

基于Abaqus的燕尾型滑块有限元分析

张航洲, 王 艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月9日

摘 要

机械设备是制造业的核心生产力, 制造业有能够推进机械设备的发展。机械设备能够进行各种形式的运动离不开导向装置。燕尾导轨就是一种常见的导向装置, 广泛用于各种机械设备中, 能够保证运动部件进行直线运动, 并且具有良好的稳定性和负载能力。在一些设备中, 燕尾导轨常常会倒置使用, 在这种情况下, 配套的滑块连接了物体与导轨, 会承受较大的载荷, 需要对滑块进行安全评估。本文通过使用UG建模和Abaqus有限元分析, 对滑块进行静态分析、模态分析和谐波响应分析。得到了滑块在工作载荷作用下的最大应力值和最大应变值以及滑块的振动特性。通过以上分析, 对滑块的安全性和稳定性进行了评估, 滑块的应力和应变都在安全使用范围中, 滑块的固有频率远高于工作中的振动频率, 不会出现共振现象, 并提出了滑块结构优化的建议。

关键词

Abaqus, 滑块, 有限元分析

Finite Element Analysis of a Dovetail-Type Slider Based on Abaqus

Hangzhou Zhang, Yan Wang

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

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 9th, 2025

Abstract

Mechanical equipment is the core productive force of the manufacturing industry, and manufacturing plays a crucial role in advancing the development of mechanical equipment. The motion of mechanical equipment in various forms relies on guiding devices. The dovetail guide rail is a common guiding device widely used in various types of machinery. It ensures the linear motion of moving components while providing excellent stability and load-bearing capacity. In some equipment,

dovetail guide rails are often used in an inverted configuration. In such cases, the corresponding slider, which connects the object to the guide rail, bears significant loads, necessitating a safety evaluation. This paper utilizes UG modeling and Abaqus finite element analysis to conduct static analysis, modal analysis, and harmonic response analysis on the slider. The study determines the maximum stress and strain values of the slider under working loads, as well as its vibration characteristics. Based on these analyses, the safety and stability of the slider are evaluated. The results show that the stress and strain levels remain within the safe operating range, and the natural frequency of the slider is significantly higher than the working vibration frequency, eliminating the risk of resonance. Additionally, structural optimization suggestions for the slider are proposed.

Keywords

Abaqus, Slider, 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

机械制造业是我国工业中的核心行业之一, 为我国的经济发展、社会就业、国防建设和科技创新等方面提供了支持[1]。机械制造业在推动着经济增长、推动着技术进步和产业升级、提高了国际竞争力和基础设施建设等方面起到了重要作用[2]。机械设备是制造业的核心生产力, 制造业有能够推进机械设备的发展。机械设备能够进行各种形式的运动离不开导向装置, 最常见的导向装置就是导轨, 滑块可以在导轨上带着物体进行直线运动。

导轨滑块组件是一直常见的直线导向装置, 能够保证机械设备进行稳定而准确的直线运动, 同时可以承受较高的工作载荷, 常常被用在机械加工设备、自动化设备、航空航天和运输设备等机械设备中[3]。在一些具有特殊要求的设备中, 导轨的位置需要进行倒置, 此时滑块连接了导轨和重物, 处于被拉伸状态。滑块在工作载荷作用下可能会发生变形导致脱离, 出现事故, 所以需要滑块进行安全评估。随着计算机的快速发展, 计算机辅助工程的发展也已经成熟, 通过软件进行有限元分析可以对产品进行预测和结构优化, 节约了成本[4]。张立斌[5]等利用 ANSYS 软件对液体静压导轨进行了静态特性进行了研究, 得到了导轨的变形情况。戴长军[6]等利用 ANSYS 软件对导轨结构变形进行了静力学分析, 得到了导轨和滑块在载荷作用下的变形情况。顾嶝[7]等利用 ANSYS 软件对导轨和滑块进行了静力学分析, 并根据仿真结果对导轨结构进行了优化, 提高了导轨的强度。

本文通过使用 UG 建模软件对导轨和滑块进行模型建立, 利用 Abaqus 软件进行静力特性分析、模态分析和谐响应分析, 仿真了滑块在工作载荷作用下的静力学特性和振动特性。通过分析滑块在工作条件下的应力、应变以及振动情况, 对滑块的使用进行了安全评估, 并利用仿真结果为结构优化提供理论依据[8]。

2. 几何模型建立

UG 可以使用各种工具对物体进行建模, 根据实际燕尾导轨和滑块的尺寸进行建立三维模型, 由于导轨和滑块上的安装孔在使用过程中会用螺丝固定, 在建模过程将其与导轨和滑块看为整体, 对模型进行了简化, 为后续有限元分析节约了计算时间。如图 1 所示, 这是在 UG 中建立的导轨和滑块模型。



Figure 1. 3D Model of the Guideway and Slider
图 1. 导轨和滑块的三维模型

3. 有限元模型建立

利用建模软件对模型的文件进行转换，将文件格式保存为 step 格式，保证 Abaqus 软件可以直接使用模型。然后对导轨和滑块进行有限元分析，包括静力学分析、模态分析和谐响应分析，对其使用安全进行评估。

3.1. 材料属性定义

选择合适的材料模型和设置正确的材料参数是仿真结果准确的根本。根据实际使用情况，导轨和滑块的材料类型为弹塑性材料，材料为结构钢，密度为 7800 kg/m^3 ，杨氏模量为 $2\text{e}11 \text{ Pa}$ ，泊松比为 0.3，屈服应力为 $2.35\text{e}8 \text{ Pa}$ 。

3.2. 模型网格划分

网格划分能够将连续模型变为离散的单元，方便计算机求解，网格的划分质量对仿真结果、计算效率和准确性有很重要的影响，需要根据实际需要选择合适的网格质量。Abaqus 作为成熟的仿真软件，其内置了自动网格划分模块，提高了仿真效率。利用自动划分模块进行网格划分，结果如图 2 所示。

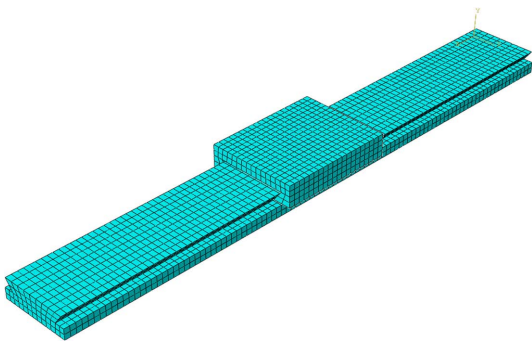


Figure 2. Mesh
图 2. 网格划分

3.3. 约束和边界条件设置

导轨在使用过程中，非工作平面被固定在平面上，滑块带着重物在导轨上缓慢运动。根据实际工况对模型进行载荷约束和设置边界条件。模型把导轨非工作平面进行固定约束，对滑块进行固定约束，然后需要在滑块表面施加竖直向下的 5000 N 的拉力，由于 Abaqus 是通过压强作用在表面实现的，根据实际面积进行转换，需要施加 $1.58\text{e}5 \text{ Pa}$ 的压强，方向向上，将其并在导轨和滑块接触面设置接触对，用于分析滑块开口处的变形。具体情况如图 3 所示。

4. 仿真结果分析

4.1. 滑块静力仿真结果与分析

静力仿真能够分析结构在外力作用下的应力和应变，帮助预测潜在的安全问题。完成上述操作后，

设置静力分析步, 并进行求解, 得到滑块的应力云图和应变云图, 仿真结果如图 4 和图 5 所示。

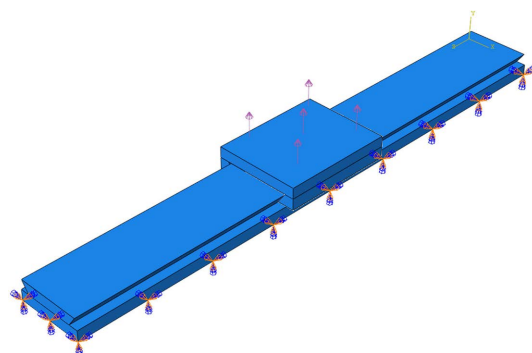


Figure 3. Load and boundary condition setup
图 3. 载荷与约束条件设置

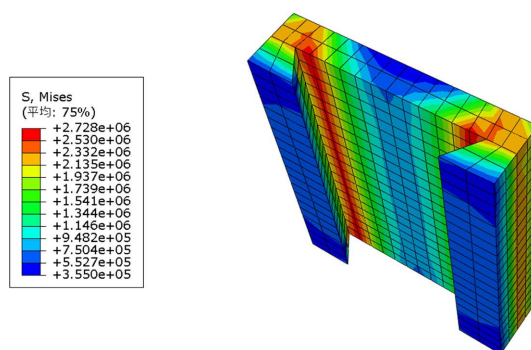


Figure 4. Stress contour of the slider
图 4. 滑块应力云图

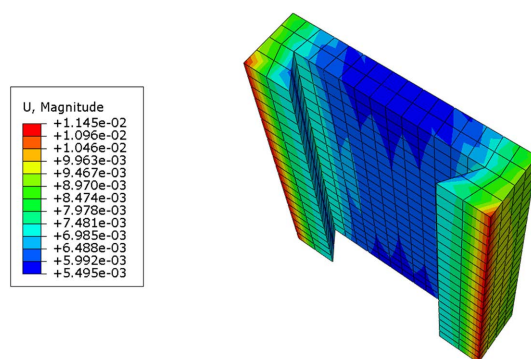


Figure 5. Strain contour of the slider
图 5. 滑块应变云图

结果显示, 滑块在工作载荷下的最大变形量出现在滑块的两边, 增大了滑块开口的大小, 可能导致滑块的脱落, 此时最大变形量为 1.145×10^{-5} m, 但最大变形量很小, 仍然在滑块正常工作的许可范围内。滑块在工作载荷下的最大应力出现在滑块内表面的两侧, 这个位置是滑块与导轨连接的重要位置, 当应力过大时会发生断裂, 此时最大应力为 2.728×10^6 Pa, 最大应力小于材料的屈服应力, 在安全范围内。滑块不会出现脱离和断裂问题, 滑块能够安全使用。在正置使用时, 由于导轨对接触面的作用力为较为均匀

的平面力，会使滑块的应力分布均匀，减少应力集中，减少变形。

最大应力出现的位置两侧分别受到载荷和支撑力，在这个位置的形状出现了结构的几何突变，没有采用圆滑过渡处理，受力面的夹角为锐角，同时由于材料的连续性，外部载荷在这个地方无法平滑过渡，最终导致产生了较大的应力梯度。可以间过渡方式改为圆角过渡，降低应力集中系数。

最大应变出现的位置与最大应力出现的位置不重合，主要是因为滑块的结构刚度分布不均匀，导致一些区域出现大变形。可以提高在大变形区增加加强筋或更换材料的方法改进。

4.2. 滑块模态仿真结果与分析

在 Abaqus 中进行模态分析时，要设置“频率”分析步进行求解，同时需要对导轨和滑块设置对称约束、反对称约束、固定约束和作用力，最后提交求解。模态分析可以得到滑块在工作载荷下的前六阶振型频率和在此频率下的最大应变变量，数据见表 1，振型如图 6~11 所示。

Table 1. First six orders of intrinsic frequency
表 1. 前六阶振型频率

模态阶数	频率/Hz	位移大小/m
1	3024	2.094e-2
2	3334	2.435e-2
3	3571	3.563e-2
4	5086	3.966e-2
5	5734	1.925e-2
6	6094	2.634e-2

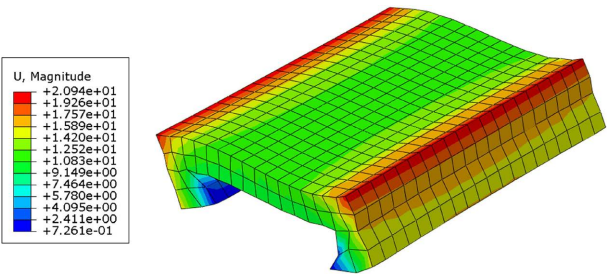


Figure 6. First order vibration mode
图 6. 一阶振型

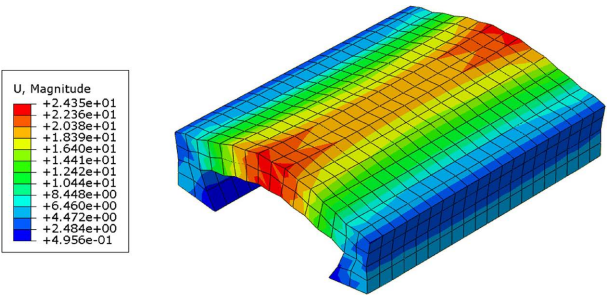


Figure 7. Second order vibration mode
图 7. 二阶振型

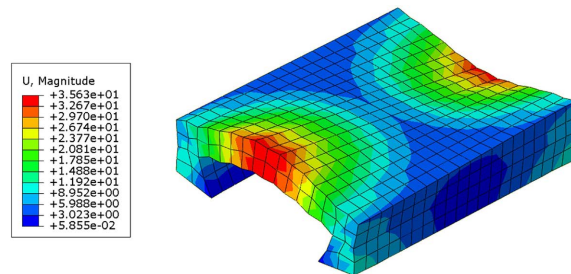


Figure 8. Third order vibration mode
图 8. 三阶振型

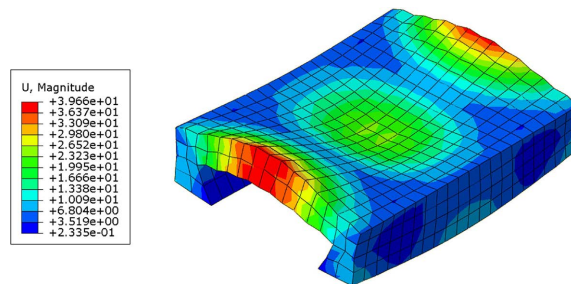


Figure 9. Fourth order vibration mode
图 9. 四阶振型

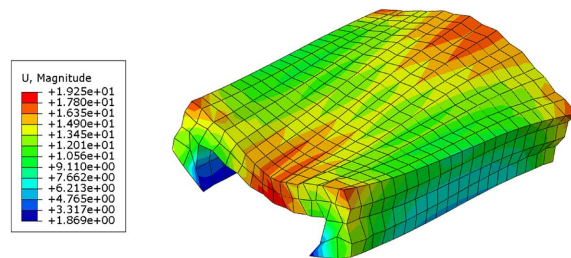


Figure 10. Fifth order vibration mode
图 10. 五阶振型

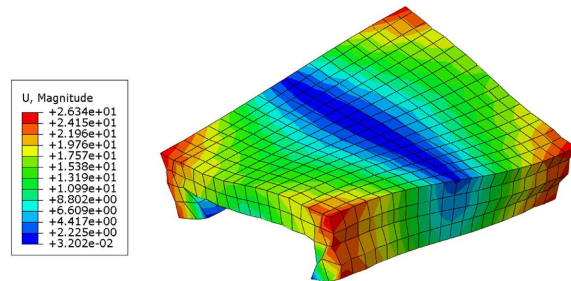


Figure 11. Sixth order vibration mode
图 11. 六阶振型

振型是结构在其固有频率下的特定振动模式。每个振型对应一个固有频率，阶次越高，振动模式越复杂，影响结构的稳定性、疲劳寿命、振动响应和设计优化[9]。以下是不同阶次振型的意义及其工程影响。一阶振型是最低能量的振动形态，往往决定了系统的整体动力学特性，如果一阶固有频率过低，说明结构的刚度不足，可能在工作环境中容易发生较大变形，甚至导致疲劳损伤。二阶振型通常表现为更

复杂的波动模式,可能包含额外的弯曲、扭转或局部变形,如果结构长期受到高频激励,可能导致局部疲劳损伤或材料裂纹。当振型阶次增加时,结构的振动模式会发生显著变化,影响到动力学特性、局部应力、疲劳寿命、结构刚度需求等多个方面[10]。

根据以上软件仿真结果云图可知,滑块在高频振动作用下会出现明显的大变形,最大变形量出现在频率为 5086 Hz 时出现的,为 3.966×10^{-2} m。这个变形量是滑块尺寸的 1/4 左右,已经严重改变了滑块的形状结构。在此频率下可能出现了共振现象,滑块在使用过程中应该避免在高频率下工作,来保证安全。

滑块的最小频率为 3024 Hz,这种滑块一般工作低速和稳定的环境,周围环境的频率远低于最小频率,在正常工作下,不会出现共振现象,滑块也不会出现塑性变形,可以在正常形状下工作。

4.3. 滑块谐响应分析

谐响应分析以模态分析为基础,通过谐响应分析可以确定部件、机构在承受正弦(简谐)规律变化的载荷时的稳态响应规律,可以反映出结构件在受到不同频率简谐载荷作用下自身的运动特性[11]。谐响应分析一般有三种方法,即直接法、子空间迭代法和模态叠加法。其中,模态叠加法必须先进行模态分析,本文采用模态叠加法进行分析[12]。谐响应分析是有限元分析中的非常重要的方法,用于分析系统对外界周期性载荷作用下的响应,利用谐响应分析可以得到系统或结构在不同频率载荷下的响应结果,如位移、应力、疲劳损伤和疲劳寿命等结果[13]。通过谐响应分析可以对结构在不同激励频率的振动特性和共振现象进行预测,研究人员可以根据仿真结果对结构进行优化设计,保证结构满足实际工程需要。

在进行谐响应分析时,要对周期性激励进行设置,通常载荷为正弦函数,将正弦函数幅值设置为工作载荷,即 5000 N 作用力下,对施加 1.58×10^5 Pa 的压强,在 0~10,000 Hz 频率范围内进行分析,分析结果如图 12 所示。结果显示了滑块在不同频率作用下的最大应变值,根据谐响应图可以知道滑块适合在什么样的环境频率下工作,避免出现共振现象。滑块在 3400 Hz 左右的应变为 0.12 m,在 5000 Hz 和 8000 Hz 左右的应变为 0.02 m 左右,当在 10,000 Hz 附近时,应变急剧增大。在这几个频率下,滑块可能存在共振的现象。

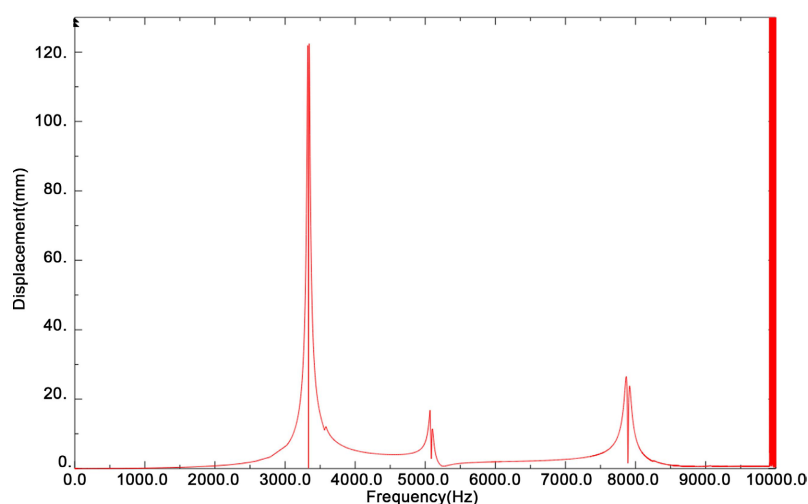


Figure 12. 0~10,000 Hz harmonic response diagram

图 12. 0~10,000 Hz 谐响应图

5. 结论

导轨和滑块作为机械设备中重要的导向部件,在工作载荷作用下,滑块会发生变形,导致运动出现

问题, 导轨和滑块的结构稳定影响着设备的稳定性, 在使用前需要对其进行有限元分析, 确保滑块能够安全使用。本文利用 Abaqus 对滑块进行静力学分析, 模态分析和谐响应分析, 对滑块结构进行预测, 根据结果判断滑块在工作载荷作用下状态。

利用仿真软件分析了滑块的应力分析、应变分析、预应力下的模态分析和谐响应分析, 结果表明: 在导轨倒置状态下, 滑块在受到载荷拉力时, 仍然能够保持较小的应力和应变, 滑块不会出现大变形和断裂, 仍然能够正常使用。在进行模态分析时, 滑块在工作载荷下的频率为 3024 Hz, 滑块在工作状态下的频率远低于滑块的预应力频率, 在工作过程中不会出现共振现象; 在进行谐响应分析时, 滑块在频率为 3400 Hz 和 10,000 Hz 处具有较大的应变, 可能存在共振现象, 已经严重改变了滑块的形状结构, 应当避免滑块在此频率下工作。通过仿真仿真软件加工的分析, 滑块能够在正常工作状态下稳定运行, 满足工作条件。

参考文献

- [1] 郑艳, 陈兆. 制造业在经济发展中的基础性作用研究[J]. 当代经济, 2019(11): 4-7.
- [2] 沈国岩. 推动制造业高端化智能化绿色化发展[J]. 现代国企研究, 2023(12): 3.
- [3] 屈岳陵. 直线导轨的原理与发展[J]. 现代制造, 2003(20): 40-42.
- [4] 祁鹏. 计算机辅助工程(CAE)技术及其应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2019(14): 9-10.
- [5] 张立斌, 罗松保, 张刚强. 液体静压导轨有限元仿真方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(1): 16-18.
- [6] 戴长军, 毕超. 液体静压导轨结构变形的有限元仿真分析[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(2): 20-23, 31.
- [7] 顾頔, 黄鸿坤, 黄强强, 等. 滚动直线导轨校直压头与支撑结构优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(4): 153-156, 161.
- [8] 朱俊杰, 杜春承, 孙文静. CAE 仿真软件在产品优化设计中的应用[J]. 日用电器, 2020(10): 75-80.
- [9] 徐利利, 卓耀彬, 苗义高. 基于 ANSYS 的离心机推进器静力学及模态分析[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(1): 65-67.
- [10] 白园, 张帅, 刘荣娥. 基于 Workbench 的汽车轮毂轻量化设计与分析[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(3): 61-65.
- [11] 王雪虎, 谭勇军, 邓阳光. 基于 ANSYS Workbench 异型臂架模态及谐响应分析[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(1): 108-110, 114.
- [12] 顾帅帅, 高兴军. 新型超声复合变幅杆的设计及有限元分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(4): 92-96.
- [13] 王海玲. 基于 ANSYS 基础激励下某工装模态及谐响应分析[J]. 机械工程师, 2019(6): 31-33.