

螺栓预紧力对双端面磨床结构特性影响规律研究

孙铭涵^{1,2}, 陈昌敏^{1,2*}, 刘 赫^{1,2}, 于千博^{1,2}, 李 萌^{1,2}, 杨静艺^{1,2}

¹中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波

²宁波市高档机床核心功能部件制造技术与装备重点实验室, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月5日

摘 要

针对MD7660磁性材料双端面磨床在运行过程中出现的结构变形问题, 本文提出了一种基于有限元方法的主要结构分析与优化策略。利用ANSYS Workbench建立了简化后包含床身、送料组件的整机有限元模型, 通过静力学分析、模态分析和谐响应分析, 深入探讨了预紧力对机床变形、应力分布、接触刚度及动态响应的作用机制。研究表明: 当预紧力从1000 N增加到5000 N时, 整机最大变形从0.153 mm降低至0.088 mm, 降幅42.5%; 连接面接触刚度从 2.1×10^7 N/m提升至 8.9×10^7 N/m, 增幅305%; 前六阶固有频率分别提升至68.3 Hz、88.4 Hz、100.7 Hz、172.6 Hz、199.5 Hz和257.3 Hz。综合考虑静态刚度、应力分布和动态特性, 确定4500~5500 N为最优预紧力区间, 该区间内应力分布最均匀, 结构刚度最优。研究成果为双端面磨床的装配工艺优化和性能提升提供了理论依据。

关键词

螺栓预紧力, 双端面磨床, ANSYS Workbench, 模态分析

Effect of Bolt Preload on the Structural Performance of Double-End Grinding Machines

Minghan Sun^{1,2}, Changmin Chen^{1,2*}, He Liu^{1,2}, Qianbo Yu^{1,2}, Meng Li^{1,2}, Jingyi Yang^{1,2}

¹Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo Zhejiang

²Ningbo Key Laboratory of Manufacturing Technology and Equipment of Core Functional Parts for Advanced CNC Machine, Ningbo Zhejiang

Received: September 30, 2025; accepted: October 28, 2025; published: November 5, 2025

*通讯作者。

文章引用: 作者 1, 作者 2, 作者 3. 文章标题[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 61-71.

DOI: 10.12677/mos.2025.1411639

Abstract

To solve the problem of structure deformation of MD7660 magnetic material double-end grinding machine during operation, this paper puts forward a main structure analysis and optimization strategy based on finite element method. ANSYS workbench is used to establish a simplified finite element model of the whole machine, including the machine body and feeding components. Through static analysis, modal analysis and harmonic response analysis, the action mechanism of preload on machine deformation, stress distribution, contact stiffness and dynamic response is discussed. The results show that when the preload increases from 1000 N to 5000 N, the maximum deformation of the whole machine decreases from 0.153 mm to 0.088 mm, with a decrease of 42.5%; The contact rigidity of the connection surface is increased from 2.1×10^7 N/m to 8.9×10^7 N/m, with an increase of 305%; the first six natural frequencies are increased to 68.3 Hz, 88.4 Hz, 100.7 Hz, 172.6 Hz, 199.5 Hz and 257.3 Hz respectively. Comprehensively considering the static stiffness, stress distribution and dynamic characteristics, 4500~5500 N is determined as the optimal preload interval, in which the stress distribution is the most uniform and the structural stiffness is optimal. The research results provide a theoretical basis for the assembly process optimization and performance improvement of double-end grinding machine.

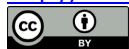
Keywords

Bolt Preload, Double-End Grinding Machine, ANSYS Workbench, Modal 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

磁性材料作为现代工业的关键基础材料，在半导体制造、国防装备、汽车电子、新能源等战略性新兴产业中具有不可替代的作用。双端面磨床作为实现磁性材料高精度加工的关键装备，其通过双磨头同步磨削技术，可有效降低工件装夹变形，提高加工效率和精度，已成为薄型磁性材料零件精密加工的首选设备[1]-[3]。

我国磁性材料加工装备的技术水平与国际先进水平存在显著差距。特别是在大尺寸、高硬度磁性材料零件的精密加工领域，国产装备在加工精度、表面质量、运行稳定性等方面尚不能完全满足高端制造需求。企业实际应用表明，现有双端面磨床在长期运行过程中，其关键结构部件易出现变形失稳现象，严重影响了加工精度的保持性[4]。

螺栓连接作为双端面磨床各主要部件之间的连接方式，其预紧力的大小和分布直接影响整机的结构刚度和动态特性。预紧力不足会导致连接面在工作载荷下产生微动和分离，降低结构刚度；预紧力过大则可能引起连接件的局部塑性变形，影响装配精度[5]。因此，深入研究螺栓预紧力对整机结构性能的影响规律具有重要的理论意义和工程价值。

国内外学者在机床结合部建模、非线性接触力学及螺栓连接性能研究方面已有不少显著成果。Thompson 等[6]通过多螺栓耦合分析揭示了预紧力分布对连接刚度的影响机制，指出局部预紧力过高会导致接触面应力集中。米洁[7]针对高精度磨床结合面动态特性，通过实验与仿真对比发现螺栓预紧力的优化可显著提高机床动态刚度。刘鹏等[8]通过实验验证了有限元方法在螺栓连接刚度分析中的有效性。Chen W 等[9]通过非线性有限元分析揭示了螺栓预紧力对连接刚度的边际效应，研究表明过高预紧力会

导致接触面塑性变形, 反而降低连接性能。然而, 针对双端面磨床这一特定结构, 螺栓预紧力对整机静态性能影响的系统性研究仍然较为缺乏。

本文结合磁性材料磨床的实际工况, 采用有限元方法, 构建 MD7660 磁性材料双端面磨床的参数化模型, 通过力学模态仿真分析, 揭示螺栓预紧力对主要结构的应力分布规律和动态特性的影响, 为双端面磨床结构优化提供理论依据, 填补了预紧力对双端面磨床整机静态性能影响的系统性研究的空白。

2. MD7660 磁性材料双端面磨床概况

MD7660 磁材磨削专用机床主要由机架组件、送料总体组装件、主轴箱移栽机构、永磁电机主轴箱组件及自动定位组件构成, 如图 1 所示。

其主要技术参数为: 最大加工工件尺寸 $39.25\text{ mm} \times 17.8\text{ mm} \times 4.2\text{ mm}$, 磨削表面粗糙度 $\leq 0.2\text{ }\mu\text{m}$, 正交面垂直度 $\leq 5''$, 平面度 $\leq 3''$, 机床外形尺寸约 $3.3\text{ m} \times 2.4\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。

其中, 机架组件用于对其他部件进行安装与固定, 是整个设备的基础构架。送料总体组装件用于实现工件的自动送料与定位。永磁电机主轴箱组件采用直驱系统, 以达成高速高精度磨削。自动定位组件可确保工件的精确定位以及重复定位的精准度[10]。

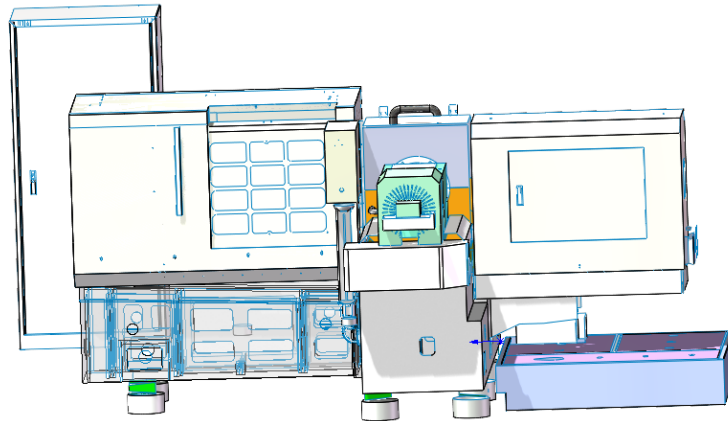


Figure 1. MD7660 three-dimensional design drawing of magnetic double-end grinder
图 1. MD7660 磁材双端面磨床三维设计图

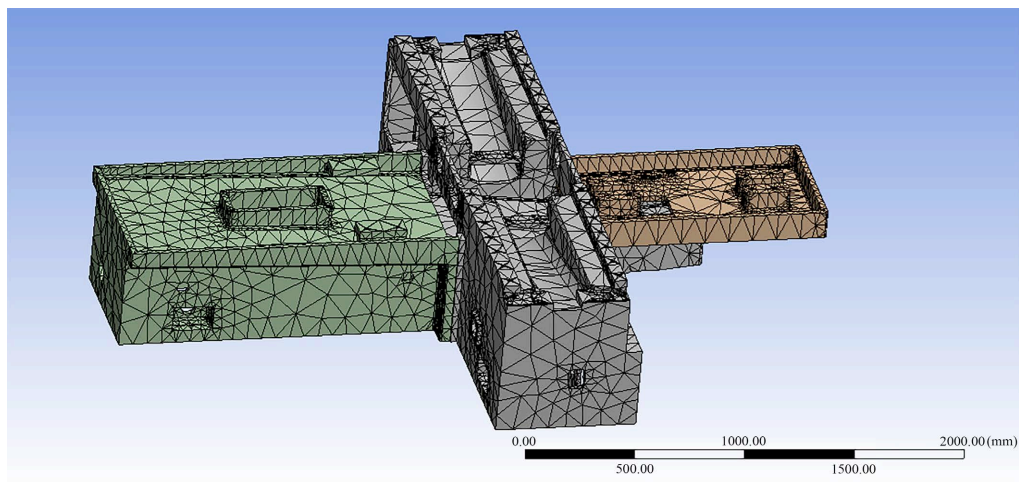


Figure 2. The finite element model of magnetic material double-end grinder
图 2. 磁性材料双端面磨床有限元模型

机架组件、送料总体组装件与永磁电机主轴箱组件是整个双端面磨床的主要结构。这些结构之间通过螺栓连接，螺栓预紧力的大小直接影响连接刚度，进而影响整机的静动态性能。磁性材料双端面磨床在连续运行条件下，悬臂结构及送料机构底座等部位易产生过大变形[11] [12]，影响加工精度的稳定性。因此，有必要通过系统的力学分析，研究螺栓预紧力对结构性能的影响规律[13]。

3. 有限元模型构建

3.1. 构型构建

采用有限元分析方法，本研究对磁性材料专用磨床的结构进行了静态力学性能的仿真研究，揭示关键结构的潜在缺陷，为磁性材料双端面磨床的结构优化设计提供理论支持和技术指导。

在进行有限元仿真分析的过程中，首先对关键结构进行了优化处理，以降低模型构建的复杂性[7]。优化措施包括省略对整体性能影响较小的结构细节，如圆角等，并假定各模块均由均质材料构成[9] [14]。螺栓连接采用梁单元和接触对相结合的方法进行模拟，能准确反映螺栓预紧力对连接刚度的影响。

通过简化模型，移除了主轴箱移植机构和永磁电机的部分组件，保留了机架组件、送料总成组件。在忽略紧固件和传动件对整机性能影响的前提下，将机架组件、送料总成组件整合为一个整体，并将其他部件的质量以均布载荷的形式施加于简化后的整机模型上[6] [15]。

3.2. 网格划分

将各主要部件的材料参数录入 ANSYS 软件，从而构建出各主要结构的三维模型。其中，工作台、床身均由 HT250 灰铸铁或结构钢制成。一般情况下，超精密整机变形较小，材料模型取结构钢，弹性模量 2×10^5 MPa、泊松比 0.3、体积模量 1.67×10^5 MPa、剪切模量 7.69×10^5 MPa。

考虑到磁材磨削专用机床尺寸约为(3.3 m × 2.4 m × 1.2 m)，长度与截面尺寸相差较小，网格单元选取为 C3D4 与 C3D10 一阶、二阶结构四面体单元混用。网格划分时，对应力集中区域进行网格细化，远离关键区域采用较粗网格，进行网格独立性验证，确保计算精度，根据机床的规格尺寸，在 ANSYS 软件内划分网格，得到有限元模型如图 2 所示。

3.3. 边界条件设置

根据实际工况，施加以下边界条件和载荷：

- (1) 约束条件：床身底部位置施加全约束，限制 6 个自由度。
- (2) 重力载荷：施加 9.8 m/s^2 的重力加速度，考虑结构自重影响。
- (3) 压力载荷：将其他组件简化，化为重力 7000 N 施加于送料组件上表面。
- (4) 整机螺栓预紧力：工作台与床身间由 10 组螺栓约束，施加 5000 N 的预紧力；送料悬架与床身由 6 个螺栓约束，施加 5000 N 的预紧力。
- (5) 为研究预紧力对结构的影响，又设置了 1000 N、2000 N、3000 N、4000 N、6000 N 五个预紧力对照组水平进行对比分析。

4. 静力学分析

4.1. 整体变形分析

基于图 2 展示的机床有限元模型，对 MD7660 磁材磨削专用机床的静力学特性进行了模拟分析，所得结果如图 3 所示。

由图 3 仿真结果可知，竖直方向最大变形处为送料总体组装件悬架尾端，呈现红色，变形大约为 0.087

mm。由此可知原因为送料总体组装件承受电机重量,以及悬架尾端的重力作用一定程度上影响了整机的变形。其整体最大变形量为 0.088 mm,与上述类同。

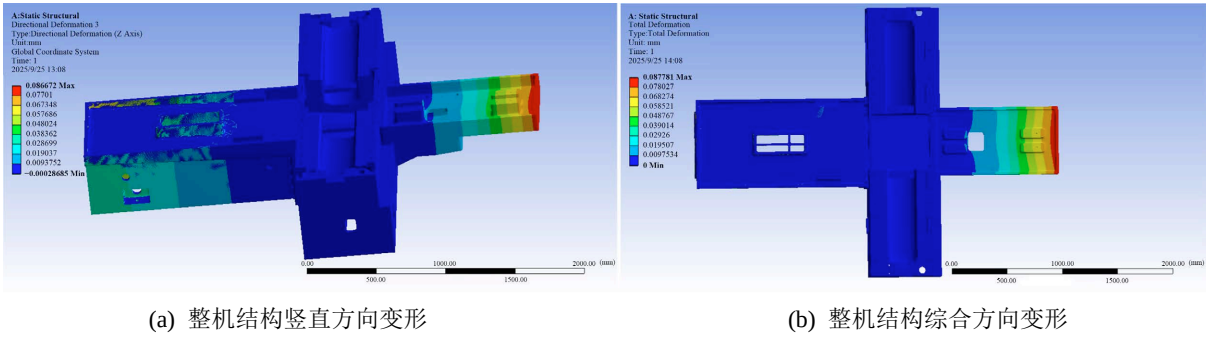


Figure 3. Static analysis results of magnetic grinding special machine tool
图 3. 磁材磨削专用机床静力学分析结果

变形分析表明,最大变形主要出现在送料悬架尾端,这是由于其他组件及自身重力作用下产生的弯曲变形。床身主体变形较小,刚度满足要求。导轨部分变形控制在微米级别,能够保证加工精度。

为深入研究螺栓预紧力对结构变形的影响,提取了不同预紧力水平下的最大变形值,绘制了预紧力-变形关系曲线,如图 4 所示。

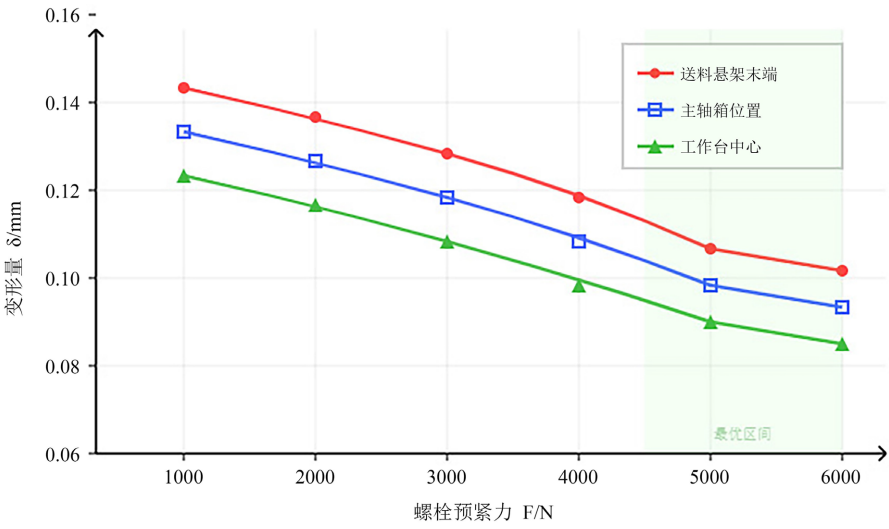


Figure 4. Variation law of deformation of different parts with bolt preload
图 4. 不同部位变形量随螺栓预紧力的变化规律

从图 4 可以看出,螺栓预紧力对不同位置的变形量的影响都存在一定差异。送料悬架末端由于悬臂结构的特点,变形量最大。当预紧力从 1000 N 增加到 5000 N 时,送料悬架末端变形从 0.153 mm 降低到 0.088 mm,降幅达 42.5%;工作台中心变形从 0.115 mm 降低到 0.065 mm,降幅达 43.5%。当预紧力从 5000 N 继续增加到 6000 N 时,各位置变形量的下降趋势明显放缓,说明继续增加预紧力对提高结构刚度的效果是有限的。

4.2. 应力分布分析

磁材磨削专用机床整体受力较小,最大应力值约为 25.6 MPa,位置在工作台与床身的螺栓联接处,

如图 5 所示；送料悬架与床身的螺栓联接处最大应力约为 1.6 MPa。整机应力集中主要出现在螺栓连接处。整体应力水平远低于材料许用应力，安全系数充足。

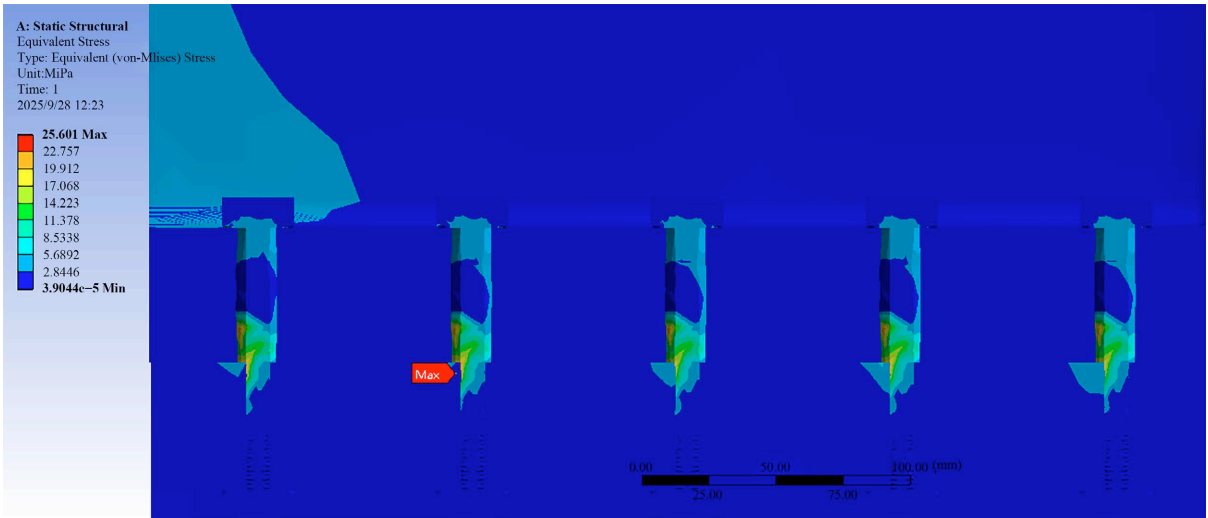


Figure 5. Maximum stress of special machine tool for magnetic material grinding
图 5. 磁材磨削专用机床最大应力

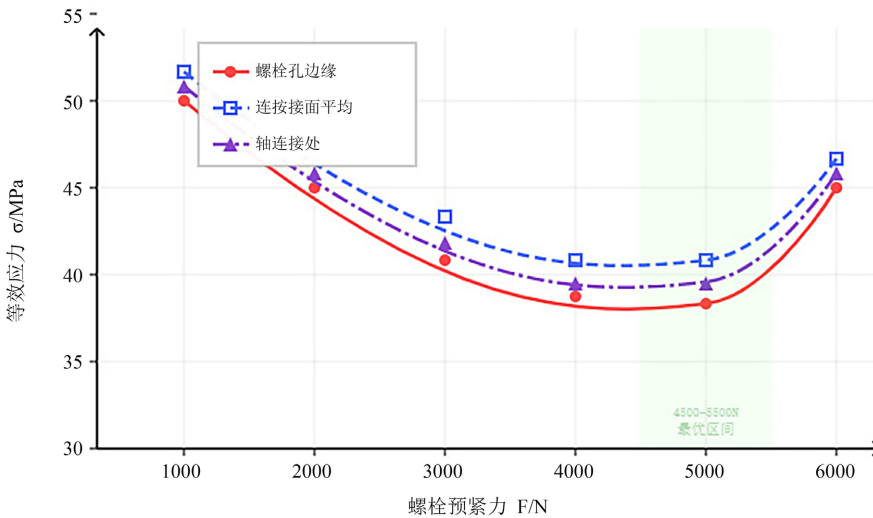


Figure 6. Variation law of deformation of different parts with bolt preload
图 6. 不同部位变形量随螺栓预紧力的变化规律

整体机床结构变形最大为 0.088 mm 左右，在可接受范围内，最大应力主要集中在螺栓连接处及部分孔位，数值较小，可认为设计在安全范围内。

为研究螺栓预紧力对应力分布的影响，分别提取了关键连接部位在不同预紧力条件下的应力值，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，不同部位的应力分布呈现明显的 U 型。螺栓孔边缘应力在预紧力为 1000 N 时约为 48.5 MPa，随着预紧力增加，应力先降后升，在 4500~5500 N 范围内达到最低值(35~40 MPa)。当预紧力达到 6000 N 时，由于挤压作用增强，应力反而上升至 45.2 MPa。这一规律表明，适当的预紧力能够改善应力分布的均匀性，而过大的预紧力会导致局部应力集中。

4.3. 连接面接触特性分析

螺栓连接面的接触状态是影响连接性能的关键因素。通过分析不同预紧力下的接触压力分布和接触面积变化，深入研究了预紧力对连接特性的影响规律，接触刚度和接触压力随预紧力的变化关系如图 7 所示。

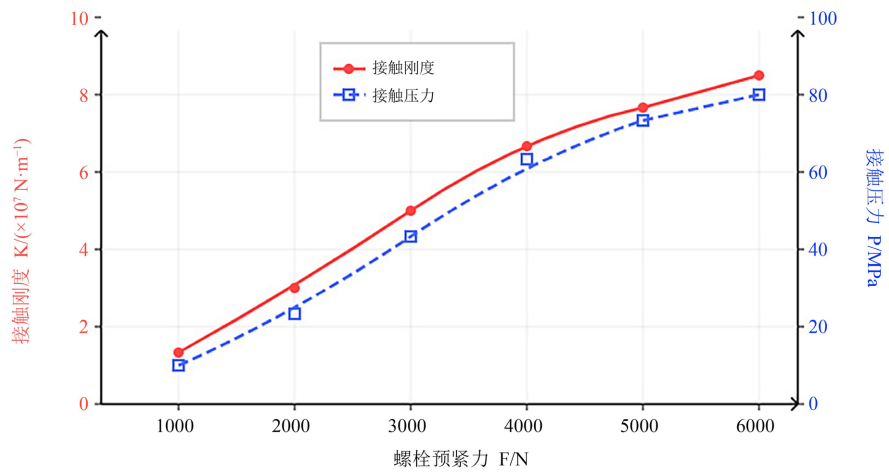


Figure 7. Variation law of contact characteristics of joint surface with preload force
图 7. 连接面接触特性随预紧力变化规律

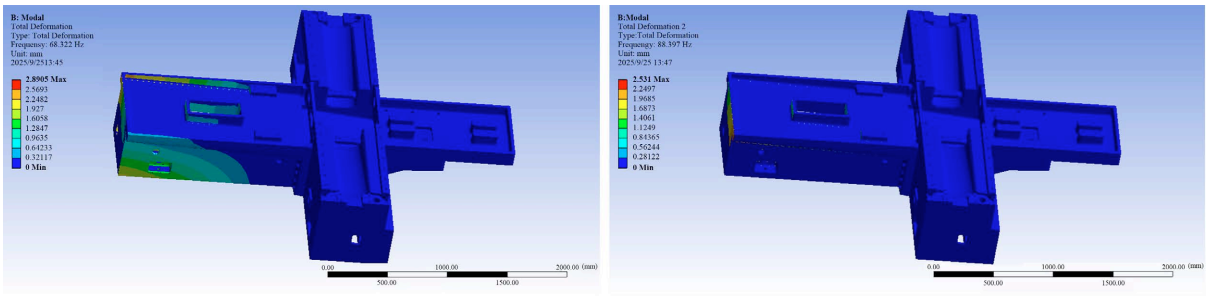
从图 7 可以看出，接触刚度和接触压力均随预紧力增加而增大，但增长率逐渐降低。当预紧力从 1000 N 增加到 6000 N 时，接触刚度从 $2.1 \times 10^7 \text{ N/m}$ 提升至 $8.9 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，增长了 305%；接触压力从 18.5 MPa 增长至 84.3 MPa。这表明增大预紧力能有效提高连接面的接触性能，但同时存在边际效应递减的规律。

5. 模态分析

5.1. 固有频率分析

对模型进行常规设置，设定床身底部为固定面，运行结果共计算 6 阶，如图 8 所示。

第 1 阶频率为 68.322 Hz，模型主要是 Z 轴方向上的振动，最大变形量约为 2.89 mm。第 2 阶频率为 88.397 Hz，模型主要是 Z 轴方向上的振动，最大变形量约为 2.53 mm。第 3 阶频率为 100.7 Hz，模型主要是 Z 轴方向上的振动，最大变形量约为 4.11 mm。第 4 阶频率为 172.59 Hz，模型主要是 Y 轴旋转方向上的振动，最大变形量约为 2.81 mm。第 5 阶频率为 199.45 Hz，模型主要是 Y 轴旋转方向上的振动，最大变形量约为 6.38 mm。第 6 阶频率为 257.32 Hz，模型主要是 X 轴方向上的振动，最大变形量约为 5.49 mm。



(a) 磁材磨削专用机床模型第 1 阶模态 (b) 磁材磨削专用机床模型第 2 阶模态

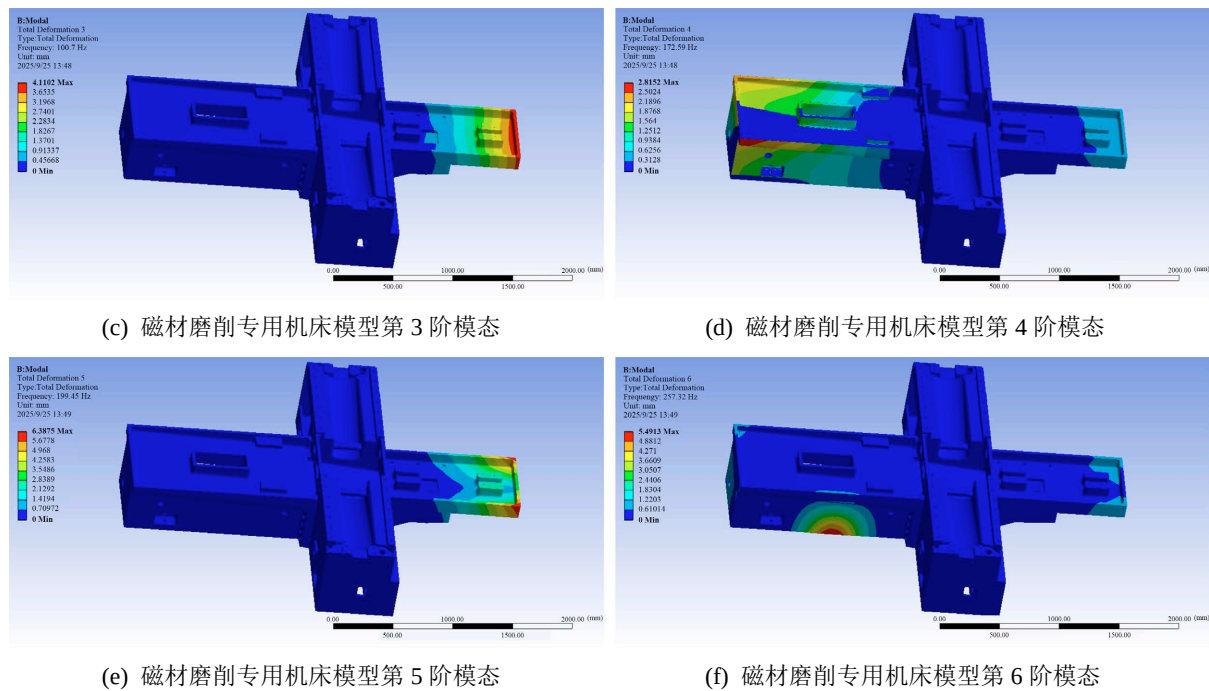


Figure 8. Modal analysis results of magnetic grinding special machine tool under standard operating condition
图 8. 磁材磨削专用机床标准工况下模态分析结果

前六阶振型特征分析表明，第 1 至 3 阶主要为 Z 方向的平动振型，这可能机床在 Z 轴方向的刚度相对较弱有关；第 4 至 5 阶为绕 Y 轴的旋转振型，这可能与送料悬架在振幅加大过程中支撑能力较低有关；第 6 阶主要为 X 方向的平动振型。根据模态分析结果，最低固有频率为 68.322 Hz。考虑到磨削主轴的工作转速范围，需要避免激振频率与固有频率重合，通过合理选择工作转速，可以有效避免共振现象的发生。

5.2. 对比分析

进一步研究预紧力的影响，对不同预紧力条件下的固有频率进行了对比分析，结果如表 1 所示。

Table 1. The first six natural frequencies of the machine tool under different preloads (Hz)
表 1. 不同预紧力下机床前六阶固有频率(Hz)

预紧力(N)	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
1000	63.2	82.1	94.5	165.3	191.2	248.6
2000	65.8	84.6	97.2	168.2	194.5	251.8
3000	67.1	86.3	98.9	170.1	196.8	254.2
4000	67.8	87.5	99.8	171.5	198.3	255.9
5000	68.3	88.4	100.7	172.6	199.5	257.3
6000	67.6	85.9	98.2	169.2	198.1	255.8

从模态分析结果可以看出，螺栓预紧力对机床固有频率有显著影响。当预紧力从 1000 N 增加到 5000 N 时，第 1 阶固有频率从 63.2 Hz 提升至 68.3 Hz；第 2 阶固有频率从 82.1 Hz 提升至 88.4 Hz；第 3 阶固有频率从 94.5 Hz 提升至 100.7 Hz；第 4 阶固有频率从 165.3 Hz 提升至 172.6 Hz；第 5 阶固有频率从 191.2

Hz 提升至 199.5 Hz；第 6 阶固有频率从 248.6 Hz 提升至 257.3 Hz。但继续增加预紧力至 6000 N 时，频率开始明显减小，表明在一定区间内存在最优预紧力范围。

5.3. 谐响应分析

为评估机床在动态载荷作用下的响应特性，进行了谐响应分析[16][17]。依据 MD7660 型双端面磨床的实际工作载荷特性，并参考砂轮系统不平衡量及驱动电机振动等典型激振源的实测数据，确定了动态激励的参数设置。在主轴位置施加幅值为 500 N、频率范围为 0~300 Hz、方向为 Z 轴竖直方向的正弦激励，以模拟实际磨削过程中由不平衡质量或切削力引起的周期性激励，并分析不同预紧力下整机的频率响应特性，如图 9 所示。

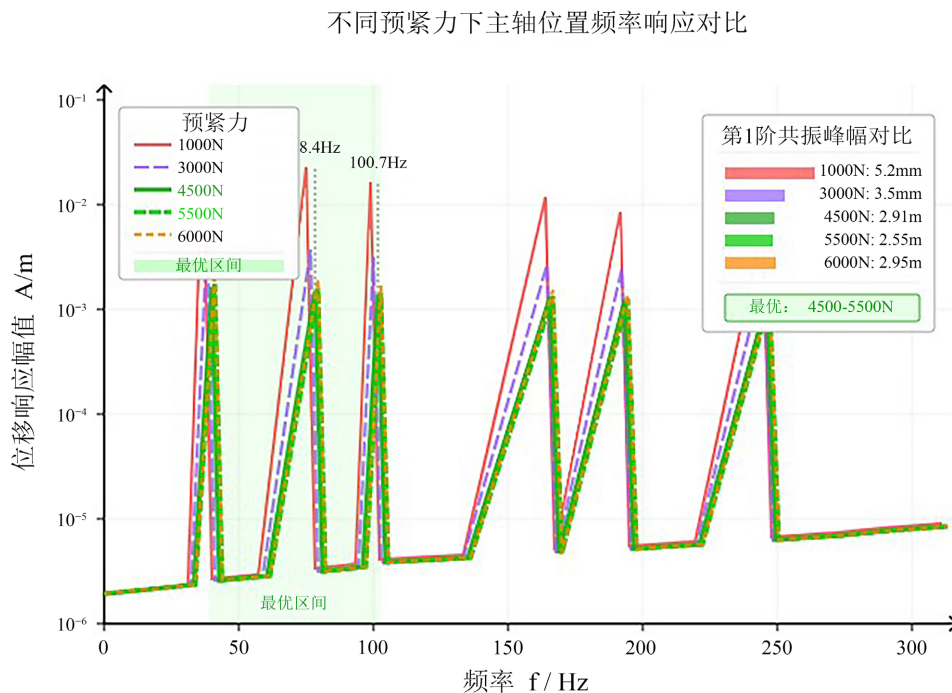


Figure 9. Frequency response curve of main shaft position
图 9. 主轴位置频率响应曲线

谐响应对比分析结果表明：预紧力不足时各共振峰的响应幅值最大，第 1 阶共振峰达到 5.2×10^{-3} m，动态刚度差，易产生振动；随着预紧力增加，响应幅值有所降低，第 1 阶共振峰降至 3.5×10^{-3} m，下降 32.7%，但仍未达到最优状态；预紧力区间在 5000 N 时，响应幅值几乎达到最小且趋于稳定，第 1 阶共振峰降至在 $2.88 \sim 2.91 \times 10^{-3}$ m，相比 1000 N 时降低 44%，动态性能最佳；预紧力增加到 6000 N 时响应幅值回升至 2.95×10^{-3} m，改善效果不明显，反而可能增加结构应力。

从频响曲线的整体趋势可以看出，随着预紧力从 1000 N 增加到 4500 N，共振峰幅值显著降低；在 4500~5500 N 区间内，响应特性达到最优并保持稳定；继续增加预紧力至 6000 N 及以上，改善效果趋于饱和，甚至略有恶化。这一结果与静态分析和模态分析的结论相互印证，进一步确认了 4500~5500 N 为最优预紧力区间。

6. 结论

通过对 MD7660 磁性材料双端面磨床进行有限元分析，研究了螺栓预紧力对机床静动态特性的影响

规律，得出以下结论：

(1) 螺栓预紧力对机床静态变形有显著影响。当预紧力从 1000 N 增加到 5000 N 时，整机最大变形量从 0.153 mm 降低至 0.088 mm，降低了 42.5%，但继续增加预紧力至 6000 N 时，变形改善效果不明显。

(2) 应力分析表明在 4500~5500 N 范围内，螺栓孔边缘等效应力最小，应力分布最均匀，过大或过小的预紧力都会导致应力集中加剧，影响结构疲劳寿命。

(3) 连接面接触刚度随预紧力增加而上升，接触刚度从 2.1×10^7 N/m 提升至 8.9×10^7 N/m，增幅达 305%，但增长率在 5500 N 预紧力以后开始逐渐降低，呈现边际效应递减规律。

(4) 适当的预紧力能有效提高机床固有频率，在 5000 N 预紧力时，前六阶固有频率分别为 68.3 Hz、88.4 Hz、100.7 Hz、172.6 Hz、199.5 Hz 和 257.3 Hz。

(5) 综合考虑静态变形、应力分布、接触特性和动态性能，确定 MD7660 磁性材料双端面磨床的最优螺栓预紧力区间为 4500~5500 N。在此区间内，机床具有最佳的综合性能，既保证了足够的结构刚度，又避免了过大应力集中。

(6) 本研究结论适用于结构类似的双端面磨床，尤其在磁性材料精密磨削工况下具有参考价值，可为装配工艺优化提供理论依据。但螺栓连接中的摩擦、塑性变形等非线性因素未进行实验验证，预紧力优化尚未考虑温度变化和装备长期服役后的松弛效应，后续将结合实验测试进一步验证仿真结果，并进行多物理场耦合分析，以提升模型的工程适用性。

7. 结束语

本文研究了螺栓预紧力对 MD7660 磁性材料双端面磨床静动态特性的影响规律。通过 ANSYS Workbench 有限元分析，揭示了预紧力与机床变形、应力分布、固有频率及振动响应之间的联系，并确定了 4500~5500 N 的最优预紧力区间。研究表明，在该区间内机床的静态变形最小、应力分布最均匀、动态刚度最优。这不仅为磁材磨削专用机床的装配工艺优化提供了理论指导，还为提升设备加工精度和运行稳定性提供了可靠的技术支撑，对磁性材料的高精度加工制造具有重要意义。

基金项目

“科创甬江 2035”关键技术(2024Z164)。

参考文献

- [1] 张英建, 李军, 马晓辉, 等. 中国钕铁硼市场发展现状及未来发展趋势分析[J]. 金属功能材料, 2022, 29(1): 67-77+84.
- [2] 卓张志. 铁氧体磁性材料超声振动铣磨机理及表面完整性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 孙颖, 郭欢, 韩思远, 等. 铁氧体磁性材料在智能设备上的应用现状及发展[J]. 金属功能材料, 2024, 31(6): 212-218.
- [4] 何志强. 立轴双端面磨床床身设计与分析[J]. 机械工程师, 2011(4): 59-61.
- [5] 沈明旭, 李冲. 板栗去皮机的建模与有限元分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 1637-1647.
- [6] Thompson, R., Davis, A. and Wilson, P. (2023) Coupled Analysis of Multi-Bolt Connections in Machine Structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, **215**, 103-115.
- [7] 米洁. 高精度立式磨床关键结合面动态特性研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(2): 224-228.
- [8] 刘鹏, 赵亮, 王峰. 螺栓连接刚度对机床动态特性的影响研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 156-163.
- [9] Chen, W., Liu, Z. and Yang, X. (2023) Nonlinear Effects of Bolt Preload on Joint Stiffness: A Finite Element Study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **185**, 109-124.
- [10] 姚峻. 近年来双端面磨床的发展综述[J]. 精密制造与自动化, 2012(1): 8-12.

-
- [11] 杨晓东, 陈强, 李波. 预紧力对螺栓连接疲劳寿命的影响分析[J]. 机械强度, 2023, 45(1): 89-96.
 - [12] 王豪, 黄为彬, 方兵. 考虑结合面特性影响的机床整体有限元静力学分析模型[J]. 机电工程, 2024, 41(4): 732-738.
 - [13] 李志刚, 曾凡洋, 李泽亮, 等. APS46-1 排刀式数控车床静动态特性分析及拓扑结构优化[J]. 机电工程技术, 2023, 52(5): 122-127.
 - [14] 余新, 蒋强. 一体化数控机床结构设计及研发模式研究[J]. 南方农机, 2023, 54(13): 143-145.
 - [15] 段颖. 数控改造机床床身有限元分析及结构优化设计[J]. 工程技术研究, 2021, 6(8): 129-131.
 - [16] 董沁河. 基于 ANSYS Workbench 的电机机座有限元分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5633-5641.
 - [17] 林志航, 顾崇銓, 丁先魁. 双端面磨削加工精度的研究[J]. 机床, 1983(12): 12-15.