型和有限元模型后，明确其材料属性和各种约束条件。其次，在模型中选定需要优化的区域和参数，定义出优化目标和约束条件[3]。接着，进行拓扑优化计算，通过自动添加或减去材料，调整结构形状和材料分布，把优化目标实现出来。之后，对优化结果进行评估和验证，确定出最后的优化结构和参数。最后，基于优化结果，建立起工程化结构数模，便可在实际中得以应用[4]。

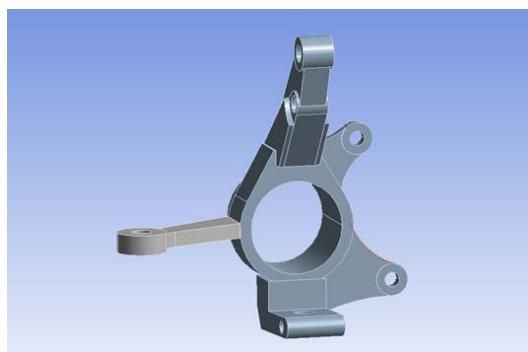
### 3. 设计汽车转向节三维模型

由于本文所选的研究对象结构较复杂，在建立三维模型时，对其进行简化，删除了部分连接件。  
表 1 为转向节的主要参数，在 SolidWorks 中建立的简化后的三维模型如图 1 所示。

**Table 1.** Main parameters of steering knuckle

**表 1.** 转向节主要参数

名称	尺寸/mm
转向节高度	250
转向节宽度	255
转向节厚度	130
中间孔直径	76
上端两孔直径	14
左端孔直径	16
右端两孔直径	12



**Figure 1.** 3D model of steering knuckle

**图 1.** 转向节三维模型

#### 3.1. 汽车转向节有限元建模

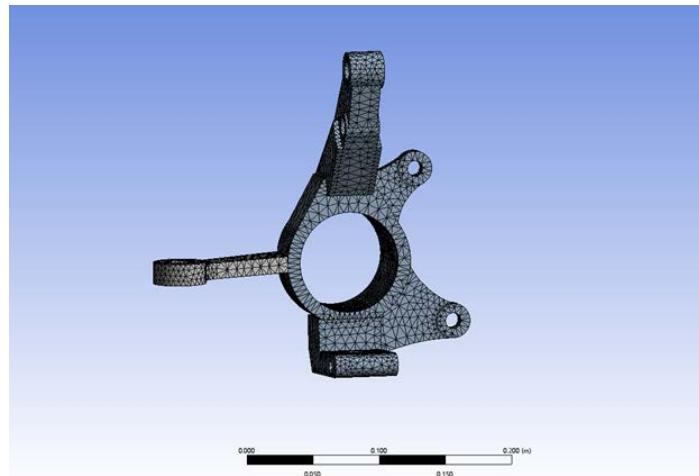
转向节作为一种至关重要的汽车安全结构部件，传统上使用的是铸铁和铸钢这些材料来制造。然而，这些材料都具有重量较大的缺点，并且它们难以满足现代汽车减轻重量的需求。因此，现如今，大多数的汽车转向节已经开始采用铝合金材料来制造[5]。在本文中，我们也选择铝合金作为转向节的材料。铝合金有着众多优点，如质地轻便，强度优越，耐腐蚀性能良好，以及加工性能佳等，这些都使铝合金成为制造转向节的理想材料。其材料属性如表 2 所示。

**Table 2.** Aluminum alloy material properties

**表 2.** 铝合金材料属性

材料	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
铝合金	71000	0.33	2.77e <sup>-6</sup>	280	310

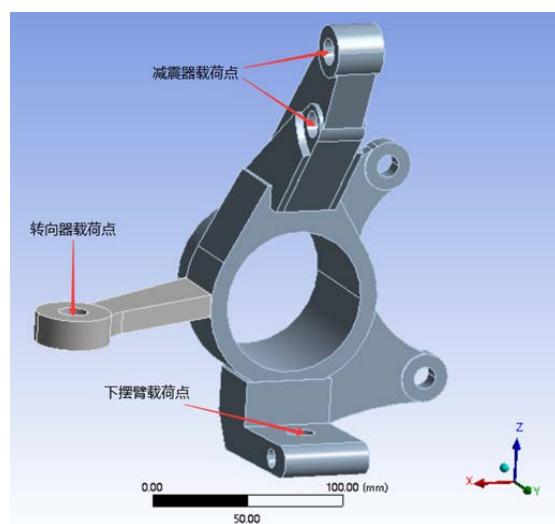
在选择了铝合金作为材料后，我们开始了网格划分工作。在执行网格剖分的过程中，我们不仅要确保数值的精确度，同时还要考虑到对称性以及可重复性等因素。这样的处理方式能帮助我们在进行数值求解时，大大减少所需的时间。为了在计算效率和计算精度之间取得平衡，我们选择 4 mm 的单元精度来生成网格如图 2 所示。当通过自动生成后，我们得到了总共 36681 个的网格节点和 20047 个单元。这样的数量充分满足了我们对精度和效率的要求。



**Figure 2.** Steering knuckle finite element meshing  
**图 2.** 转向节有限元网格划分

### 3.2. 设定汽车转向节边界条件

本文以麦弗逊悬架转向节作为研究对象，其受到的载荷一般来源于车轮轮毂、制动卡钳、悬架摆臂、减震器和转向器拉杆，结合实际汽车行驶状态，转向节典型的受力工况一般包括垂直冲击工况、极限转向工况、前进制动工况。上述工况下转向节模型的载荷点有减震器载荷点、转向器载荷点和下摆臂载荷点，各个工况下不同载荷所构成的转向节力边界条件如图 3 所示。



**Figure 3.** Automobile steering knuckle boundary condition setting  
**图 3.** 汽车转向节边界条件设定

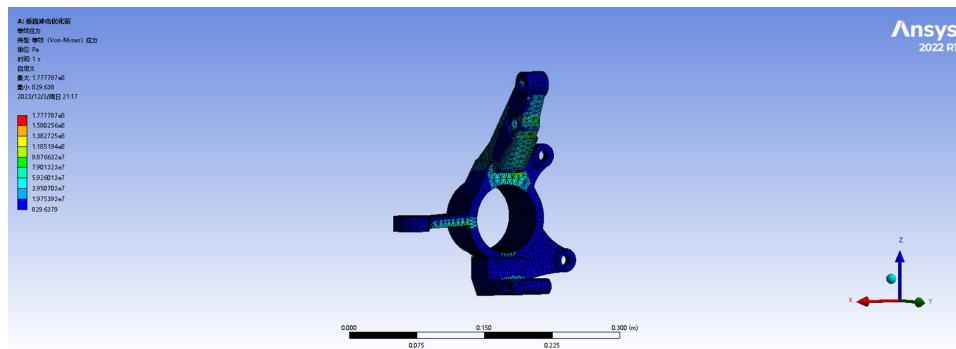
### 3.3. 汽车转向节各工况有限元模型求解与结果分析

根据汽车实际载荷和悬架结构, 对上述建好的有限元模型, 在各种工况下施加相应的载荷, 如表 3 所示。

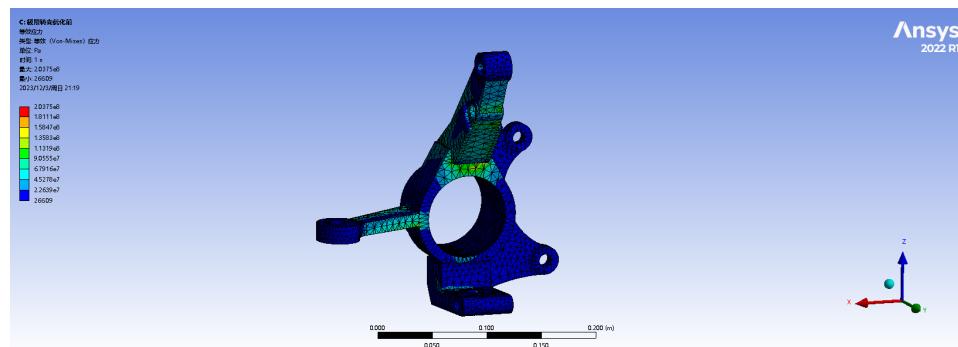
**Table 3.** Load table of steering knuckle under different working conditions  
**表 3. 转向节各工况下载荷表**

工况	载荷点	F <sub>x</sub> /N	F <sub>y</sub> /N	F <sub>z</sub> /N
垂直冲击	减震器	-2300	-7000	-15800
	转向器	250	1050	-350
	下摆臂	2800	5300	-1100
极限转向	减震器	-1300	37	-13000
	转向器	-800	-2000	200
	下摆臂	2800	-6500	1200
前进制动	减震器	2000	-2500	-800
	转向器	16	500	2
	下摆臂	-13000	2100	68

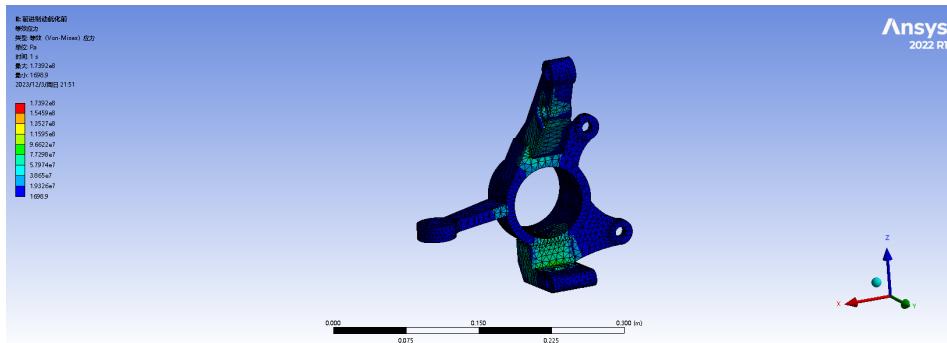
采用有限元法对三种工况下的转向节模型进行分析求解, 得到三种工况下的等效应力云图, 其应力云图如图 4~6 所示。



**Figure 4.** Optimized pre-vertical impact steering knuckle equivalent stress nephelae  
**图 4. 优化前垂直冲击转向节等效应力云图**



**Figure 5.** Optimized front limit steering knuckle equivalent stress nephelae  
**图 5. 优化前极限转向转向节等效应力云图**



**Figure 6.** Optimized forward braking steering knuckle equivalent stress nephogram

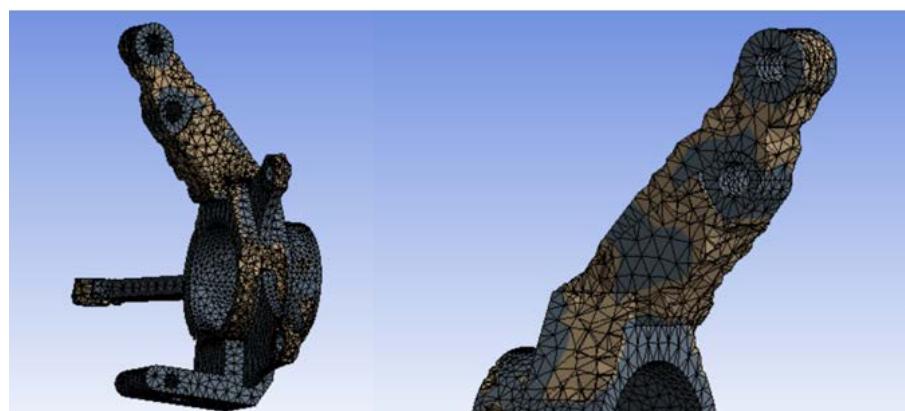
**图 6.** 优化前前进制动转向节等效应力云图

在经过三种不同工况的转向节应力等效云图分析后，我们可以得出以下的结论：在垂直冲击工况下，最大应力为 177.78 MPa；在极限转向工况下，最大应力为 203.75 MPa；在前进制动工况下，最大应力为 173.92 MPa。这些最大应力值都尚未超过所使用的铝合金材料的屈服强度，因此满足了强度的要求。并且，其中在极限转向工况下出现的 203.75 MPa 的最大应力，与使用的铝合金屈服极限 280 MPa 相比，还有着 76.25 MPa 的裕度。这部分剩余的强度可以被用于改进转向节的设计，以使其更加的轻巧。依据转向节的有限元分析生成的云图，我们可以看到最大主应力的分布。根据这个分布，我们可以选择在应力较小的部位适当去除一些铝合金材料，以此实现对转向节的轻量化设计。这种设计可以采取剪切方式进行，目的是在满足强度要求的前提下，尽可能的减少转向节的重量。这将对降低汽车的污染物排放及能源消耗起到积极的作用。

## 4. 基于汽车转向节进行拓扑优化

### 4.1. 设计建模优化后汽车转向节三维模型

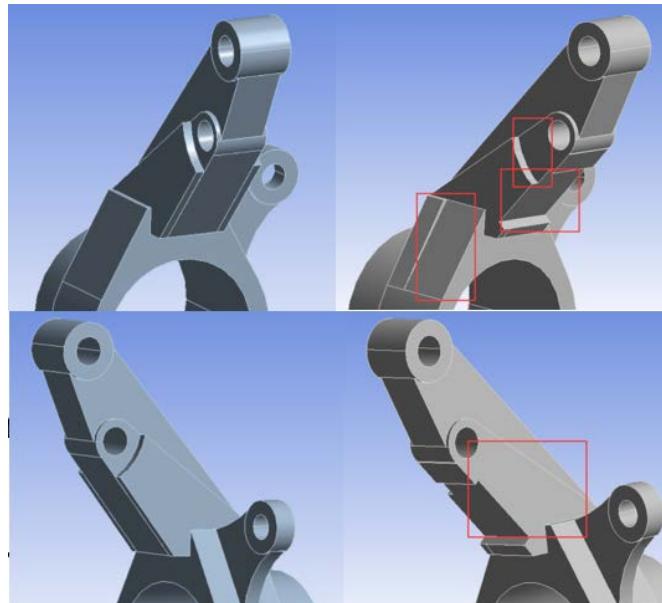
如果在原始的车轮转向节模型上随意减少材料，很可能会造成轻量化效果并不理想，且不能确保满足转向节结构的刚度要求。因此，本研究做法是采用有限元分析软件，在保持原模型静力学解求的基础上进行拓扑优化。在优化处理过程中，特定的表面需要被排除，以确保整体模型的完整性不受损。经过多次迭代计算和调整后，我们得到了优化后的图形密度分布，如图 7 所示。经过这种优化设计，结构刚度得到了保证，同时轻量化效果也得到了提升。



**Figure 7.** Topology optimization density map

**图 7.** 拓扑优化密度图

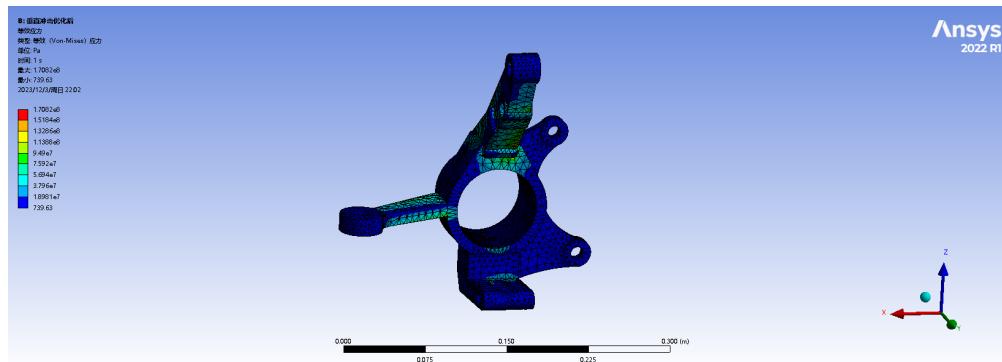
通过对上述拓扑优化密度的细致分析，我们在原先的模型基础上进行了一些调整。具体来说，我们选择剪切了模型的边际部分，而保留了主体部分。具体剪切的部位如图 8 所示。经过对边缘部分的剪切处理后，我们得到了一个经过优化后的模型。这个模型在降低重量的同时，保证了结构的完整性和稳固性。



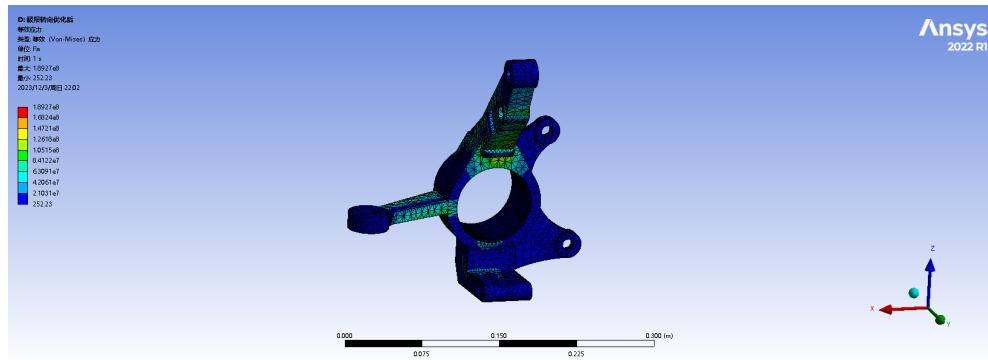
**Figure 8.** Comparison of model before and after cutting  
**图 8.** 模型剪切前后对比图

## 4.2. 拓扑优化方案检验与强度校核

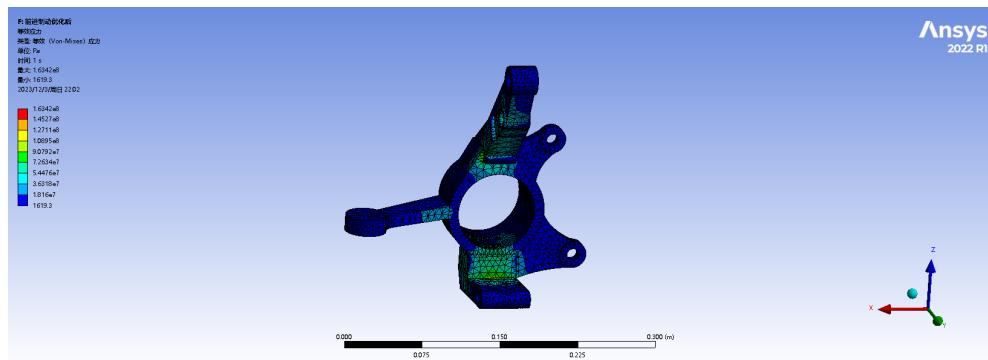
在进行了转向节原始方案的分析校核之后，我们根据拓扑优化的结果对其进行改进设计。优化结束后的转向节的质量降低到 1.048 kg，相比优化前的 1.2357 kg，其质量减轻了 15.19%，减重效果显著。在此基础上，我们针对优化后的转向节进行了强度校核。我们在优化前的三种工况基础上，保持边界条件不变，施加与原先相同的载荷，对改进后的转向节进行了强度分析。最终得到的等效应力云图如图 9~11 所展示的那样，我们可以把原始设计方案与优化设计方案的强度分析结果进行比较，具体结果如表 4 所示。



**Figure 9.** Optimized vertical impact steering knuckle equivalent stress cloud image  
**图 9.** 优化后垂直冲击转向节等效应力云图



**Figure 10.** Nebulae image of knuckle equivalent stress after optimized ultimate steering  
**图 10.** 优化后极限转向转向节等效应力云图



**Figure 11.** Optimized forward braking steering knuckle equivalent stress cloud image  
**图 11.** 优化后前进制动转向节等效应力云图

**Table 4.** Aluminum alloy material properties  
**表 4.** 铝合金材料属性

工况	原始方案/MPa	优化方案/MPa	变化率/%
垂直冲击	177.78	170.82	3.91
极限转向	203.75	189.27	7.10
前进制动	173.92	163.42	6.04

根据表 4 的数据, 我们可以看到, 在上述三种工况下, 优化方案下的转向节最大等效应力均小于所选用的铝合金材料的屈服极限。其中在极限转向工况下, 转向节最大等效应力降低到了 189.27 MPa, 这个值也小于材料的抗拉极限, 因此, 优化方案满足了强度要求。与原始方案相比, 优化后的最大等效应力有 3.91% 到 7.1% 的降低, 可见优化效果十分显著。

## 5. 总结

本文结合铝合金汽车转向节的轻量化开发研究项目, 对其展开了基于拓扑优化的结构轻量化设计方法研究。本研究采用了有限元分析的方法, 对麦弗逊悬架铝合金转向节进行了强度分析, 并使用拓扑优化的技术对其进行轻量化设计。

第一部分的研究结论表明, 转向节在三种工况下的应力分布均未超过材料屈服强度, 意味着在这些工况下, 转向节的强度是足够的。在得到这个结论的基础上, 进行了第二部分的研究, 即通过拓扑优化

设计提高转向节的强度和减轻其质量。通过拓扑优化对麦弗逊悬架汽车转向节结构进行改进。在保证汽车转向节整体结构的完整和稳定性的同时，相对于改进前整体结构质量减轻了 15.19%。同时在测试条件相同的环境下，优化后的汽车转向节再次进行强度分析。最终得到，相对于原转向节结构，在垂直冲击工况下，最大应力降低了 3.91%；在极限转向工况下，最大应力降低了 7.1%；在前进制动工况下，最大应力降低了 6.04%，且优化后均满足强度需求。

本研究的结果表明，采用这种结构优化的方法，可以显著提高转向节的性能，同时也达到了减轻其质量的目的。这种方法对于新能源汽车而言具有重要的实用价值，不仅可以有效降低汽车的有害排放并减少能源消耗，还可以解决汽车企业在产品设计和生产过程中遇到的实际问题。此外，本研究对于其他类型汽车底盘零件的轻量化设计也有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 刘畅, 郑施睿, 温艳, 等. 电动汽车转向节有限元分析及其形状优化[J]. 机械设计与制造, 2023(12): 106-111.
- [2] 罗杨, 杨家财, 罗丽. 铝合金汽车转向节重力铸造工艺优化[J]. 铸造工程, 2023, 47(5): 16-18.
- [3] Schimek, M., Springer, A., Kaierle, S., et al. (2012) Laser-Welded Dissimilar Steel-Aluminum Seams for Automotive Lightweight Construction. *Physics Procedia*, **39**, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.012>
- [4] Malte, S., Schmidt, C., Herrmann, C., et al. (2016) Multi-Level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components. *Procedia CIRP*, **41**, 1049-1054. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.063>
- [5] 罗继相, 杨鹏, 夏望红, 等. 铝合金转向节挤压铸造技术研究与应用[J]. 铸造工程, 2023, 47(3): 1-11.