

巴哈赛车转向系统的设计及优化

金 乐*, 梁远讯, 邝田锋, 邓远锋

南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月27日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

中国汽车工程学会巴哈大赛已经举办8届。本赛事以其专业性、竞技性、应用性及观赏性为全国各本科及职业院校所重视。为设计一辆合格的赛车, 其转向系统至关重要, 其稳定状态会影响赛车的操控性能。本文工作针对赛事规则, 设计一巴哈赛车的转向系统, 使用ANSYS对梯形机构进行力学分析。并对转向机构的几何参数进行优化。模拟结果显示, 本巴哈赛车材料及结构选择合理。可以应对崎岖路面、紧急制动及车辆滑移三种状态。通过对梯形结构的修改, 实际阿克曼曲线更加贴合理论曲线。

关键词

巴哈, 转向, 应力分析, 阿克曼条件

Design and Optimization of the Steering System for Baja Racing Vehicles

Le Jin*, Yuanxun Liang, Tianfeng Kuang, Yuanfeng Deng

College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

Received: September 22, 2025; accepted: October 27, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

The Baja SAE China Competition, organized by the Society of Automotive Engineers of China, has been held for eight editions. This event is highly valued by undergraduate and vocational colleges across the country for its professionalism, competitiveness, applicability, and entertainment value. To design a qualified race car, the steering system is crucial, as its stability directly affects the vehicle's handling performance. This paper, in accordance with the competition rules, designs a steering system for a Baja race car and conducts a mechanical analysis of the trapezoidal mechanism. The geometric parameters of the steering mechanism are also optimized. Simulation results indicate

*通讯作者。

that the material and structural choices for this Baja race car are rational, allowing it to handle rough terrain, emergency braking, and vehicle slipping. By modifying the trapezoidal structure, the actual Ackermann curve is brought closer to the theoretical curve.

Keywords

Baja, Steering, Stress Analysis, Ackermann Condition

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

中国汽车工程学会巴哈大赛(Baja SAE China, 简称 BSC)是一项面向本科院校和职业院校汽车及相关专业在校生的赛事,是关于越野汽车设计、制造和检测的比赛。参赛车队需按照赛事规则和赛车制造标准,在规定时间内使用统一型号发动机,设计制造一辆单座小型越野车。大赛分为静态和动态项目。其动态项目则涵盖爬坡测试、操控测试、单圈计时、专项赛事以及 4 小时耐力测试等。为了能在赛事上取得优异成绩,一台赛车的动力性、稳定性、耐久性、操控性必须得到保证。在其中,转向系统是维持汽车操纵稳定性重要部件,其意义如下:(1)它能够改变汽车的行驶方向,使驾驶员可以根据路况和行驶需求灵活操控车辆。(2)在行驶过程中,它会根据车速、路面状况等自动调整车轮角度,抵消外力影响,确保汽车始终保持稳定的行驶姿态,保障行车安全。维持汽车的行驶稳定性。

巴哈赛车的转向系统主要有:转向操纵机构、转向器、转向传动机构。三者构成一个空间中的几何梯形。(1)转向操纵机构,这部分主要包括方向盘、转向轴和转向管柱。方向盘是车手与转向系统直接交互的部件。(2)转向器,转向系统的核心部件,它将方向盘的转动转化为车轮的偏转。在巴哈赛车中,常见的转向器为齿轮齿条式转向器。也是本文本赛车设计采用的结构。(3)转向传动机构,转向传动机构主要包括转向拉杆、转向节臂、转向梯形臂等。转向拉杆将转向器的运动传递给车轮。通过调整部件的参数,可以实现赛车的最佳转向特性。

巴哈赛车转向系统的设计及优化,关系到赛场赛车表现及最终成绩,因此在国内有众多学者进行研究。整体研究方向,围绕转向系统的建模、选材及优化。吴伟锋等[1]研究了如何使用 UG 软件高效、准确地建立模型,提出了“Top-Down”设计方法。该方法自上而下,先进行总体设计,再细化到零部件,有效解决了模型修改不便、装配复杂及定位错误等问题。李永佶等[2]对转向梯形的优化过程进行了全面阐述,利用 MATLAB 软件优化 Ackermann 转向关系。崔盈利等[3]关注车辆轻量化,特别是转向节臂的分析与轻量化。他们使用 ANSYS 软件对转向节臂进行分析,模拟不平路面行驶、紧急制动和侧滑三种工况,对比材料极限应力范围,完成了转向节臂的强度与轻量化设计。刘克铭等[4]则专注于使用 ADAMS/CAR 等仿真软件对车辆进行转向性能的理论仿真。研究涵盖车辆力学性能、悬挂系统、轮胎特性及驾驶员与车辆环境的相互作用。本论文参考上述成果,结合南宁学院赛车特点,提出一套新的设计和优化方案。本论文结构如下。第一章节,引言。第二章节,提出我们的设计方案,给出转向系统设计参数。第三章节,转向系统建模。第四章节,描述 ANSYS 仿真的设置。第五章节,用 ANSYS 对核心结构部件进行受力分析。第六章节,对转向特性进行优化。第七章节,总结和展望。

2. 本车设计方案

巴哈赛车在赛道上行驶时时常会遇到颠簸、起伏和急转弯等各种情况。为了对应不确定性，赛车在设计时通常会选择断开式的转向梯形机构。断开式转向梯形结构有三个特点：(1) 两个梯形臂不是由一根整体轴制成，而是分别通过转向拉杆连接并固定在转向节上，同时允许左右两侧的梯形臂独立运动，互不干扰。(2) 更好的与前轮独立悬架的配合。这种配合能够确保一侧车轮在上下跳动时，另一侧车轮的转向不会受到影响。(3) 可以根据比赛的赛道情况，通过调整转向梯形参数(如转向断开点的位置、转向梯形臂的长度和夹角等)来使转向系统更加适配赛道，同时断开式转向梯形机构的设计能够更好地分散这些冲击力。

在考虑这些特点后，本工作转向系统前悬架参数如下表 1：

Table 1. Front suspension parameters for steering design
表 1. 转向设计前悬参数

名称	参数
两侧车轮主销与地面交点之间的距离	1177.9873 mm
轴距	1410 mm
主销偏置距	-22.9 mm
胎压	0.1 Mp (1 bar)
主销内倾角	10°
主销后倾角	6°
车轮外倾角	1°
轮辋直径	279.4 mm
最小转弯半径初定	3500 mm
离地间隙	330 mm
赛车质量(空载)	205 kg

关于本车的转向器选择，齿轮齿条式转向器因其简单稳定的机械结构、快速的机械反应、较少的占用空间、较低的维修成本、可稳定的传输力矩到车轮等各种优点。成为巴哈赛车转向器的不二之选。其中，我们通过合理的参数选择来确定设计参数。根据轴距、主销偏置距及最小转弯半径，定内轮最大转角 $\theta = 24^\circ$ 。

根据比赛赛道的要求，赛车面对弯道时，应有高速过弯的能力，给与车手的反应时间较短，角转动比因往较小的比例选择，在根据其他车队在角传动比的选择经验，。所以这次设计选择角传动比为 4.5:1。

经计算，转向器载荷及方向盘各种转矩数据汇总如下表 2：

Table 2. Summary of steering gear load and various steering torque data
表 2. 转向器载荷及方向盘各种转矩数据汇总

设计项目名称	设计项目参数
赛车满载时的原地力矩	31762.35 N·mm
转动方向盘手部需要的最大手力	52.28 N
方向盘最大转矩计算	8292 N·mm
转向器输出力的大小	273.57 N

关于转向机构中，最重要的齿轮齿条设计，本文选择本人选定齿轮参数为：齿轮齿数 $Z_1 = 20$ ；压力角 $\alpha = 20^\circ$ ；齿顶高系数 $h_a^* = 1$ ；顶隙系数 $C^* = 0.25$ ，最后得出，转向齿轮参数如下表 3：

对应转向齿条设计参数如下表 4：

Table 3. Summary of steering gear design parameters

表 3. 转向齿轮设计参数汇总

齿轮设计名称	齿轮设计参数
齿数	20
模数	2
压力角	20°
齿顶高系数	1
顶隙系数	0.25
齿顶高	2 mm
齿根高	2.5 mm
齿高	4.5 mm
齿宽	24 mm
轮轴最小轴径计算	$d \geq 2.99\text{mm}$

Table 4. Summary of steering rack design parameters

表 4. 转向齿条设计参数汇总

齿条设计名称	齿轮设计参数
齿条齿数	$Z_2 \geq 12$
齿条模数	2
齿条压力角	20°
齿条齿顶高	2.5 mm
齿条齿距	6.28 mm
齿条周节	3.14 mm
齿条的工作高度	4 mm
齿条全齿高	4.5 mm
齿条长度	75.36 mm
齿条齿宽	19 mm

3. 转向系统建模

本文章主要使用 UG 软件中的建模模块与装配模块。由于巴哈大赛并没有严格规定转向系统的各零件模型的形状，本文依据上述计算结果，建立转向系统模型。

齿轮轴模型图，如下图 1。

转向系统齿条建模图，如下图 2。

下图 3 为转向系统模型装配图。

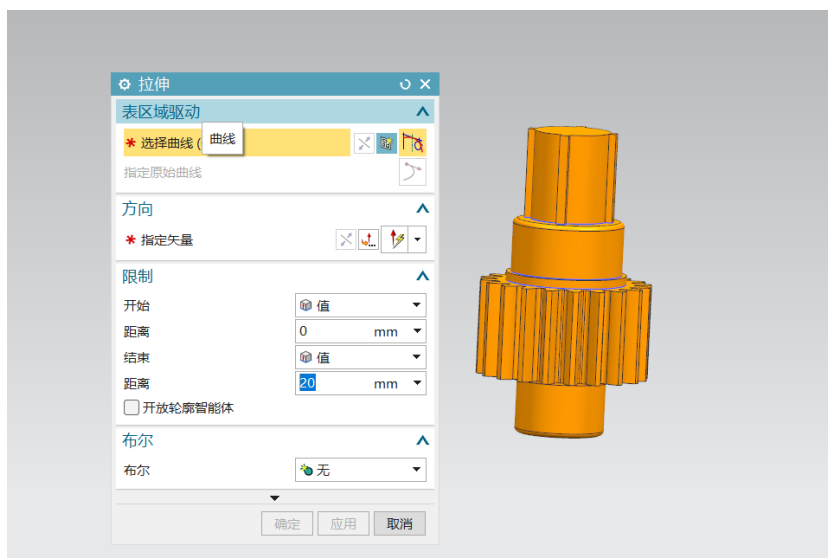


Figure 1. Completed model of steering system gear shaft

图 1. 转向系统齿轮轴模型完成图

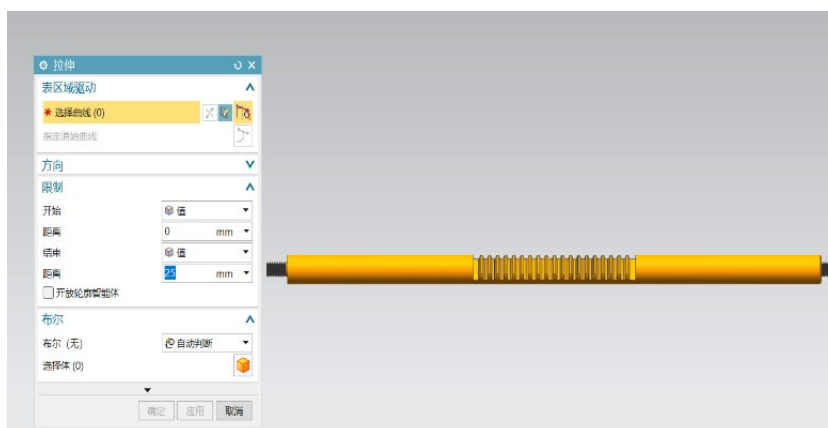


Figure 2. Completed modeling diagram of the steering system rack

图 2. 转向系统齿条建模完成图

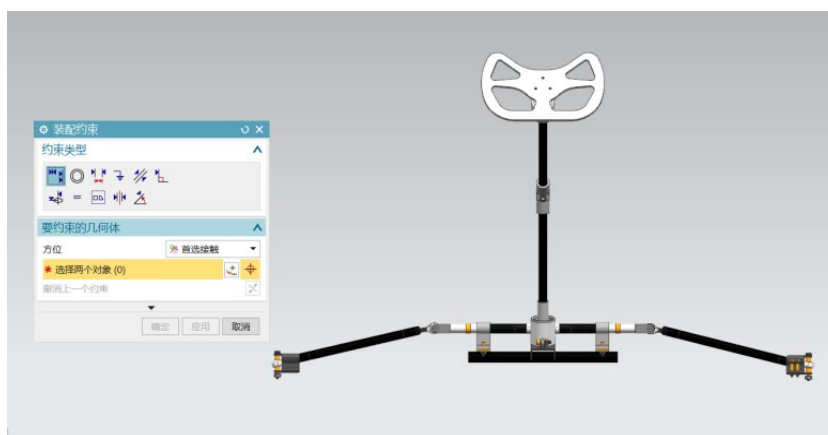


Figure 3. Completed assembly of steering system

图 3. 转向系统装配完成图

4. ANSYS 仿真设置

为确保仿真准确性,本文在 ANSYS Workbench 中对转向节臂、齿轮和齿条进行了静力学及瞬态力学分析,设置如下。

模型简化与假设:去除不影响力学性能的小特征(如倒角、螺纹孔)。材料视为各向同性弹性材料:转向节臂为 45 号钢(屈服强度 355 MPa),齿轮齿条为 20CrMnTi(屈服强度 835 MPa)。

网格划分:采用四面体网格。整体尺寸 1 mm,应力集中区域细化至 0.5 mm。点击自适应,创建网格。

边界与载荷:现实中转向节臂与立柱的连接是螺纹链接,在仿真时可以简化成刚性的连接。崎岖路面工况施加垂直载荷 521.55 N;紧急制动工况增加纵向力 416.97 N;车辆滑移工况增加侧向力 10271.3 N。齿轮齿条:齿条两端仅保留轴向平移自由度。在齿轮轴施加 7048.2 N·mm 转矩,齿面摩擦接触(系数 0.15)。

求解设置:静力学分析用于节臂;瞬态动力学用于齿轮啮合(时间步长 0.001 s)。采用直接求解器,力收敛容差 0.5%。

5. 对转向模型的应力分析

完成建模工作后,要对核心部件进行受力分析。对应巴哈赛事的越野场景,我们分析了三种工况(1)崎岖路面;(2)紧急制动;(3)车辆滑移。在崎岖路面上行驶是巴哈赛车较为常见的工况,其主要的的作用力就是轮胎传递给转向节臂连接处的垂直载荷,转向的垂直载荷为 $G_l = 305\text{kg} \times 9.8\text{N/kg} \times 45\% = 521.55\text{N}$ 。对转向节臂应力分析如下图 4:

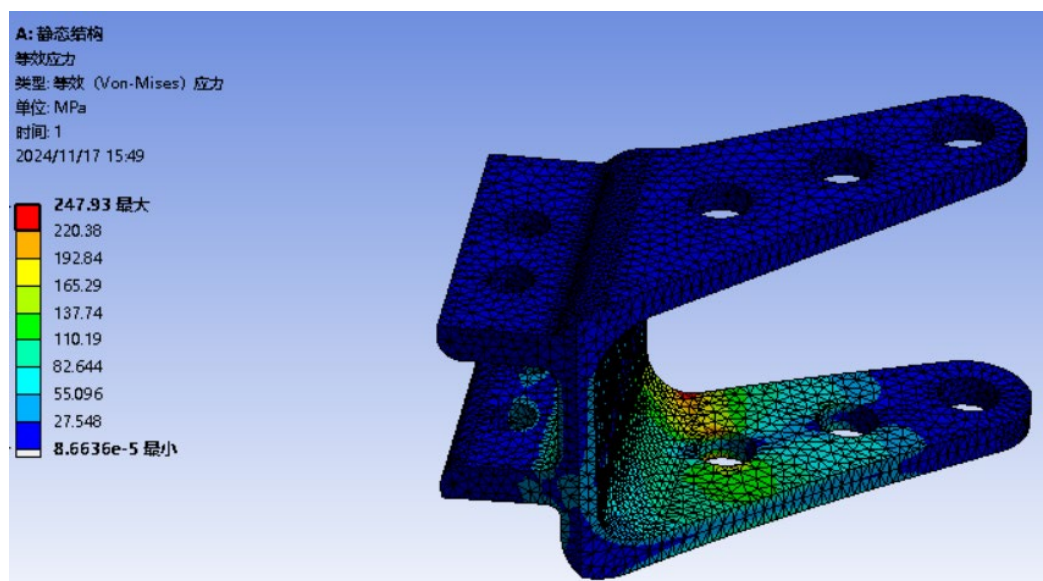


Figure 4. Stress analysis of the steering knuckle arm on rough road conditions

图 4. 转向节臂在崎岖路面工况下的应力分析图

巴哈赛车在比赛中时常会出现超车、让道等情况,那么紧急制动工的工况在比赛中也较为常见。在紧急制动中节臂不仅会受到轮胎垂直载荷的影响,还会受到轮胎纵向反作用力的影响(图 5)。则本人对纵向反作用力进行一个大约的估算有公式: $F_b = G_l \times \varphi = 521.22 \times 0.8 = 416.97\text{N}$, 式中: φ 为附着系数取 0.8。

巴哈赛车的赛道时常存在沙土、积水等各种障碍,加之比赛激烈车手长时间高度紧张,导致操控能力下降。种种情况,就会导致车辆滑移工况的发生,在滑移工况下转向节臂主要受到车轮传递的垂直载荷与滑移的侧向反作用力(图 6)。滑移的侧向反作用力进行一个大约的估算: $F_y = f \times G_l \times \tan \alpha \times 139.7$,

式中： f 为轮胎与地面之间的摩擦系数，取 0.8； α 为车轮的侧偏角取 10° ；139.7 为轮辋半径。计算结果为 10,271.3N。

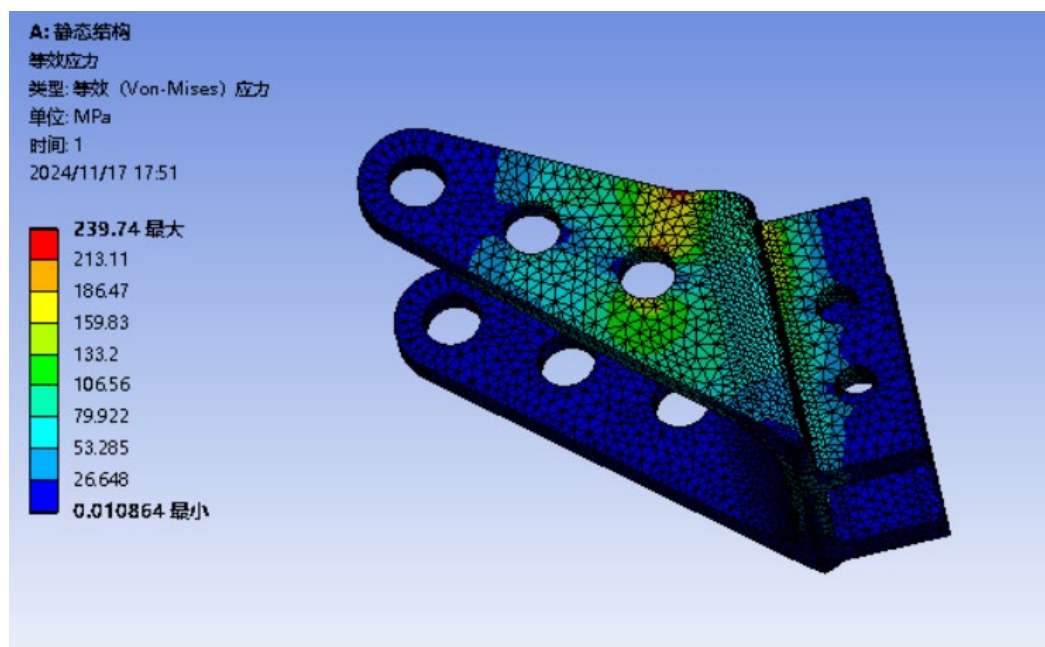


Figure 5. Stress analysis of the steering knuckle arm on emergency braking conditions

图 5. 转向节臂在紧急制动工况下的应力分析图

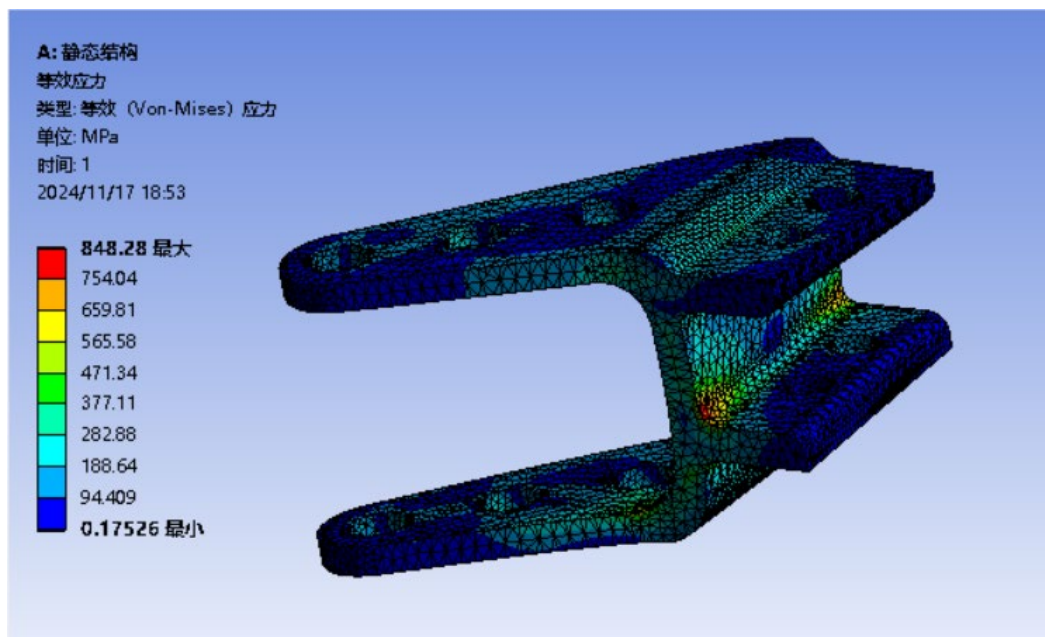


Figure 6. Stress analysis of the steering knuckle arm on vehicle skid conditions

图 6. 转向节臂在车辆滑移工况下的应力分析图

在巴哈赛车的运动中，转向涉及到齿轮、齿条的啮合过程。而啮合过程中主要受到的作用力就是车手输出到齿轮上的扭矩力。则可以根据公式来对齿轮上的作用力进行一个大约的估算，有公式：

$F = M_n \times \eta = 8202 \times 85\% = 7048.2 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。式中： M_n 为转动方向盘的最大转矩； η 为传递效率取 85%，带入 ANSYS workbench 中瞬态力学模块来对齿轮、齿条进行应力分析。所得结果如下图 7：

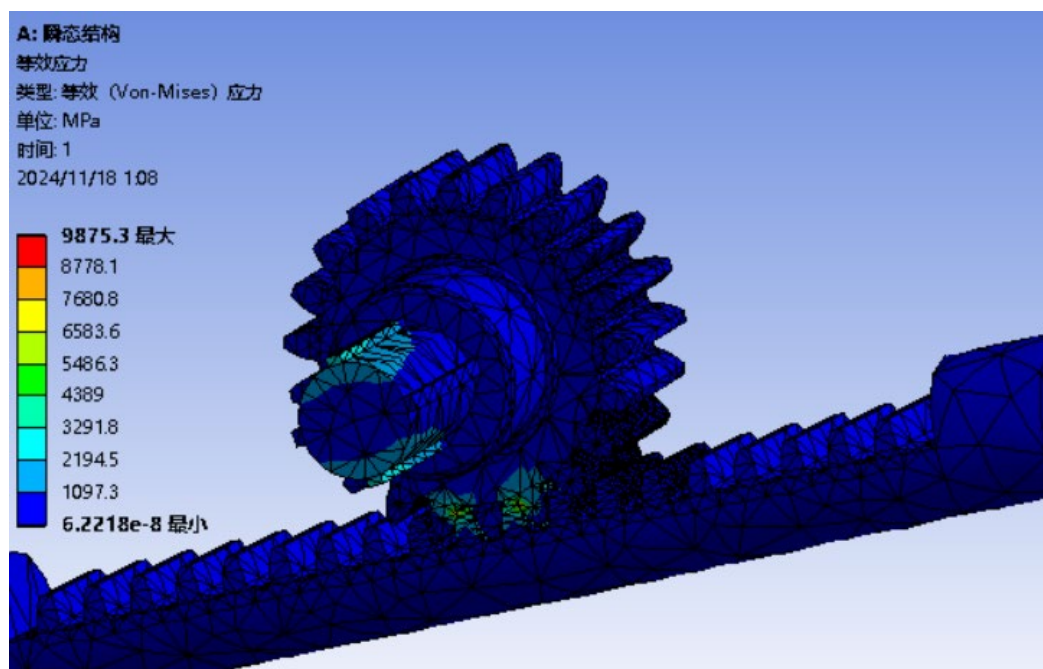


Figure 7. Stress analysis of steering pinion and rack during meshing process

图 7. 转向齿轮、齿条在啮合过程中的应力分析

在进行应力分析后，如下表 5，我们对分析结果进行总结：

Table 5. Summary of stress analysis data for three working conditions of the knuckle arm and gear-rack meshing

表 5. 节臂的三种工况与齿轮、齿条齿合的应力分析数据总结

各工况名称	各工况下的应力值	是否符合材料屈服极限
崎岖路面	25.285 Mpa	≤355 Mpa 符合
紧急制动	29.805 Mpa	≤355 Mpa 符合
车辆滑移	130.62 Mpa	≤355 Mpa 符合
齿轮、齿条的齿合	168.2 Mpa	≤835 Mpa 符合

据表格 5 结果可知，在三种工况中对转向节臂产生的最大应力为 130.62 Mpa。转向节臂所用材料为 45 号钢，屈服极限为 355 Mpa。则由此可以说明节臂的设计合理，且满足强度需求。

根据表格 5 可以看出，齿轮、齿条的齿合过程的应力为 168.2 Mpa。而齿轮、齿条所采用的材料为 20CrMnTi，屈服极限为 835 Mpa。由此可以判断此次齿轮、齿条的设计合理，且强度满足赛道需求。同时，从仿真中发现节臂的应力的集中区主要集中在与转向拉杆的连接处。齿轮、齿条的应力的集中区出现在啮合处与齿轮轴处。其应力的集中区出现的地方，符合结构受力逻辑。

6. 转向梯形的优化

汽车在转弯时，各个车轮应围绕一个共同的瞬时中心进行纯滚动，以保证轮胎与地面之间没有滑移

现象，这个理论称为阿克曼条件。转向机构是一个梯形四杆机构，来保证满足阿克曼条件。但是在实际驾驶中，收到多种外部因素，如轮胎侧偏角，悬架变型等因素的影响。阿克曼条件很难得到满足，我们以南宁学院巴哈赛车为参考，用软件进行优化。结合比赛经验，我们将阿克曼率选为 35%。将优化参数设置为转向节臂长度 l_1 、梯形高度 h 、梯形底角 γ ，我们对参数进行反复调整，得出优化参数表 6：

Table 6. Optimization parameters of the trapezoidal mechanism
表 6. 梯形优化参数

优化参数	参数数值
节臂长度 l_1	90 mm
梯形高度 h	135 mm
梯形底角 γ	115 mm
阿克曼率 R_A	35%

优化前后的阿克曼曲线如下图：

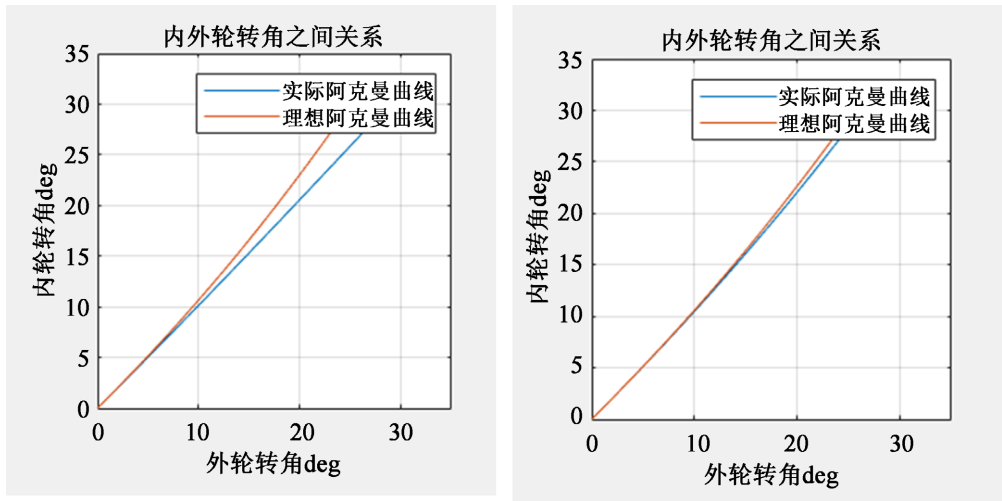


Figure 8. Comparison of Ackermann curves before and after optimization
图 8. 优化前、后阿克曼曲线对比图

如图 8，在未优化之前，外轮转角达到 20° 以上时，内轮转角并没有达到预期的角度，说明侧偏角、侧向加速度等因素对转向的影响还是较大。而优化过后，可以明显看出，当外轮转角达到 20° 以上时，内轮转角达到了预期的角度，完成了对应优化。

7. 总结及展望

本文主要讲述了巴哈的转向系统的设计及优化过程。首先本文的首要任务是从理论层面计算了转向系统设计需要的对应参数(如节臂长度、齿条单侧行程等)，而后，借助 UG 软件平台，根据计算的设计参数构建了转向系统的三维模型，并完成转向模型的装配。在装配过程中，检查了零件间的干涉情况，并对模型进行了修正，确保了模型装配的精确性。

进入优化环节后，作者对转向节臂进行了静力学分析，模拟了车辆在崎岖路面行驶、紧急制动以及滑移三种复杂工况下的受力状态，通过对比材料的屈服极限，对模型进行了有效的验证。同时，还借助

ANSYS 的瞬态力学模块,对齿轮和齿条的啮合过程进行了细致的模拟分析,观察了应力变化,更好地验证了齿轮、齿条的设计的合理性。最后,依据阿克曼条件,对梯形结构进行优化。而后,我们将依据理论结果,加工实车,并继续深化我们的工作。

基金项目

南宁学院 2022 年实践教学示范课程项目《汽车检测诊断技术》(项目编号:2022XJYYS11)。

参考文献

- [1] 吴伟锋,刘庚寅,金超磊,蔡永超. UG 项目设计方法及其在汽车转向系统三维模型设计中的应用[J]. 汽车零部件, 2021(7): 107-111.
- [2] 李永佶,崔康东,田顺,杨炜. 巴哈赛车转向梯形联合优化设计[J]. 公路与汽运, 2022(0): 1-5+16.
- [3] 崔盈利,贾军涛,霍志毅,韩光利. 基于 ANSYS workbench 的巴哈赛车转向节静力学分析[J]. 汽车实用技术, 2019(7): 46-47.
- [4] 刘克铭,吴雪莹,王宝来,孙志扬,姜长鹏. 基于 ADAMS/CAR 的某 SUV 汽车操纵稳定性仿真实验分析及优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 333-341.