

基于 ANSA 的汽车轮毂模态分析

王文涛, 吴芷红*

山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357

摘要:针对家用轿车铝合金轮毂的可靠性需求,采用 CATIA 软件建立轮毂三维模型,采用 ANSA 软件对轮毂进行网格划分和模态计算,采用后处理软件 META 计算轮毂的固有频率和模态,并通过模态分离度(modal separation margin, MSM)定量评估轮毂设计的可靠性。计算结果表明:设计的轮毂在复杂工况下具有较高的可靠性,轮毂固有频率为 383.3 Hz,显著高于平坦路面激励频率、凹凸不平路面激励频率、发动机最高振动频率;轮毂的 MSM 为 56.5%,远大于最低安全阈值,有效规避了与相邻部件的共振风险。

关键词:汽车轮毂;有限元分析;模态;固有频率;MSM

中图分类号:U463.343

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0078-05

引用格式:王文涛,吴芷红.基于 ANSA 的汽车轮毂模态分析[J].内燃机与动力装置,2025,42(3):78-82.

WANG Wentao, WU Zhihong. Modal analysis of automobile wheel hub based on ANSA [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(3):78-82.

0 引言

随着汽车工业技术的持续迭代和物流行业的蓬勃发展,我国机动车保有量呈现持续攀升态势。截至 2024 年上半年,全国机动车保有量已突破 4.40 亿辆,其中汽车保有量约为 3.45 亿辆^[1]。汽车保有量的快速增长在提高社会运行效率的同时,也带来了显著的环境压力:交通运输领域碳排放量已占全国碳排放总量的 10.4%,能源消耗占全社会总能耗的 9.2%,成为仅次于工业的第二大碳排放源。在此背景下,兼具低能耗、低排放与高性能特征的汽车产品成为汽车行业转型的核心方向,汽车轻量化技术是实现该目标的关键技术之一。整车质量每减轻 10%,燃油车的燃油效率可提高 6%~8%,排放减少 3%~5%,新能源车的续航里程将提高 5%~6%^[2]。轮毂作为汽车行驶系统的核心承载部件,是车辆与地面交互的“机械关节”,不仅承担着整车的垂直载荷,更在动力传递、转向操控和制动性能中发挥关键作用^[3]。

现代轮毂系统深度融合了先进材料技术、创新结构设计与前沿制造工艺,成为体现车辆性能与美学价值的核心载体。在材料迭代进程中,轮毂技术经历了从传统铸铁到轻质铝合金,再向镁合金及碳纤维复合材料的跃迁。铝合金轮毂凭借其优异的轻量化特性^[4]、良好的散热性能、时尚美观的外观设计和较低的成本,成为当前家用汽车的主流配置。铝合金轮毂的密度仅为铸铁的 1/3,在保证强度的同时显著降低了簧下质量,不仅提高了车辆的操控性能,还降低了能耗;铝合金的导热系数为 160 W/(m·K),可提高车辆制动系统散热效率,缓解制动系统的热衰退现象。

在轮毂设计与优化过程中,模态分析方法^[5]发挥着至关重要的作用。模态分析广泛应用于机械、航空航天、土木建筑、船舶、汽车等领域,是结构动力学分析的重要分析方法。工程师建立轮毂的高精度有

收稿日期:2025-03-08

基金项目:教育部 2020 年产学研合作协同育人项目(202002147007)

第一作者简介:王文涛(1999—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为车辆有限元分析,E-mail:2251454174@qq.com。

*通信作者简介:吴芷红(1973—),男,山东菏泽人,副教授,主要研究方向为车辆轻量化设计和 CAE 分析,E-mail:wuzh@sdjtu.edu.cn。

有限元分析(finite element analysis, FEA)^[6-7]模型,进行模态仿真计算,通过求解特征值与特征向量方程,确定其固有频率、模态振型和阻尼比,进而准确预测轮毂在不同频率下的振动特性,有效规避常见的路面激励(频率通常为 10~30 Hz)可引发的共振风险,确保轮毂结构的动态稳定性。本文中采用 CATIA 建立轮毂模型,采用模态分析方法对轮毂进行动态特性评估,分析其固有频率、振型及模态,并结合模态分离度(modal separation margin, MSM)评估轮毂设计合理性,确保轮毂在复杂工况下的结构可靠性。

1 有限元模型的建立

1.1 基于 CATIA 的轮毂建模

CATIA 是一款集成化软件,整合了三维建模、工程分析、计算机辅助制造等功能,覆盖了从概念设计到工程制造的完整流程,为轮毂的研发提供了高效、可靠的技术支持。在轮毂设计过程中,利用 CATIA 软件能够精确表达轮毂的几何特征,生成高质量的网格,调用 CATIA 内置求解器进行模态计算,提取前 10~20 阶固有频率及振型,结合路面激励频谱评估轮毂在特定频段的动态响应,并基于模态分析结果进行结构优化,可显著提高轮毂的设计质量和开发效率,满足现代汽车工业对轻量化、高性能轮毂的需求^[8]。本文中基于 CATIA 建立轮毂三维模型,如图 1 所示。



图 1 轮毂三维图

对轮毂模型进行合理简化可以有效平衡计算精度与效率。利用 CATIA 将模型中不影响计算结果的倒角和圆角进行简化,将简化模型导入 ANSA^[9],利用其智能几何修复算法确保模型拓扑的完整性。

材料参数设置影响有限元分析的准确性。材料弹性模量、泊松比直接决定应力-应变响应,密度直接影响动力学分析可靠性。本文中铝合金轮毂材料参数如表 1 所示。

表 1 铝合金轮毂材料参数

弹性模量/GPa	泊松比/%	密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
72	0.33	2.7

1.2 网格划分

有限元分析需将轮毂的连续几何模型离散化为有限元网格,网格质量对仿真结果的可靠性和计算精度具有决定性影响。在工程实践中,高质量的网格划分应满足两个条件:1)与计算目标的适应性匹配(如在应力集中区域实施局部网格加密,在模态分析中保持整体网格均匀性);2)符合严格的网格质量标准(包括单元长宽比、雅可比矩阵行列式、翘曲角等几何参数的控制)。本文中轮毂网格类型为四面体,边长为 10 mm。单元网格质量参数如图 2 所示,轮毂网格模型如图 3 所示。划分网格后,有限元模型包含 58 255 个四面体单元、16 747 个节点。

Criteria	Calculation	Color	Failed
☒ aspect ratio	NASTRAN	Yellow	3.
☒ skewness	PATRAN	Green	40.
☒ warping	IDEAS	Blue	16.
☐ taper	PATRAN	Blue	0.35
☐ crash time step	LS-DYNA	Purple	1.E-6
☒ min height	QUADS & TR	Green	6.
☐ squish		Green	0.3
☒ jacobian	ANSA	Blue	0.6
☒ min length		Red	6.
☒ max length		Red	40.
☒ min angle quads	IDEAS	Red	45.
☒ max angle quads	IDEAS	Red	135.
☒ min angle trias	IDEAS	Red	20.
☒ max angle trias	IDEAS	Red	120.

图 2 网格质量参数

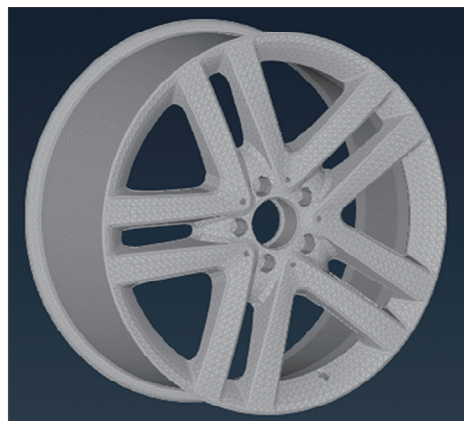


图 3 轮毂网格模型

2 轮毂模态分析

2.1 模态分析理论

轮毂是连接轮胎与车轴的关键承载部件,车辆行驶过程中轮毂通过传动轴传递驱动力,与制动盘协同工作产生制动力,同时将路面激励(如不平度激励、冲击载荷)经轮胎传递至悬架系统。这种复杂的力学环境使轮毂始终处于多频段振动载荷作用下,若其固有频率与外界激励频率耦合,引发共振现象,易导致结构疲劳损伤甚至失效。因此,为确保轮毂在使用过程中的可靠性,必须使其固有频率与主要外部激励频率(包括发动机怠速工况下的振动频率、典型路面激励频率等)保持不低于 15% 的安全裕度。

轮毂动态特性的研究需要建立精确的动力学模型,其通用微分方程可表示为多自由度系统形式^[10]:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t), \quad (1)$$

式中: M 为系统的质量矩阵, C 为系统的阻尼矩阵, K 为系统的刚度矩阵, X 为节点的位移向量, F 为系统外部激励向量, t 为时间。

金属轮毂是低阻尼系统,忽略能量耗散,令 $C=0$;在模态分析中,研究自由模态特性(固有频率和振型)时应令 $F(t)=0$,式(1)简化为:

$$M\ddot{X} + KX = 0. \quad (2)$$

式(2)对应的特征方程为:

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0, \quad (3)$$

式中: ω 为固有频率, φ 为振动初相位。求解式(3)可得轮毂自由模态的固有频率与振型。

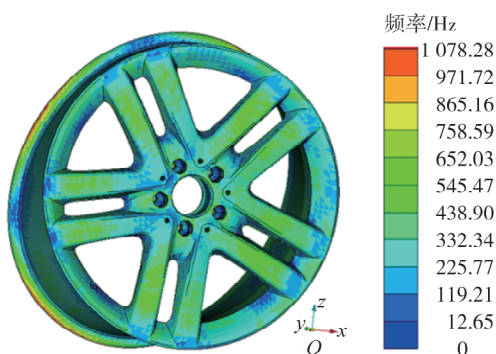
2.2 模态计算与分析

利用 ANSA 完成轮毂几何清理、网格划分及边界条件设置后,通过高效的求解器接口生成 OP2 结果文件,基于 META 后处理平台对计算结果进行深入解析。META 具有模态振型动画演示、生成 Campbell 图等高级可视化功能,可与 ANSA 无缝集成实现数据的高效传递,META 内置的优化器接口支持将模态分析结果直接反馈至设计变量(如轮辐厚度、肋板布局),为轮毂的动态性能优化提供完整解决方案。

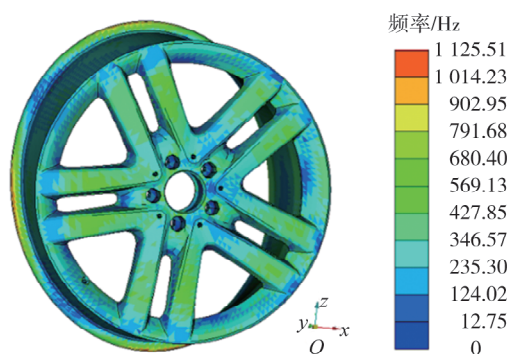
经 META 计算分析,轮毂的前 6 阶为刚体模态,频率趋近于 0,可以忽略,自由模态(第 7 阶至第 10 阶)频率如表 2 所示,模态振型图如图 4 所示,其中,第 7 阶模态频率为 383.3 Hz,为轮辋的呼吸模态,即轮辋截面沿径向周期性膨胀和收缩,该模态在车轮动态特性分析中至关重要,尤其是在高速旋转或受到冲击载荷时,可能影响轮辋的疲劳寿命,以及噪声、振动与声振粗糙度(noise vibration harshness, NVH)性能。

表 2 自由模态固有频率

模态	第 7 阶	第 8 阶	第 9 阶	第 10 阶
频率/Hz	383.3	385.6	767.8	771.1



a) 第 7 阶振型



b) 第 8 阶振型

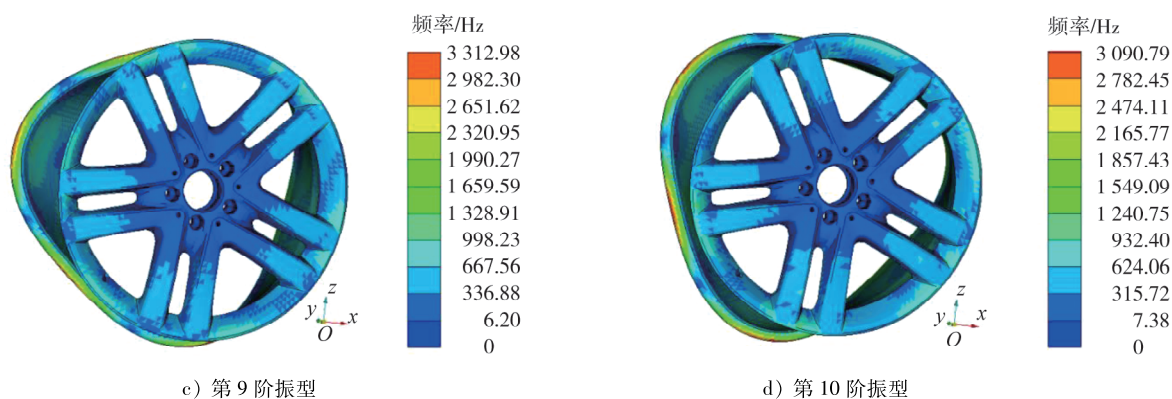


图4 自由模态振型图

轮毂的振动特性呈现明显的规律性分布。由表2和图4可知:轮毂的模态频率呈现典型的成对分布规律,即相邻两阶模态具有相近的频率和相似的振型特征。具体而言,第7、8阶模态频率的差仅为2.3 Hz,相对偏差为0.6%,两者的振型均表现为轮辋的径向对称变形,这种特性与轮毂的五辐对称结构密切相关;第9、10阶模态频率的差仅为3.3 Hz,相对偏差为0.4%,振型表现为轮辐的反对称弯曲变形。

根据工程实践数据和道路测试统计,路面激励频率范围主要取决于路面等级和车辆行驶速度。对于符合文献[11]标准的道路谱,其激励频率分布具有以下特征:平坦路面激励主要来源于路面微小起伏、接缝等,频率为0.5~3.0 Hz;不平路面激励主要来源于坑洼、减速带等,频率为3.0~11.0 Hz。

以 Hz 为单位的发动机振动频率 f_0 的数值^[12]

$$\{f_0\} = \frac{\{n\}}{60} \cdot \frac{z}{k}, \quad (4)$$

式中: $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的发动机转速 n 的数值; z 为气缸数; k 为曲轴转数与工作循环的比,对于四冲程发动机, $k = 2$ 。

以典型家用4缸汽车为例,发动机的怠速转速、巡航转速、高速转速通常为750、2500、5000 r/min,根据式(4),3种转速对应的发动机振动频率分别为25.0、83.3、166.7 Hz。由以上分析可知:轮毂第7阶模态固有频率(383.3 Hz)显著高于平坦路面激励频率、凹凸不平路面激励频率、发动机最高振动频率,设计的轮毂与外部激励发生共振的可能性很小。

轮毂设计时,应重点考虑频率低于200 Hz的模态避让问题,同时确保结构刚度足以抵抗高频冲击载荷。通常采用模态分离度评估轮毂设计合理性。模态分离度

$$M_{SM} = \frac{|f_n - f_e|}{f_n} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: f_n 为结构固有频率, f_e 为激励频率。一般要求 $M_{SM} \geq 15\%$,以确保足够的频率分离,避免模态耦合。

根据式(5),在发动机最高振动频率下, $M_{SM} = 56.5\%$,远大于工程实践中要求的最低安全阈值,避免了与相邻部件(如悬架系统、传动轴)发生频率耦合,设计的轮毂在动态性能方面具有较高的可靠性。

3 结论

为评估轮毂结构的动态特性,采用CATIA建立轮毂模型,采用有限元分析法对轮毂进行动态特性评估,计算分析轮毂的固有频率、振型及模态。

1) 轮毂的固有频率为383.3 Hz,显著高于平坦路面激励频率、凹凸不平路面激励频率、发动机最高振动频率。

2) 轮毂的模态分离度为56.5%,远大于最低安全阈值,避免了与相邻部件发生频率耦合,显著降低了共振风险,设计的轮毂结构在复杂工况下具有高可靠性。模态分离度的科学应用可提高结构动态特性优

化效率,并可平衡结构轻量化与可靠性需求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国公安部交通管理局. 2024 年上半年全国机动车达 4.4 亿辆 驾驶人达 5.32 亿人 新能源汽车保有量达 2472 万辆[EB/OL]. (2024-07-09) [2024-11-16]. <https://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c9650715/content.html>.
- [2] 王涛.“轻量化”创新,让汽车“轻装上阵”[N]. 青岛日报,2025-05-13(2).
- [3] 肖占龙,孙跃东. 基于 ANSYS 的汽车轮毂的轻量化研究[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(2):143-148.
- [4] 陆洋,王虎奇,尹玉鹏. 汽车轮毂的有限元分析及优化[J]. 现代机械,2016(6):4-8.
- [5] 吴晓东. 基于 ANSYS 的轮毂模态分析[J]. 内燃机与配件,2019(16):42-43.
- [6] 高耀东,任元. 基于 ANSYS 的车辆结构有限元分析[M]. 北京:化学工业出版社,2021.
- [7] 尹宗军,苏蓉,洪雨,等. 基于 ANSYS 的某铝合金轮毂模态与疲劳分析[J]. 韶关学院学报,2023,44(9):63-69.
- [8] 徐思豪,杜文磊,彭亚康,等. 基于 CATIA V6 的船舶结构有限元网格方法[J]. 船舶工程,2019,41(8):26-30.
- [9] 童寒川,夏伟. 铝合金轮毂弯曲性能有限元分析[J]. 汽车实用技术,2019,44(23):132-134.
- [10] 刘德平,王国锋,唐辉,等. 基于 ANSA 的有限元建模技术[C]//中国力学学会产学研工作委员会,陕西省国防科技工业信息化协会,中国数字仿真联盟,等. 第十五届中国 CAE 工程分析技术年会论文集. 临海:浙江吉利汽车研究院有限公司,2019:4.
- [11] International Organization for Standardization. Mechanical vibration: road surface profiles: reporting of measured data: ISO 8608:2016[S]. Geneva,Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
- [12] 靖娟,王友华. 汽车轮毂模态及刚度性能有限元分析[J]. 汽车实用技术,2023,48(19):112-115.

Modal analysis of automobile wheel hub based on ANSA

WANG Wentao, WU Zhihong^{*}

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: In response to the reliability requirements of aluminum alloy wheels for a certain family car, a three-dimensional model of the wheel hub is established using CATIA software. The wheel hub is meshed and simulated using ANSA software, and the natural frequencies and modes of the wheel hub are calculated using post-processing software META. The reliability of the wheel hub design is quantitatively evaluated through the modal separation margin(MSM) index. The calculation results show that the natural frequency of the wheel hub is 383.3 Hz, significantly higher than the excitation frequency of flat road surfaces, uneven road surfaces, and the highest vibration frequency of the engine. The MSM of the wheel hub is 56.5%, far exceeding the minimum safety threshold, effectively avoiding the risk of resonance with adjacent components. The designed wheel hub has high reliability under complex working conditions.

Keywords: automobile wheel hub; finite element analysis; mode; natural frequency; MSM

(责任编辑:臧发业)