

基于ANSYS Workbench的盘式制动器主要零件的有限元分析

贾晨辉

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月18日; 录用日期: 2024年11月11日; 发布日期: 2024年11月18日

摘要

本文利用ANSYS Workbench对一种盘式制动器进行有限元分析。研究内容包括初始参数和有限元模型建立、静力学分析和模态分析。通过对制动盘的几何特征、材料属性以及施加载荷的详细描述, 建立了制动器的有限元模型。静力学分析揭示了制动盘在工作状态下的应力和变形分布, 模态分析则提供了制动盘的自然频率和振型信息。结果表明, 该制动器设计满足静力学性能要求, 并具有良好的动态特性。本文的研究结果为盘式制动器的设计优化和性能提升提供了科学依据。

关键词

盘式制动器, ANSYS, 静力分析, 模态分析

Finite Element Analysis of Major Components of Disc Brake Based on ANSYS Workbench

Chenhui Jia

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

Received: Oct. 18th, 2024; accepted: Nov. 11th, 2024; published: Nov. 18th, 2024

Abstract

In this paper, finite element analysis of a disc brake is carried out using ANSYS Workbench. The study includes initial parameters and finite element modeling, static analysis and modal analysis. The finite element model of the brake is established through the detailed description of the

geometrical features, material properties and applied loads of the brake disc. The static analysis reveals the stress and deformation distribution of the brake disc under the operating condition, while the modal analysis provides information on the natural frequency and vibration pattern of the brake disc. The results show that the brake design meets the static performance requirements and has good dynamic characteristics. The results of this paper provide a scientific basis for the design optimization and performance improvement of the disc brake.

Keywords

Disk Brake, ANSYS, Static Analysis, Modal Analysis

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

盘式制动器是现代汽车制动系统的关键组件，其性能直接影响制动效果和行车安全，制动系统的可靠性和稳定性显得尤为重要[1]。为了确保盘式制动器在实际工况中的长期稳定运行，进行精确的性能分析和优化是必不可少的。有限元分析(FEA)是一种广泛应用于工程领域的数值模拟工具，能够计算机械结构的力学行为，预测其在不同载荷下的性能[2]。研究显示，利用 ANSYS 等软件进行静力学和模态分析，能够有效预测制动盘在不同工况下的应力和变形特性[3]。此外，许多学者通过优化设计和材料选择，提升了制动器的动态特性和耐久性，确保其在高负载环境下的可靠性[4]。本研究将基于 ANSYS Workbench，对制动盘的力学性能进行深入分析，为进一步优化设计提供依据。

2. 初始参数和有限元模型建立

2.1. 制动器的几何形状与材料特性

盘式制动器是汽车和机械设备中的关键部件，其性能直接影响制动效果和行车安全。优良的制动性能不仅能缩短制动距离，还能提升车辆在复杂工况下的稳定性。本研究以一种典型的盘式制动器为研究对象，深入分析其工作原理与结构特性。

盘式制动器的主要组成部分包括制动盘、制动钳和制动片，各部分相互配合，共同承担制动任务。其中，制动盘作为承受摩擦力的主要部件，其强度、刚度以及耐久性在整个制动过程中起着核心作用。因此，本文将重点关注制动盘的有限元分析，借助先进的数值仿真技术来评估其在不同工况下的力学性能和安全性，以为制动器的优化设计提供理论依据和参考。

制动盘的几何参数如下表 1、表 2：

Table 1. Brake disc geometry

表 1. 制动盘几何参数

零件	直径	厚度	孔径
制动盘	240 mm	26 mm	80 mm

制动盘的材料为铸铁，其主要力学性能参数为：

Table 2. Brake disc performance parameters
表 2. 制动盘性能参数

零件名称	材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
制动盘	铸铁	180	0.28	7200

2.2. 有限元模型建立

在进行有限元分析前,需要通过 SolidWorks 创建制动盘的三维模型,然后将模型导入 ANSYS Workbench 进行网格划分。本文选择了 6 mm 的四面体网格,在确保仿真结果准确的同时,保持较高的计算效率。如图 1 所示。

随后,将铸铁的材料属性分配给制动盘模型。这些属性包括弹性模量、泊松比和密度等材料参数,以确保仿真过程中的物理特性与实际情况相符。此步骤为后续的静态载荷和振动分析提供了必要的基础。

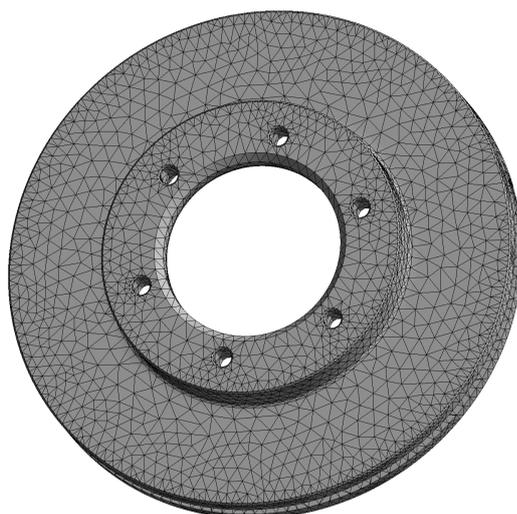


Figure 1. Brake disk meshing
图 1. 制动盘网格划分

3. 制动盘的静力学分析

3.1. 静力学方程

结构静力学分析主要用于研究结构在静态载荷下的响应,通常包括位移、约束反力、应力和应变等参数。分析中忽略了阻尼和惯性的影响,假设结构的载荷和响应基本不随时间变化。在 ANSYS Workbench 中,可以使用 Mechanical 模块设置静力分析选项,并通过 ANSYS 求解器进行计算。一般的,静力学方程如下:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

其中, $[K]$ 是刚度矩阵, $\{u\}$ 是位移矢量, $\{F\}$ 是静载荷。在静力学分析中,通常不考虑动载荷、阻尼和惯性效应。假设材料为弹性材料且结构总体变形很小,此时刚度矩阵 $[K]$ 可以视为常量[5]。

3.2. 制动盘的结构静力学分析

在 ANSYS Workbench 中进行静力学分析的过程中,第一步是精确定义边界条件和施加载荷,这是确

保分析结果符合实际工况的关键环节。首先，在制动盘的外端面上施加压力，具体为沿 Y 轴方向分别施加 25 MPa 和 -25 MPa 的对称压力负荷。该压力模拟了制动片在制动过程中施加在制动盘上的作用力，从而能够有效评估制动盘在受力状态下的应力分布与变形情况。与此同时，为了真实模拟制动盘与轮毂的连接状态，针对制动盘的轮毂面施加固定支撑条件。这个固定支撑的设定用于限制制动盘在 X、Y、Z 三个方向上的自由移动，确保轮毂面在施加载荷时不会发生位移或旋转。这种边界条件的定义使得模拟更加接近于实际车辆运行中的受力情况，有助于精确分析制动盘在静态载荷下的力学行为及其安全性能。通过这种边界条件与施加载荷的合理设定，能够更好地评估制动盘在工作过程中的应力集中点和潜在的薄弱环节。仿真结果如下图所示：

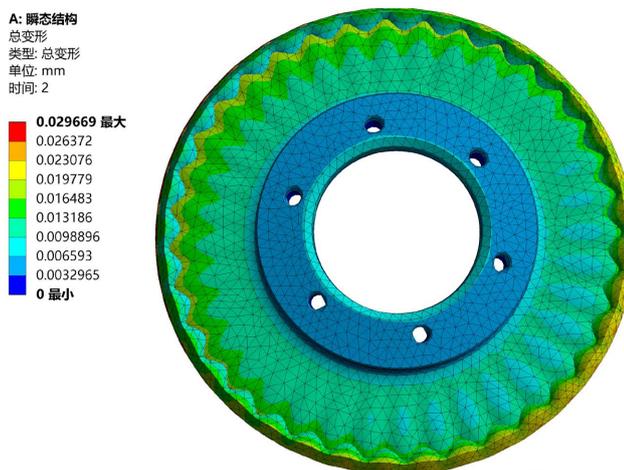


Figure 2. Brake disc strain map

图 2. 制动盘应变云图

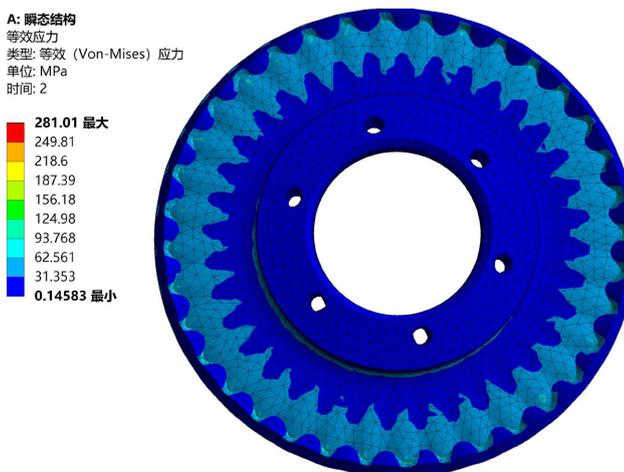


Figure 3. Brake disc stress clouds

图 3. 制动盘应力云图

分析结果表明，制动盘在施加制动力的情况下，其应力分布呈现出明显的不均匀性。从图 2 和图 3 的数据显示，制动盘的最大应力值达到了 281.01 MPa，而对应的最大变形量为 0.0297 mm。鉴于制动盘材料的最大屈服强度为 345 MPa，这一应力水平仍在材料允许的范围內，满足其正常工作要求。然而，这些结果也进一步表明，在实际使用过程中，制动盘的边缘区域承受了相对较大的应力负荷，长期来看

可能会导致疲劳或磨损。因此,为了提高制动盘的整体耐久性,可能需要对设计进行适当的优化和加强,尤其是在边缘区域,以确保其在高应力环境下的可靠性能和使用寿命。

4. 制动盘的模态分析

4.1. 模态分析介绍

模态分析是一种用于确定结构自然频率和振型的关键工具。自然频率是指结构在没有外力干扰的情况下,自发产生的固有振动频率,而振型则描述了结构在这些特定频率下的变形方式或形态。通过模态分析,可以有效地评估结构在动态条件下的响应特性,这对于预测和优化结构的性能至关重要[6]。尤其是在工程设计中,模态分析能够帮助设计师识别和避免结构在工作频率范围内发生共振的潜在风险。共振现象会导致结构产生较大振动,甚至引发损坏或失效,因此,确保工作频率远离结构的自然频率是实现结构安全性和可靠性的核心设计目标之一。此外,模态分析还可以为后续的结构优化和材料选择提供重要参考,从而确保产品在复杂工况下的稳定运行和使用寿命。

首先对于无阻尼自由转动情况来看,外部或者内部没有产生阻尼,外部也没有对它产生激励,即:

$$MU(t) + KU(t) = 0 \quad (2)$$

式(1)经过傅立叶变换所对应的简谐振动的解为:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中: ω 为固有频率, Hz; U_0 为振幅, μm 。

将式(3)代入到式(2),得:

$$(K - \omega^2 M) * U_0 = 0 \quad (4)$$

由于模型式自由振动,因此模型中的每个节点振动幅度不可能都为 0,由齐次线性方程组可知方程的系数都为 0。即:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5)$$

4.2. 添加约束

进行模态分析时,必须正确设置约束条件,以确保分析的准确性。在 ANSYS Workbench 中,对制动盘模型加以下约束:

固定边界: 制动盘的中心孔固定,以模拟实际安装情况。

自由边界: 边缘部分允许自由振动,以模拟实际工作状态下的动态行为。

这些约束条件能够确保模态分析结果的准确性,并与实际工况相符。

4.3. 结果分析

制动盘的前六阶主振型如图 4 所示。

表 3 列出了通过查阅资料获得的整车模态分析数据。通过这些数据分析可以得出以下结论:

1) 整车系统的模态综合频率较低,集中在 100~200 Hz 范围,而制动器的最低固有频率为 858.38 Hz。两者之间的频率差异足够大,避免了共振的发生,减少了振动加剧。四缸发动机在怠速时的振动频率为 23~40 Hz,即便在最高转速下也约为 200 Hz,远低于制动器的固有频率,因此不会产生共振,确保了车辆运行的平稳性和安全性。

2) 随着阶次的增加,固有频率逐步升高。这是由于随着阶次的升高,激发高阶振动所需的载荷能量

逐渐减少。同时，高阶振动具有更多的节点，使得振动更难被有效激发。因此，制动器的固有频率在第一阶振型时达到最低值。

3) 当汽车在地面行驶时，地面施加的激励通常只有十几赫兹，这远低于制动器的固有频率，因此不会引发与制动器的共振。主要的振动刺激来自于摩擦片和制动盘之间的摩擦耦合作用。从模态分析结果可以看出，制动器的一阶、二阶和三阶固有频率较为接近，因此在实际生产制造过程中，应特别注意避免共振的产生，以防造成更大的不良影响。

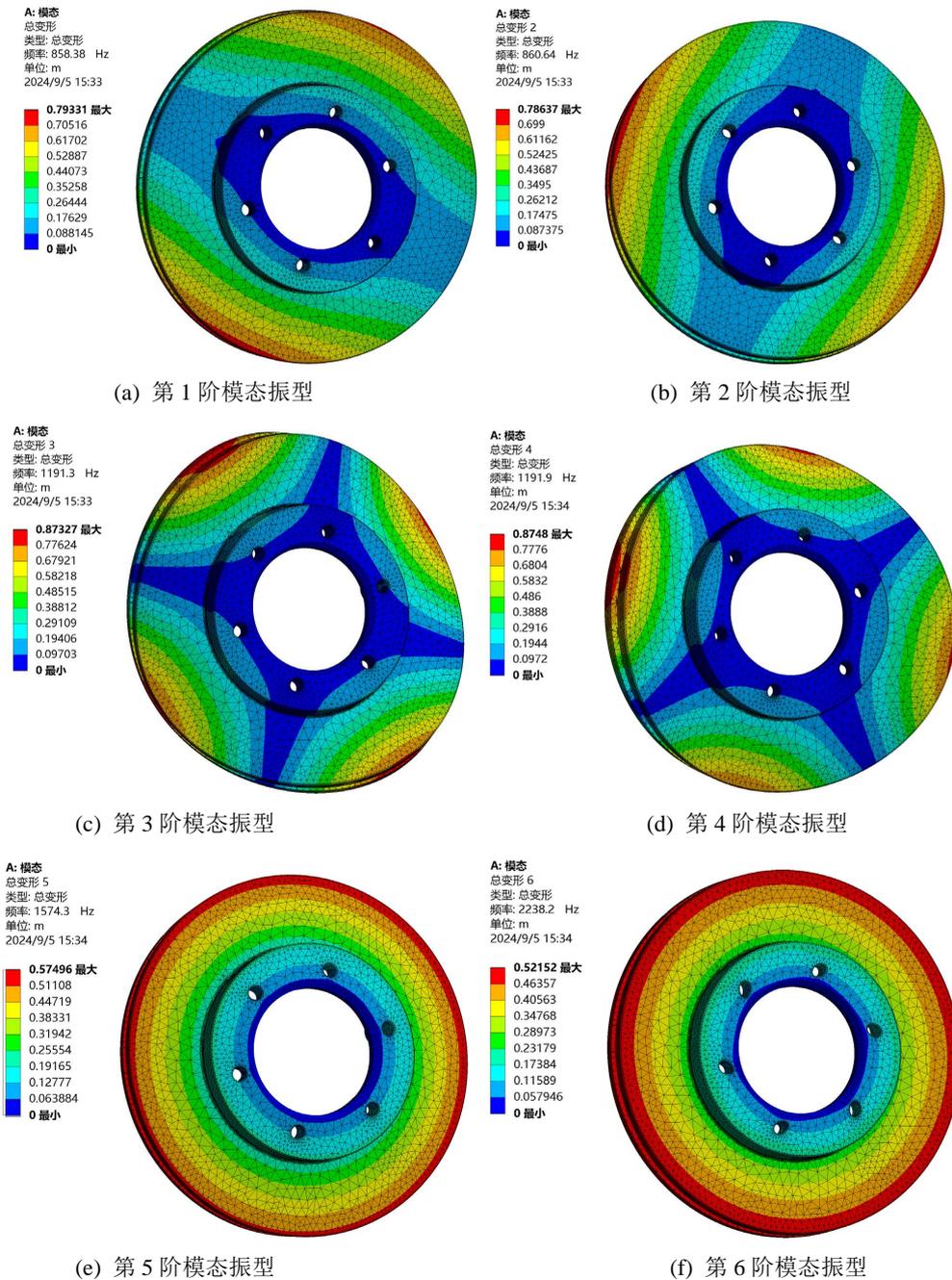


Figure 4. First 6 orders of vibration pattern of the brake disk
图 4. 制动盘的前 6 阶振型图

Table 3. Modal analysis table for the whole vehicle
表 3. 整车的模态分析表

序号	综合部件	振动频率					
		一阶扭转模态	一阶弯曲模态	二阶扭转模态	二阶弯曲模态	三阶扭转模态	三阶弯曲模态
1	车架	106.82	255.98	371.61	694.53	875.43	1267.32
2	车架、车轮	107.29	255.98	371.76	694.8	875.46	1267.3
3	车架、车轮、发动机	87.23	367.48	497.97	717.58	905.51	1290.7
4	车架、车轮、座椅	108.6	256.14	371.99	694.52	875.48	1267.3
5	车架、车轮、发动机、座椅	87.48	367.89	498.36	717.58	905.56	1290.7

5. 结论

通过对盘式制动器的有限元分析，本文在静力学和模态分析的基础上，得出了有关制动盘在工作条件下的应力、变形以及振动特性的关键结论。首先，静力学分析表明，制动盘的最大应力值为 281.01 MPa，远低于铸铁材料的屈服强度 345 MPa，表明该设计在静态工况下能够满足安全性要求。此外，制动盘的变形量较小，符合设计预期。模态分析结果显示，制动盘的最低固有频率为 858.38 Hz，远高于汽车工作过程中可能产生的共振频率范围，避免了因共振引发的破坏性振动。这表明制动盘在动态条件下具有较好的振动响应特性，不易发生共振。总体而言，本文的有限元分析为盘式制动器的设计和优化提供了可靠的理论依据，验证了其良好的静力学性能和动态特性，同时也为后续的设计改进提供了方向，尤其是在制动盘边缘区域的应力分布优化上，可以进一步提升其耐久性和可靠性。

参考文献

- [1] 孔田增, 潘宗友. 基于 ANSYS Workbench 的盘式制动器关键件的结构设计与模态分析[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(2): 74-79.
- [2] 周润东, 王颂扬, 解文昊, 等. 基于 ANSYS Workbench 的一种盘式制动器设计与分析[J]. 技术与市场, 2023, 30(10): 32-35.
- [3] 侯天琦. 基于 ANSYS Workbench 的盘式制动器主要零件静力分析[J]. 求知导刊, 2015(8): 62.
- [4] 曾昱皓, 谢松成, 杨荣松. 基于 ANSYS Workbench 的新型盘式制动器的强度分析和模态分析[J]. 机械, 2020, 47(1): 23-29.
- [5] 陆春元, 万长东. 基于刚柔耦合方法的盘式制动器支架结构强度分析[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 22-25+102.
- [6] 张琪. 基于总成的盘式制动器强度和刚度分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.