

# 双主轴数控机床工作台动静强度分析

姜欣怡<sup>1</sup>, 杨郡守<sup>2</sup>, 林晓亮<sup>2</sup>, 汪志能<sup>2</sup>, 余良斌<sup>3</sup>, 吴弘毅<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>长春电子科技学院机电工程学院, 吉林 长春

<sup>2</sup>衢州学院浙江省空气动力装备技术重点实验室, 浙江 衢州

<sup>3</sup>浙江精尚数控科技有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2024年7月10日; 录用日期: 2024年8月5日; 发布日期: 2024年8月13日

## 摘要

双主轴数控机床是一种具有两个独立的加工主轴的先进数控机床。本文以某机床厂研发的G650双主轴数控机床工作台为研究对象, 采用CAD软件建立了其三维模型, 并采用有限元法及其软件对工作台进行了静力学分析和模态分析, 研究了工作台在铣削加工状态下的静力学特性和约束状态下的模态特性。通过分析结果可知, 工作台的最大形变约2.30  $\mu\text{m}$ 、最大应力约9.78 MPa, 前四阶固有频率分别为952.86 Hz、1003.30 Hz、1360.60 Hz、1428.90 Hz。分析结果表明了该工作台能确保待加工零件的加工精度和定位精度, 为后续的优化设计工作奠定了基础。

## 关键词

双主轴数控机床, 工作台, 有限元分析, 静力学分析, 约束模态分析

# Dynamic and Static Strength Analysis of Double Spindle CNC Machine Tool Worktable

Xinyi Jiang<sup>1</sup>, Junshou Yang<sup>2</sup>, Xiaoliang Lin<sup>2</sup>, Zhineng Wang<sup>2</sup>, Liangbin Yu<sup>3</sup>, Hongyi Wu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Electromechanic Engineering College, Changchun College of Electronic Technology, Changchun Jilin

<sup>2</sup>Key Laboratory of Air-Driven Equipment Technology of Zhejiang Province, Quzhou University, Quzhou Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Jingshang CNC Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 13<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 姜欣怡, 杨郡守, 林晓亮, 汪志能, 余良斌, 吴弘毅. 双主轴数控机床工作台动静强度分析[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(4): 305-312. DOI: 10.12677/met.2024.134035

## Abstract

Double spindle CNC machine tool is an advanced CNC machine tool with two independent machining spindles. This paper takes the table of G650 double spindle CNC machine tool developed by a machine tool factory as the research object, establishes its three-dimensional model by using CAD software, and carries out static analysis and modal analysis of the table by using the finite element method and its software to study the static characteristics of the table in the milling machining state and the modal characteristics of the constrained state. It was found that the maximum deformation of the panel was approximately 2.30  $\mu\text{m}$ , the maximum stress was approximately 9.78 MPa and the first four eigenfrequencies were 952.86 Hz, 1003.30 Hz, 1360.60 Hz and 1428.90 Hz. The analysis results show that the table can ensure the machining accuracy and positioning accuracy of the parts to be machined, which lays the foundation for the subsequent optimisation design work.

## Keywords

Double Spindle CNC Machine Tool, Worktable, Finite Element Analysis, Static Analysis, Constrained 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. 前言

作为制造业的“母机”，数控机床具有高性能、高效化及精密化等特点[1]，是实现国家现代化和制造业现代化的基础装备之一[2]。目前，数控机床的制造技术发展方向主要为：高精度、高效率、智能化和绿色制造等[3]。在此发展要求下，对于数控机床本体而言，影响其加工精度[4]的主要因素包括机床结构热变形[5] [6] [7]、零部件的加工装配精度、机床几何变形、刀具磨损变形等。

随着科技和工业的快速发展，机床的精度和效率要求越来越高，双主轴数控机床作为一种先进的加工设备应运而生。双主轴机床在设计上通常会采用高精度的定位系统和伺服驱动技术，确保两个主轴同步或协调工作，有利于提高产品的加工精度及批次间的一致性。因此，对于双主轴数控机床的研究不仅有助于提升我国制造业的整体竞争力，还能推动相关领域的科技创新和产业升级。同时，双主轴数控机床的研究也是响应“中国制造 2025”等国家级战略的重要体现。

作为双主轴数控机床基础结构的重要组成，工作台在机床运行过程中具有重要作用。工作台不仅起到了承担加工工件的作用，还通过丝杠螺母和进给系统连接。因此，工作台的动静态性能会直接影响待加工工件的定位精度和机床的加工精度[8] [9] [10]；并且工作台会影响进给系统的工作性能[11]，从而对机床整体性能产生干扰。目前，国内外学者对于工作台动静态特性的研究开展了大量的研究工作，例如，张松伟[12]基于数字孪生技术对机床工作台的进给系统进行了机械故障诊断研究；王信等[13]基于有限元法对机床工作台开展了轻量化设计；李信言[14]采用迭代学习控制算法对数控机床的电液工作台进行了进给运动研究；薛文虎[15]基于振动信号对数控机床工作台的进给系统开展了故障诊断研究；陈丁等[16]对立式加工中心工作台进行了计算及模态分析，并对其开展了拓扑优化研究。

本文基于有限元法,针对某机床公司研发的双主轴数控机床,结合虚拟样机基础建立起工作台三位数字化虚拟模型,然后采用 ANSYS Workbench 对其进行静、动态特性分析以获取相应的特性,为工作台乃至整机性能提升打下基础。

## 2. 分析模型建立

### 2.1. 工作台三维 CAD 模型的建立

如图 1 所示为某机床厂研制的双主轴数控机床,本文以其工作台为对象开展研究工作。从图中可见,该机床主要由主轴、滑座、磁吸夹具、立柱、横梁、工作台等部件组成。在对工作台进行仿真分析前,首先在 CAD 建模软件中建立铣床工作台的三维模型,随后将其转换成中间格式,导入到 ANSYS Workbench 中,加载相应的边界条件后进行有限元分析计算,以获得动静特性。

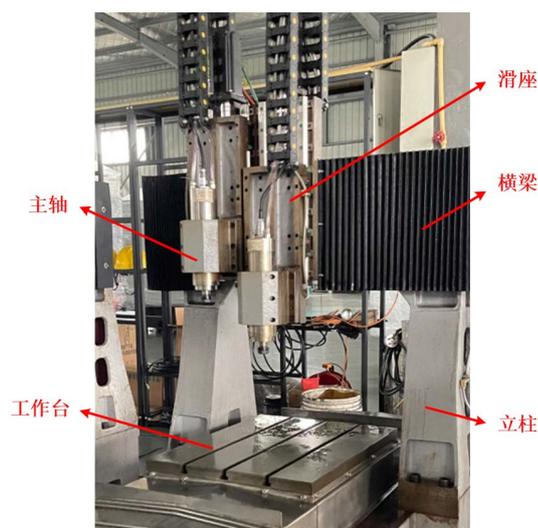


Figure 1. Double spindle CNC machine tool  
图 1. 双主轴数控机床实物图

在仿真分析前,需要对工作台中的小孔、圆角、倒角等对分析结果影响较小特征进行适当合理的简化,以实现对工作台进行更为高效地有限元分析,从而更快地获取工作台的动态和静态特性,简化后模型如图 2 所示。

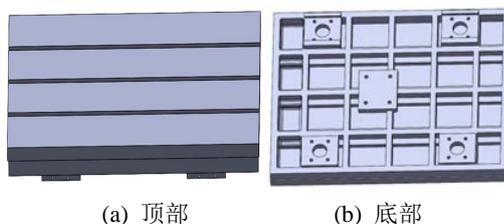


Figure 2. Model diagram of dual spindle CNC machine tool workbench  
图 2. 双主轴数控机床工作台模型图

在分析前,需要先设定模型的材料性质。本研究工作台的材料为 HT300,其属性如表 1 所示。

**Table 1.** Workbench material property table**表 1.** 工作台材料属性表

| 材料    | 密度                     | 杨氏模量    | 泊松比 |
|-------|------------------------|---------|-----|
| HT300 | 7200 kg/m <sup>3</sup> | 113 GPa | 0.3 |

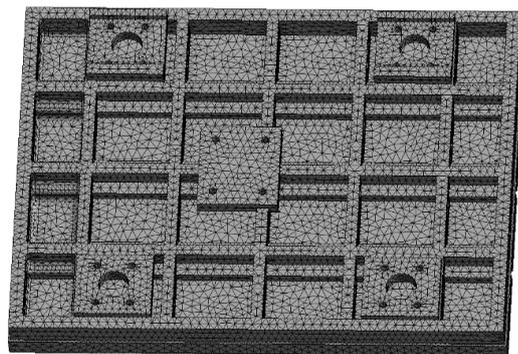
## 2.2. 有限元模型网格的划分

在进行有限元分析之前，需要对简化后的工作台模型进行网格划分。网格划分的质量对有限元分析的结果会产生较大影响。若网格数量过少，可能会导致计算精度不高、仿真结果与实际结果存在较大的偏差。若网格数量过多，则会降低计算效率。因此，在进行网格划分时，需要根据工作台模型的特征和计算需求进行合理的划分。

工作台模型网格划分相关参数如表 2 所示，网格划分后的模型如图 3 所示。

**Table 2.** Workbench grid division statistics table**表 2.** 工作台网格划分统计表

| 网格种类 | 网格尺寸 | 单元数     | 节点数     |
|------|------|---------|---------|
| 四面体  | 6 mm | 115 903 | 201 759 |

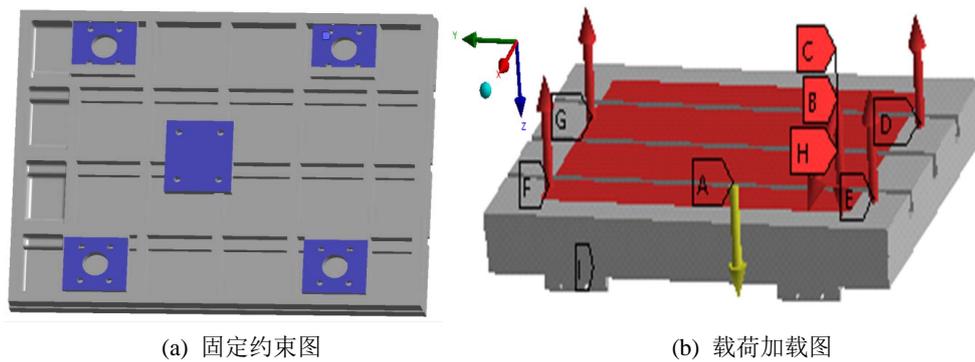
**Figure 3.** Workbench grid division diagram**图 3.** 工作台网格划分图

## 3. 静力学分析

对于双主轴机床而言，工作台过大的形变以及过度的应力集中会导致机床加工精度以及使用寿命的下降。通过静态结构分析可以得到工作台的形变和应力的数值，这是评价工作台能否满足工作要求的重要指标。

### 3.1. 边界条件

工作台是由进给系统控制运动的关键部件。工作台的螺母座和导轨分别与滚珠丝杆和床身相连。为了确保工作台在运动过程中的正常工作，并满足加工要求，需要合理考虑和布置约束的位置。本文分析中采用的固定约束，主要设置在工作台与螺母座接触的面以及四个导轨面上，如图 4(a)所示。在工作台与螺母座接触的面上设置的是水平方向的固定约束，防止工作台发生水平方向的滑动；导轨上设置的是垂直方向上的固定约束，确保工作台在垂直方向上的稳定性。通过这些约束，工作台可以保持相对位置的稳定，并充分利用导轨系统的刚性实现工作台的精准运动。



**Figure 4.** Boundary conditions of the workbench  
**图 4.** 工作台的边界条件

为了确保研究分析结果的有效性,在计算载荷时考虑了极限工况和常用工况,本文主要是考虑了磁吸式夹具和工作台自重、安装预紧力以及双主轴机床加工时的切削力。磁吸式夹具的质量约为 117 kg,将夹具对工作台的重力作为平均分布在两者接触面上的压力来施加。在使用压板固定工作台与夹具时,根据 T 型槽尺寸常选用 M14 螺栓连接副进行连接,根据经验添加 125 N 的预紧力,且该预紧力在许用范围,因此在装夹时单个 M14 螺栓施加给工作台的力可以近似为 125 N。

在机床加工时,工件和刀具之间会产生切削力。由于利用了磁吸式夹具将工件和工作台通过固定约束连接在一起,根据静力学方程,可以近似的把切削力和反作用力看成磁吸式夹具对工作台的力,即  $F_e$ 。为了方便计算,把  $F_e$  视作 x 轴、y 轴、z 轴三个方向的分力,即  $F_x, F_y, F_z$ 。计算切削力的经验公式[17]如下:

$$F_e = 9.81 \times 789.3 \times a_e^{1.1} f_r^{0.75} a_p Z d^{-1.3} n^{-0.2} \quad (1)$$

$$F_x = (0.5 \sim 0.55) F_e \quad (2)$$

$$F_y = (0.3 \sim 0.4) F_e \quad (3)$$

$$F_z = \sqrt{F_e^2 - F_x^2 - F_y^2} \quad (4)$$

式中:  $a_e$  为被加工表面宽度;  $f_r$  为每齿进给量;  $a_p$  为切削层深度;  $Z$  为铣刀齿数;  $d$  为铣刀直径;  $n$  为铣刀转速。

在进行切削力计算时,选择  $\phi 50$  硬质合金盘铣刀,该刀具的齿数为 4 齿,加工时常用主轴转速为 1000 r/min,进给量约为 0.3 mm/齿,切削宽度为 40 mm,切削深度为 3 mm。将上述数据带入到公式(1)中,计算得到切削力:  $F_e = 3384.8\text{N}$ 。将  $F_e$  的计算结果代入公式(2)~(4)后计算 x, y, z 三个方向的切削分力分别为,  $F_x = 1692.4\text{N}$ ,  $F_y = 1015.4\text{N}$ ,  $F_z = 2749.8\text{N}$ 。

对于双主轴数控机床,采用双主轴同步加工,故施加在 x 轴、y 轴、z 轴三个方向的力是计算结果的两倍,同时考虑工作台自身重力影响,最终的工作台载荷加载如图 4(b)所示。

## 3.2. 仿真结果分析

### 3.2.1. 工作台形变分析

如图 5 所示,为工作台的形变云图。根据图中显示的结果,可知最大形变出现在 A、B 两个区域,最大形变量约为 2.30  $\mu\text{m}$ ,而平均形变量约为 0.91  $\mu\text{m}$ 。上述结果是载荷均布在工作台与夹具的接触面上计算得出的。

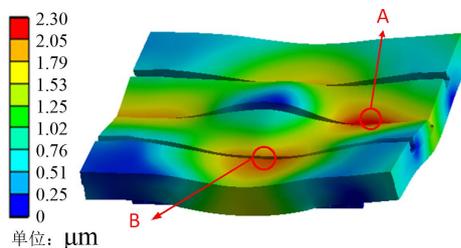


Figure 5. Worktable deformation contour map  
图 5. 工作台形变云图

### 3.2.2. 工作台应力分析

工作台的应力云图如图 6 所示。由图可得出应力的分布情况，即最大应力约为 9.78 MPa，平均应力约为 0.27 MPa，最大应力值小于材料的许用应力，满足使用要求；应力的最大位置如图 P 处，即在筋板与导轨面连接的区域附近。形状截面的改变，容易产生应力集中，过大的应力集中会导致工作台的局部损坏，影响使用寿命和工作精度。

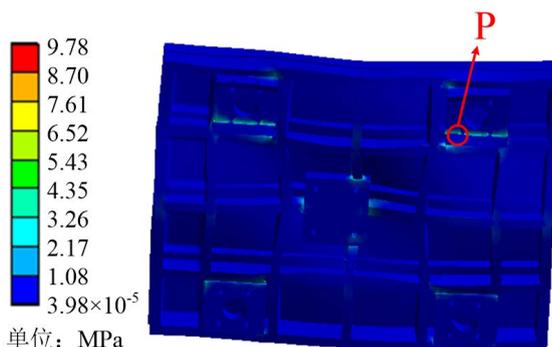


Figure 6. Stress distribution contour map of workbench  
图 6. 工作台应力分布云图

## 4. 模态分析

模态分析是求解多自由度系统的模态振型及振动频率的过程，可简单地分为自由模态分析和约束模态分析。双主轴数控机床工况分析表明工作台在工作期间受到床身和进给系统的约束，因此在进行模态分析时选择约束模态分析。

### 4.1. 模态分析的意义

在机床的运行过程中，如果工作台的固有频率与外部激振接近或相同，就会产生共振现象。共振会引起工作台振动幅度的增加，影响加工的稳定性和精度。通过模态分析，能够得到工作台的各阶振型和对应的固有频率。借助固有频率可以确定容易引起共振现象的外部激励频率范围，从而采取相应的措施来避免或减轻共振的发生。

### 4.2. 工作台的模态分析

本文所采用的方法是约束模态分析，在分析过程中，考虑工作台实际使用情况，在其与螺母座的接触面和四个导轨面上施加固定约束条件，求解在此情况下工作台的固有频率。由于结构的固有频率越低，越容易被外界激励起来，因此本文选取工作台的前 4 阶固有频率和振型进行分析。通过有限元法分析获

取前四阶结果如表 3 和图 7 所示。

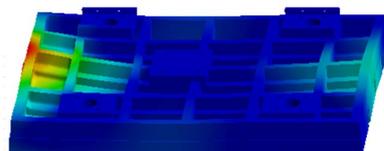
**Table 3.** Modal analysis results of workbench

**表 3.** 工作台模态振型分析结果

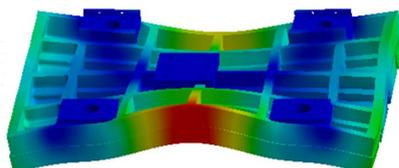
| 阶次 | 固有频率/Hz | 振型描述         |
|----|---------|--------------|
| 1  | 952.86  | 右端向上振动       |
| 2  | 1003.10 | 左端向上振动       |
| 3  | 1360.60 | 中下部上翘，两端轻微扭转 |
| 4  | 1428.90 | 中上部上翘，两端轻微扭转 |



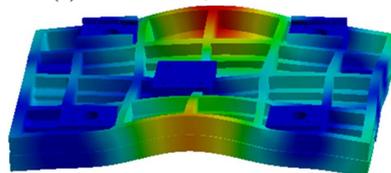
(a) 1st 固有频率: 952.86 Hz



(b) 2nd 固有频率: 1003.30 Hz



(c) 3rd 固有频率: 1360.60 Hz



(d) 4th 固有频率: 1428.90 Hz

**Figure 7.** 4th order vibration mode diagram in front of the workbench

**图 7.** 工作台前 4 阶振型图

低阶的频率在加工的过程中会和振动源产生共振现象，进而降低工件的加工精度和加工效率。工作台主要外部振动激励来源为电机，而电机的工作频率远小于工作台的前四阶固有频率，因此本文中的双主轴数控机床在工作过程中不容易产生共振，具有良好的动态特性。

## 5. 结束语

为了校验某机床厂研发的 G650 双主轴数控机床的动静态性能，本文对工作台进行了静力学分析和模态分析，研究了工作台在铣削加工状态下的静力学特性和约束状态下的模态特性。通过研究可以得出该工作台的动静态特性：最大形变量约为 2.30  $\mu\text{m}$ 、平均形变量约为 0.91  $\mu\text{m}$ 、前四阶固有频率分别为 952.86 Hz、1003.30 Hz、1360.60 Hz、1428.90 Hz，其能够满足双主轴机床的工作要求，模态特性也能有效避免共振的产生。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(52175472、62302263); 浙江省自然科学基金项目(LGG22E050031、LD24E050011、ZCLTGS24E0601)。

## 参考文献

- [1] 刘强. 数控机床发展历程及未来趋势[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 757-770.
- [2] 杨兆军, 何佳龙, 刘志峰, 等. 数控机床可靠性技术新进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 152-163.
- [3] 梁迎春, 陈国达, 孙雅洲, 等. 超精密机床研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(5): 28-39.
- [4] 傅建中, 姚鑫骅, 贺永, 等. 数控机床热误差补偿技术的发展状况[J]. 航空制造技术, 2010(4): 64-66.
- [5] 邓小雷, 林欢, 王建臣, 等. 机床主轴热设计研究综述[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1415-1429.
- [6] Wei, X., Feng, X., Miao, E., Qian, M. and Pan, Q. (2022) Sub-Regional Thermal Error Compensation Modeling for CNC Machine Tool Worktables. *Precision Engineering*, **73**, 313-325. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.10.007>
- [7] 吕学祜, 郭前建, 王昊天, 等. 数控机床误差补偿关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 104-111, 119.
- [8] Ibaraki, S., Yoshida, I. and Asano, T. (2019) A Machining Test to Identify Rotary Axis Geometric Errors on a Five-Axis Machine Tool with a Swiveling Rotary Table for Turning Operations. *Precision Engineering*, **55**, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.08.003>
- [9] Wei, X., Miao, E., Liu, H., Liu, S. and Chen, S. (2018) Two-Dimensional Thermal Error Compensation Modeling for Worktable of CNC Machine Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 501-509. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2918-5>
- [10] Wang, X., Liu, B., Mei, X., Yun, X., Li, X., Li, Q., et al. (2021) Genetic Algorithm for Dynamic Parameters Estimation of the Machine Tool Worktable Using the Residual Vibration Signal. *Journal of Vibration and Control*, **28**, 1433-1440. <https://doi.org/10.1177/1077546321993579>
- [11] Zhang, H., Liu, H., Du, C., Lv, D., Zhang, J. and Zhao, W. (2018) Dynamics Analysis of a Slender Ball-Screw Feed System Considering the Changes of the Worktable Position. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **233**, 2685-2695. <https://doi.org/10.1177/0954406218799781>
- [12] 张松伟. 基于数字孪生的数控机床工作台进给系统机械故障诊断研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [13] 王信, 王用, 沈涛. 基于有限元分析的机床工作台轻量化设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(1): 76-77, 80.
- [14] 李信言. 基于迭代学习控制的电液机床工作台控制方法研究[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(8): 39-43.
- [15] 薛文虎. 基于振动信号的数控机床工作台进给系统机械故障诊断研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [16] 陈丁, 康献民, 余为洲. 机床工作台模态分析及拓扑优化[J]. 机械工程师, 2020(2): 23-25.
- [17] 刘献礼, 陈涛. 机械制造中的低碳制造理论与技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 1-8.