第 45 卷第 5 期
Vol. 45 No. 5 2024

青岛理工大学学报
Journal of Qingdao University of Technology

三轴微磨床的研制与龙门选型分析

刘之恒[1]，王德祥[1,2,*]，崔金磊[1]，白鲁彪[1]
（1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院，青岛 266525；2. 山东智连共同体轴承科技有限公司，聊城 252664）

摘　要：由于零件小型化的迫切要求，对超精密微型磨床的需求与日俱增。机床振动是影响微磨削加工精度及表面粗糙度的主要问题之一。为了减少机床振动，利用 Ansys Workbench 对 4 种龙门结构进行有限元分析，选取了 1 种最优方案作为微磨床龙门结构，并对 5 种常用龙门材料进行了有限元分析，最终选取天然花岗岩作为龙门和隔振台材料。根据有限元分析结果设计了微磨床的整机结构，并对整机结构进行了静力学、模态和谐响应分析，验证了所设计微磨床总体方案的合理性。根据设计分析结果，研制了微磨床实验样机，其运动平台能实现三轴联动及微米级运动精度，电主轴转速最高能达到 80 000 r/min。

关键词：微磨削；微磨床；有限元分析；龙门结构
中图分类号：TG584；TH16　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-4602(2024)05-0104-09

Development of a three-axis micro grinding machine and gantry selection analysis

LIU Zhiheng[1], WANG Dexiang[1,2,*], CUI Jinlei[1], BAI Lubiao[1]
(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Shandong Zhilian Community Bearing Technology Co., Liaocheng 252664, China)

Abstract: The demand for ultra-precision micro grinding machines is increasing day by day due to the urgent need for the miniaturization of parts. Machine tool vibration is one of the main problems affecting the machining accuracy and surface roughness of micro grinding. In order to reduce the vibration of machine tool, Ansys Workbench was used to carry out finite element analysis of four types of gantry structures, and an optimal solution was selected as the gantry structure of the micro grinder. Finite element analysis was further carried out on five commonly used gantry materials, and natural granite was finally selected as the gantry and vibration isolation table material. Based on the results of finite element analysis, the complete structure of the micro grinder was designed, and the static, modal and harmonic response analyses of the complete structure were carried out to verify the reasonableness of the overall scheme of the designed micro grinder. According to the results of design and analysis, the experimental prototype of micro grinding machine was developed, and its motion platform can realize three-axis linkage and micron-level motion accuracy, and the speed of the electric spindle can reach up to 80 000 r/min.

收稿日期：2023-07-10
基金项目：山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME208)
作者简介：刘之恒(1996—　)，男，安徽宿州人。硕士，研究方向为微磨削加工。E-mail：1092137065@qq.com。
*通信作者：王德祥(1988—　)，男，山东临沂人。博士，副教授，主要从事磨粒加工方面的研究。E-mail：wangdexiang830@126.com。

Key words: micro grinding; micro grinding machine; finite element analysis; gantry structure

微加工技术在光电、汽车、生物技术和航空航天等多个行业都有广泛的应用，可用于制造高精度的小型化零部件。微加工产品需求的不断增长，促进了对高性能、高效超精密机床的需求[1]。微加工不仅对机床的加工精度要求较高，而且还需要较高的主轴转速以达到高速切削的要求，高速切削具有切削力低、热变形小、加工精度高及加工成本低等特点[2]。微磨削是一种适应性强的技术，用于在硬脆材料上生成具有复杂几何特征和表面粗糙度较好的小型化部件[3-4]，常加工的材料有硬质合金、硅、陶瓷、玻璃等。微磨削作为微加工的一种，在加工精度上能达到微米级，可以获得质量更好的表面[5]。

在微型精密机床方面，学者们已经做了许多研究。微小型机床的概念于 1970 年由 DUTTA 等[6]首次提出，但在当时并没有受到重视。随着微小型机床的发展，日本通产省某实验室(MEL)于 1990 年提出微型制造的概念，并在 1996 年研制了世界第一台微型车床[7]，该机床尺寸为 25 mm×30.5 mm×30 mm，质量约为 0.1 kg，主轴转速能达到 10 000 r/min。1999 年，LU 等[8]开发了一台总尺寸为 200 mm，精度为 5 μm 的小型车床，并加工了一些小型轴类零件和螺纹。在微型机床领域，已有学者开始对机床结构开展了设计和优化研究。DAS 等[9]提出了一种高速微细铣削中心无振动机床结构，文翠芳[10]设计了一种教学型微型数控铣床结构，吴金文等[11]研制了一种桌面式微型数控五轴联动机床，此结构稳定性更好。以上研究表明，高速微加工机床的静、动态特性直接影响其加工性能，机床结构的刚度对于机床的加工效率和隔振会产生较大影响。

为了设计能够实现三轴联动且微米级精度的高速微磨床，首先使用 UG 建立了 4 种常见微磨床龙门结构的模型，然后将模型分别导入 Ansys Workbench 软件，对比分析了不同结构方案的静、动态刚度特性，选取了动态特性最优结构作为龙门结构。然后对天然花岗岩、铸铁、低碳钢、不锈钢和铝合金 5 种材料的龙门进行有限元分析，选取了刚度和阻尼特性良好的天然花岗岩作为龙门结构及隔振台材料。最后，对微磨床整机进行建模，并进行有限元分析，验证所设计微磨床总体方案的可行性。

1　微磨床初始结构设计

为了减少微磨床占用的空间，减少机床的整体尺寸，并考虑应用的广泛性以及工件的实际情况，所研发的微磨床采用立式结构[12]。初始设计的微磨床结构如图 1 所示，机床采用三轴联动，总体结构为龙门式，X、Y 轴直线运动平台相互垂直放置在隔振台上，Z 轴运动平台置于龙门结构上，电主轴则安装在 Z 轴上并垂直于 X、Y 轴所在的平面，提供微磨床的主运动。

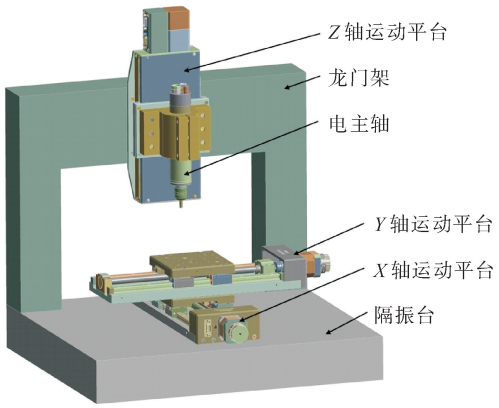


图 1　微磨床初始结构

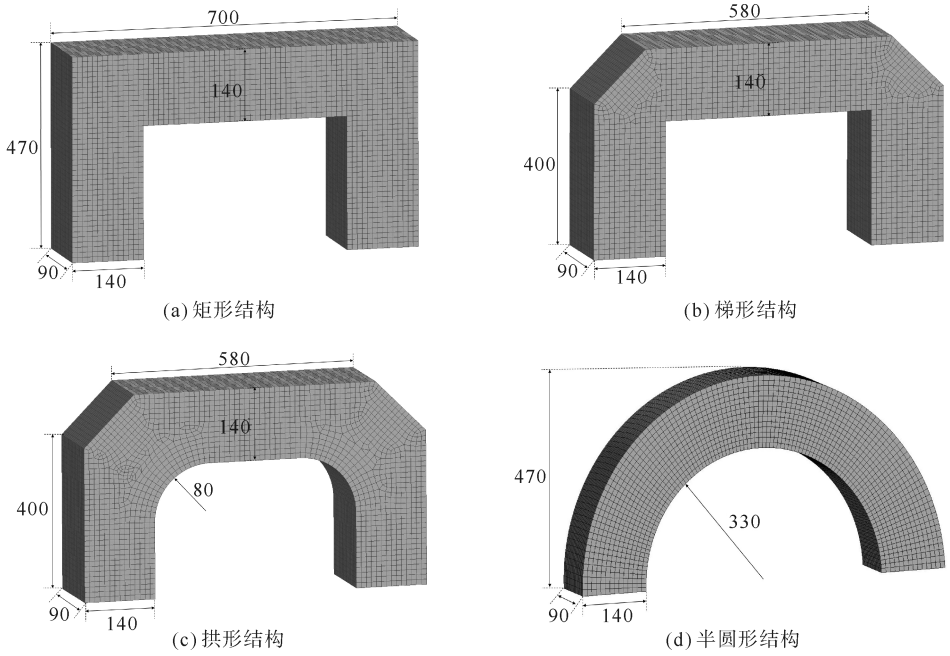
2　龙门结构选型分析

对于机床来说，床身结构不仅为所有机器组件提供支撑和固定作用，而且还对动力学性能有很大影响[1,13]。在微磨床的各组成单元中，龙门结构承载了 Z 轴运动平台、夹具及电主轴的自重，会对微磨床精度产生较大影响。在进行微磨削实验时，因电主轴旋转产生的振动会直接传递给龙门结构，若因振动使龙门结构产生变形，机床的精度会受到很大的影响。因此，设计一种具有良好静、动态特性的龙门结构非常重要。

2.1　4 种常见龙门结构

本文在初始设计阶段提出了 4 种常见龙门结构，通过三维建模软件 UG 建立 4 种结构的模型图。为了使分析结果更加准确，设置了相同的龙门模型尺寸参数。将模型导入 Ansys Workbench 中[14]，在进行分析时，先将龙门材料设置为刚度较好的天然花岗岩，基本材料参数为密度 2900 kg/m^3、泊松比 0.25、弹

性模量 90 GPa，主要以自由划分的方式将网格划分成六面体为主、四面体为辅的有限元网格。设置龙门结构与底板的接触面为固定约束，建立 4 种龙门结构的有限元模型，如图 2 所示。



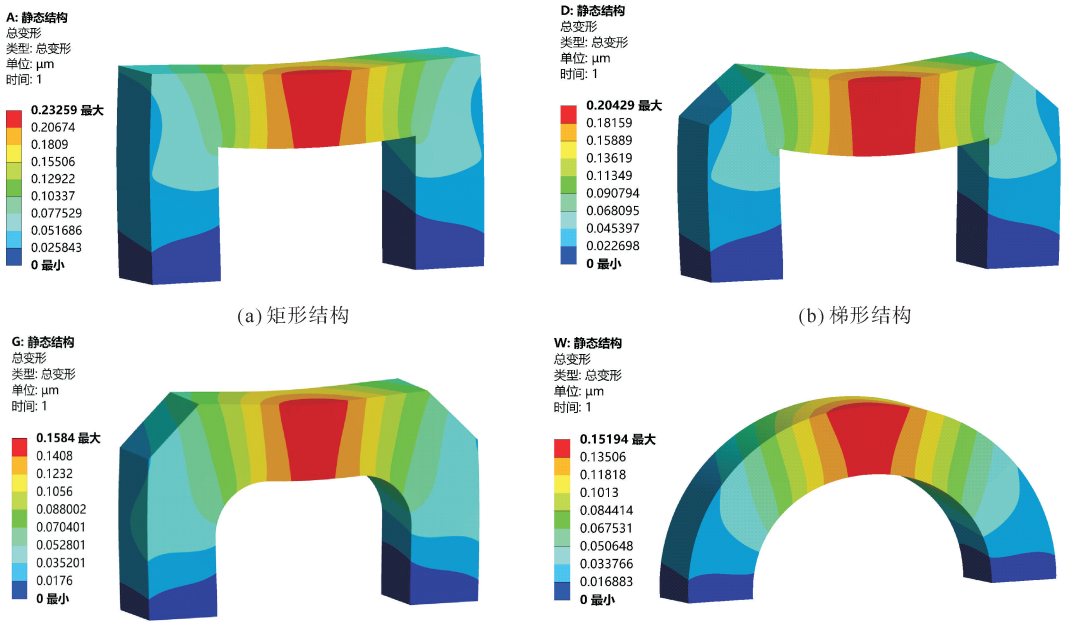
(a) 矩形结构 (b) 梯形结构

(c) 拱形结构 (d) 半圆形结构

图 2 4 种常见龙门结构有限元模型(单位：mm)

2.2 静力学分析

静力学分析可以评估结构的强度，确定结构最脆弱的部分，并做出必要的改变来优化设计。为了计算静态载荷对微磨床龙门结构变形量的影响，分别对 4 种龙门结构进行了静力学分析。由于微磨床龙门中部需要负载竖直运动平台、夹具及电主轴质量，因此在龙门中部外侧施加 80 N 恒力来模拟竖直运动平台、夹具及电主轴部分的自重，并设置龙门结构材料为天然花岗岩，进行静力学分析。通过 Ansys Workbench 分析得到 4 种结构的静力学变形如图 3 所示。



(a) 矩形结构 (b) 梯形结构

(c) 拱形结构 (d) 半圆形结构

图 3 龙门架受载静力学分析

静态分析是为了计算结构在施加稳定载荷作用下的应力和应变状态。4 种龙门结构的自重、受载变形量对比结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，在只考虑重力的情况下，半圆形结构的变形量最小，拱形结构次之；在施加 80 N 负载的情况下，半圆形、拱形结构的变形量较接近且比矩形、梯形结构的小，说明半圆形、拱形结构具有较好的静态特性。从龙门结构受力分析可知，带有圆弧的龙门结构可以将原负载产生的应力沿圆弧切线传向底座，使结构的稳定性得到了提高，因此变形量也较小。

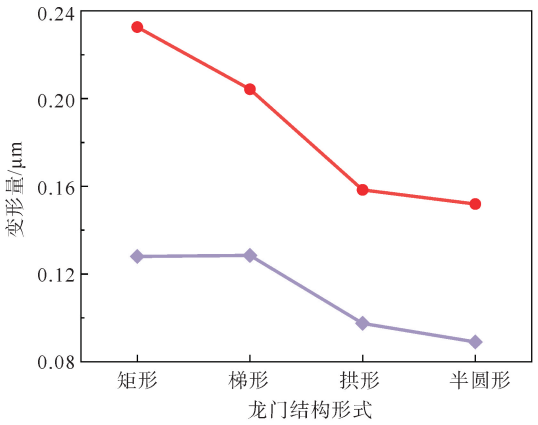


图 4　4种方案静力学分析结果

2.3　模态分析

模态是机械结构的固有振动特性，每个模态都有特定的频率、阻尼比和振型[15]。模态分析是为了确定自由振动时结构的模态形状和频率。利用有限元软件的模态分析模块可以获得龙门结构的各阶频率和振型图，从而评估结构的动态特性。一般情况下，因为低阶频率对结构的影响最大，所以希望获得较高的频率，减少共振的出现，从而使结构具有更好的动态特性[16]。为了获得 4 种龙门构型的低阶频率，将 4 种龙门结构分别导入 Ansys Workbench 中并求解，前 6 阶模态求解结果如图 5 所示。

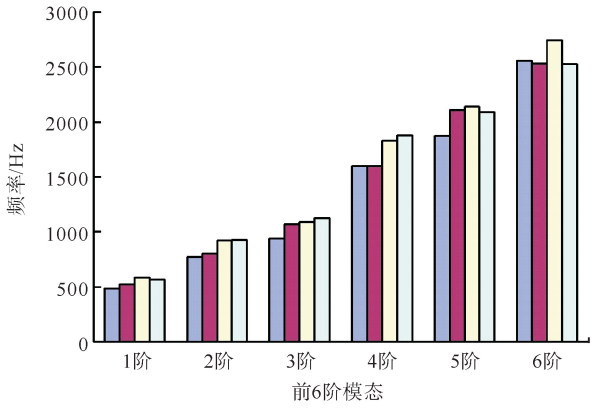


图 5　4 种龙门结构的前6阶频率

从模态分析的前 6 阶频率可以看出，半圆形、拱形结构的频率要大于矩形、梯形结构的，即拱形结构表现出更好的动态特性。综合静力学与模态分析结果，半圆形、拱形结构具有更好的静、动态特性，但就实际加工而言，半圆形结构加工难度更大，对加工工艺的要求更高，故选择拱形结构作为微磨床龙门的结构。拱形结构的前 6 阶振型云图如图 6 所示，从图中可以看出，1 阶振型表现为龙门架上半部分的前后摆动，2 阶振型表现为龙门架的横向摇摆，3 阶振型表现为龙门架的横向扭转，4 阶振型表现为龙门架在竖直方向的摆动，5 阶振型表现为龙门架对称扭动，6 阶振型表现为龙门架横梁的前后扭动。

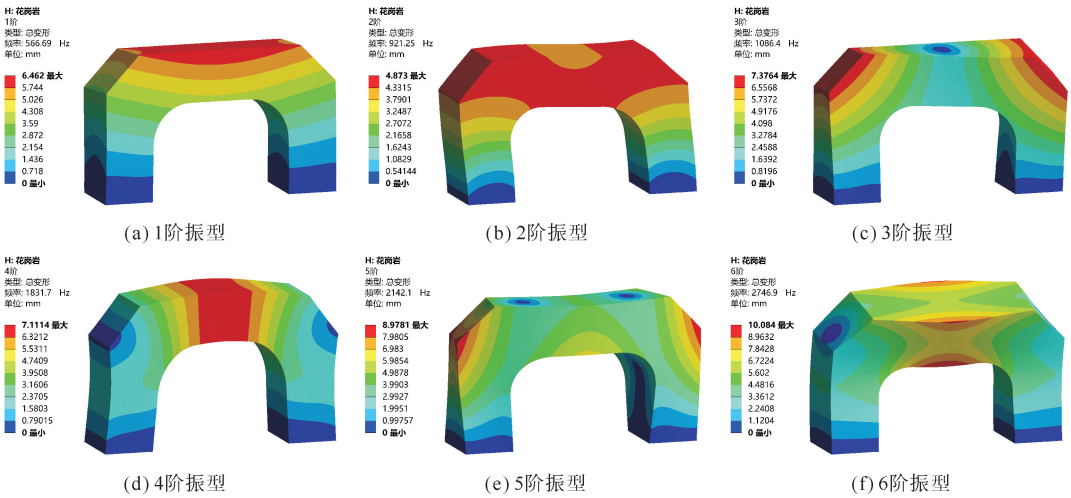


图 6　拱形结构前 6 阶振型

2.4 龙门结构材料选择

对于龙门结构材料而言，具有较高阻尼能力、良好刚度、较低热膨胀系数、较低比热容的材料可被认为是良好的结构材料。此外，在设计过程中还要考虑材料的可制造性。因此，材料的选择对龙门结构静、动态特性有很大影响。一般情况下，金属结构具有较低的阻尼性能[17]。铸铁是常用的机器结构材料之一，其具有较高的阻尼特性和承载能力[18]，但是较高的加工成本和较差的环境性能限制了铸铁在超精密机床结构中的应用[19]。天然花岗岩在刚度、阻尼性能、热稳定性和动态承载能力方面表现出比铸铁更好的性能[20-21]。除此之外，低碳钢、不锈钢、铝合金也可被用作机床机架材料，因此，本文将通过 Ansys Workbench 对不同材料龙门结构的静、动态特性进行分析。表 1 是 5 种材料的基本属性。

表 1 5 种材料的力学性能

材料名称	密度/(kg·m^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比
天然花岗岩	2900	90	0.25
铸铁	7200	120	0.26
低碳钢	7850	210	0.30
不锈钢	8000	193	0.30
铝合金	2800	80	0.33

将拱形龙门结构模型分别赋予 5 种不同材料，进行有限元分析。根据分析结果，对单个龙门结构的性能进行评估。图 7 为不同材料的龙门结构在自重及受载 80 N 情况下的静力学分析结果，图 8 为不同材料龙门结构前 6 阶频率的对比。

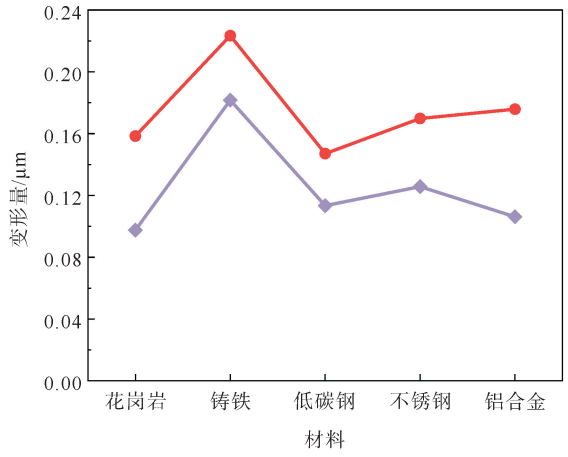


图 7 不同材料龙门结构的变形量

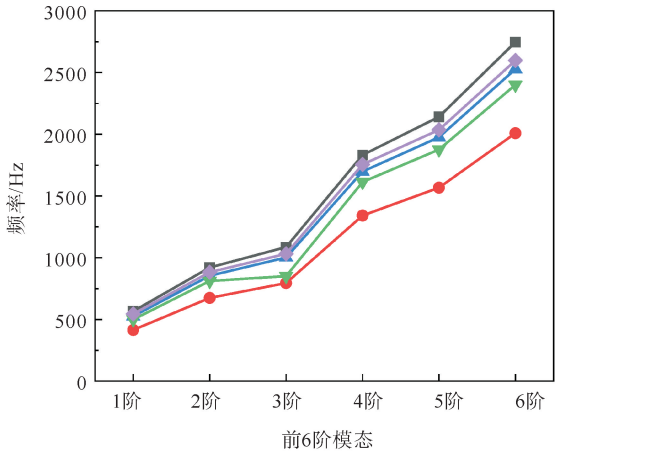


图 8 不同材料龙门结构的前 6 阶频率

从图 7、图 8 分析结果中可以看出，在自重条件下，天然花岗岩材料的龙门结构变形量最小，变形量为 0.097 56 μm；在受载 80 N 的条件下，低碳钢变形量最小，天然花岗岩次之。对于模态分析结果，天然花岗岩的前 6 阶固有频率均高于其他 4 种材料。对龙门结构进行设计时，期望其具有较高的频率，减少微磨床发生共振的概率，使其具有良好的动态刚度[16]。因此，由静力学和模态分析结果可以得出，天然花岗岩材质的龙门结构与电主轴产生的共振更少，且能够实现更高的振动阻尼。为了使微磨床具有更好的静、动态特性，选择天然花岗岩作为龙门结构的材料。

3 微磨床整机有限元分析及搭建

3.1 微磨床整机有限元建模

由于微磨床的结构较为复杂，在有限元仿真过程中，部分较小的机械零件结构可能会在划分有限元网格时产生大量不规则的单元，从而导致计算结果出现偏差。由于主要对其固有频率和振型等特性进行评估，所以对分析结果影响不大的结构进行简化处理，模型简化的基本准则是刚度等效：①去除微磨床中无法提供支撑且不能传递力矩的部件；②将部分工艺特征如圆角、倒角等转换成直角，加快计算速度；③在不

影响计算结果的情况下，适当地简化一些螺纹、槽等特征；④将部分零部件比如电主轴、运动平台等，在质量等效的情况下转化为相同尺寸的实体模型。

网格的划分对有限元分析的结果影响很大，网格太大会使计算结果不准确，网格太小可能难以计算出结果，因此要选择合适的网格尺寸。对于尺寸较大的部件，如底部隔振台，其网格可以划分较大一些；但在需要重点分析的部件上，如龙门结构、运动平台及电主轴等部件，应对网格进行适当细化。将模型导入 Ansys Workbench 中，先对零件进行材料属性设定，选择天然花岗岩作为龙门结构及隔振台材料，选择铝合金作为运动平台、电主轴及夹具的材料。然后对模型进行网格划分，最终网格节点数为 2 750 748，单元数为 653 117，划分网格模型如图 9 所示。

3.2　微磨床整机静力学分析

通过已建立的微磨床有限元模型，将隔振台底部设置为固定约束，将仿真环境设置为重力场，便于直观地观察到机床各个零件及整机变形情况。整机静力学分析结果及变形如图 10 所示。

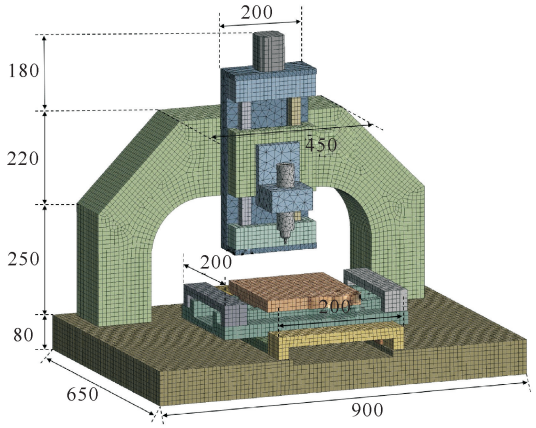


图 9　整机网格划分模型（单位：mm）

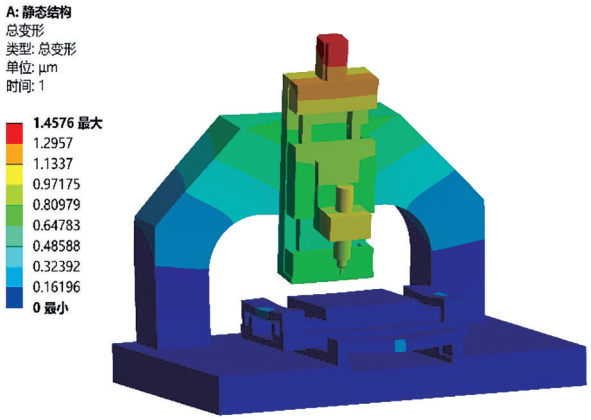


图 10　整机静力学分析

从图 10 中可以看出，微磨床结构的上半部分变形量较大，Z 轴运动平台上半部分变形最大，变形量为 1.457 6 μm，主要是由于此部分重心较高且悬挂在龙门外侧形成了悬臂结构。机床 X、Y 轴运动平台几乎未发生变形，主要由于该部分结构直接安装在隔振台上且重心很低。龙门结构产生了前倾变形，但由于天然花岗岩具有较高的阻尼特性，所以变形较小。由分析结果得出，微磨床整机变形量相对于加工精度造成的影响可以忽略不计。

3.3　微磨床整机模态分析

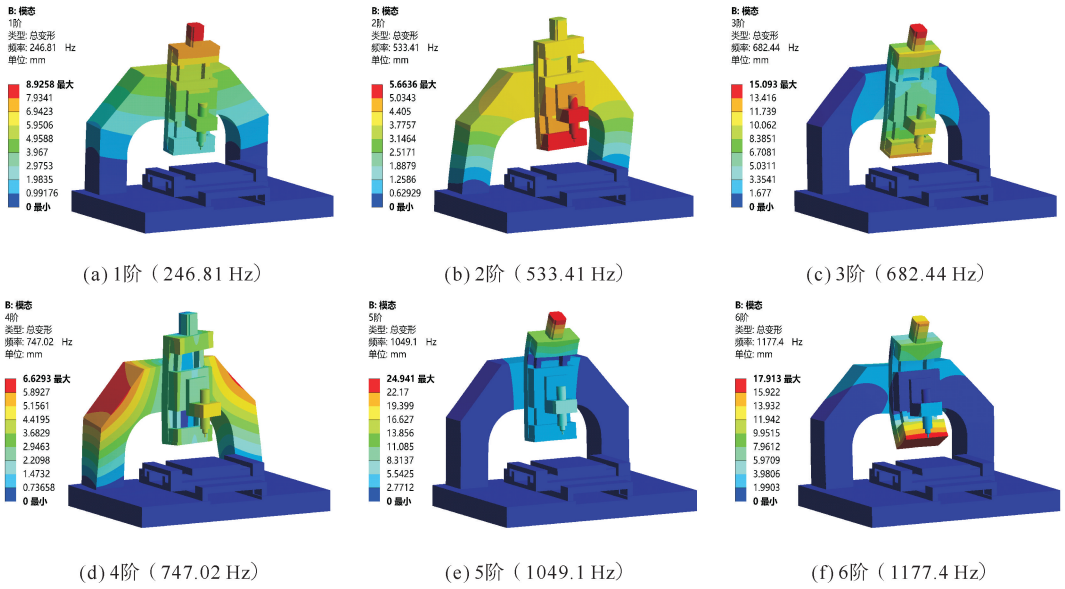
整机模态分析可以确定床身的固有频率和振型，一般情况下，低阶频率对结构的影响最大。在 Ansys Workbench 中将微磨床底部隔振台设置为固定约束，提取前 6 阶振型云图，计算结果如图 11 所示。

模态分析时对隔振台施加了固定约束，所以整机下半部分变形量很小。从数值上看，前 6 阶频率间隔较为合理且没有出现相近的频率。从振型云图得出，1 阶振型的表现形式为龙门结构及 Z 轴运动平台的前后摆动，2 阶振型为龙门结构及 Z 轴运动平台的横向摆动，3 阶振型为 Z 轴运动平台及电主轴的上下振动，4 阶振型为龙门结构整体的左右扭动，5 阶振型为 Z 轴运动平台顶部的前后摆动，6 阶振型为 Z 轴运动平台顶部与底部的前后晃动。从分析结果可以看出，机床前 6 阶模态没有出现同一结构相同的振型，低阶振型并没有引起整体的振动，前 6 阶的振型均与龙门结构及 Z 轴运动平台有关。因此在后续微磨削实验过程中，要注意控制电主轴转速，避免电主轴旋转振动的频段与此频段重合而产生共振。

3.4　微磨床整机谐响应分析

微磨床在进行磨削实验时，微磨棒会受到磨削力的作用。由于外力的作用，微磨床各阶频率和振型也会发生变化，为获得磨床在受到磨削力情况下的动力学响应，需要对整机进行谐响应分析。在微磨棒的 X、Y、Z 方向上施加大小为 5 N、频率 0～3000 Hz 的简谐力对机床进行激振，整机在 3 个方向上的变形如

图 12 所示。



(a) 1阶（246.81 Hz） (b) 2阶（533.41 Hz） (c) 3阶（682.44 Hz）

(d) 4阶（747.02 Hz） (e) 5阶（1049.1 Hz） (f) 6阶（1177.4 Hz）

图 11 整机前 6 阶振型

从图 12 中可以看出，在受到简谐力的情况下，微磨床在 3 个方向上的变形状况不同。当激振频率为 246 Hz 左右时，微磨床在 X、Z 方向的变化较大，可以得出在该频率可能发生了共振，此频率接近模态分析中的 1 阶频率；在激振频率为 510 Hz 附近，微磨床沿 Y 方向的位移变化明显，此频率较接近模态分析中的 2 阶频率；由分析结果可以得出模态分析的固有频率中包含了谐响应分析的共振频率。在激振频率为 246、510、740、1100、1510 Hz 附近时，部分结构沿特定方向的形变位移较大，在后续微磨床搭建及微磨削加工实验时应尽量避开以上 5 个频率，避免因发生共振，导致部分结构发生疲劳破坏。

3.5 微磨床实验样机

整机装配模型及样机如图 13 所示，从整体结构上看，本文设计的微磨床总体尺寸为 900 mm×650 mm×1600 mm，采用天然花岗岩作为龙门结构材料。微磨床在功能上支持相对运动、绝对运动、三轴联动等功能。

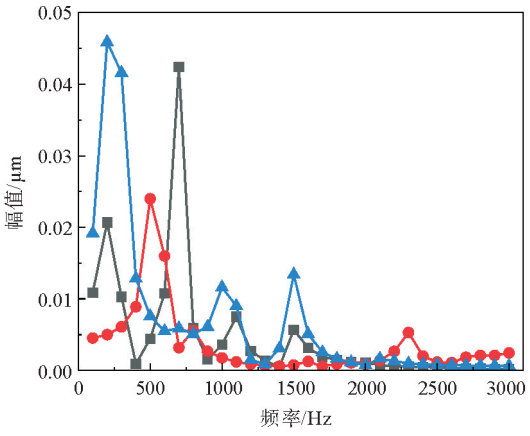
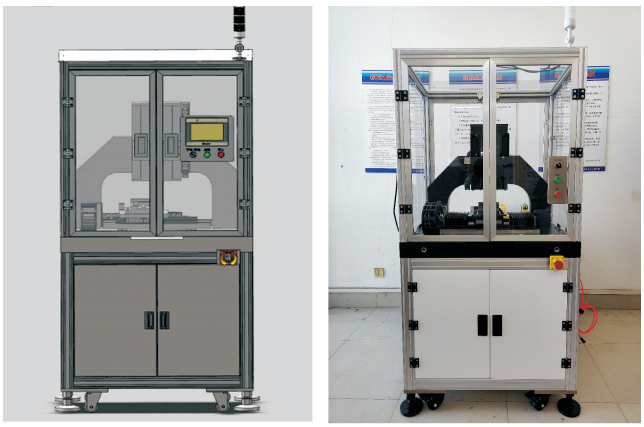


图 12 微磨床 3 个方向的谐响应曲线

X 方向；Y 方向；Z 方向



(a) 整机装配模型 (b) 实验样机

图 13 三轴微磨床整机装配模型及实验样机

微磨床 X、Y 轴运动平台使用的是直线电机驱动滚动导轨的方式，并配置 100 nm 分辨率光栅构成闭环反馈控制；由于 Z 轴运动平台要负载夹具及电主轴的质量，且要具备断电自锁功能，因此使用负载能力较大的伺服电机作为驱动，并配置光栅构成闭环系统。三轴运动平台同时具备防尘、防滴溅功能，详细技术参数如表 2 所示。

电主轴采用的是 NR-3080S，主轴转速范围在 20 000～80 000 r/min，最大功率 350 W，主轴跳动精度 1 μm，可装夹 Φ0.5～4.0 mm 的微磨棒，相对于气动主轴而言，电主轴调速方便且对转速的控制更准确。微磨床实验样机及主要构成如图 14 所示。

表 2　微磨床三轴运动平台技术参数

结构部件	技术参数	技术指标
X、Y 轴运动平台	行程/mm	0～150
	定位精度/μm	≤±2
	重复定位精度/μm	≤±1
	最小速度/(μm·s^{-1})	1
	最大速度/(mm·s^{-1})	200
	最大负载/kg	10
Z 轴运动平台	行程/mm	0～80
	定位精度/μm	≤±3
	重复定位精度/μm	≤±1.5
	最小速度/(μm·s^{-1})	1
	最大速度/(mm·s^{-1})	50
	最大负载/kg	15

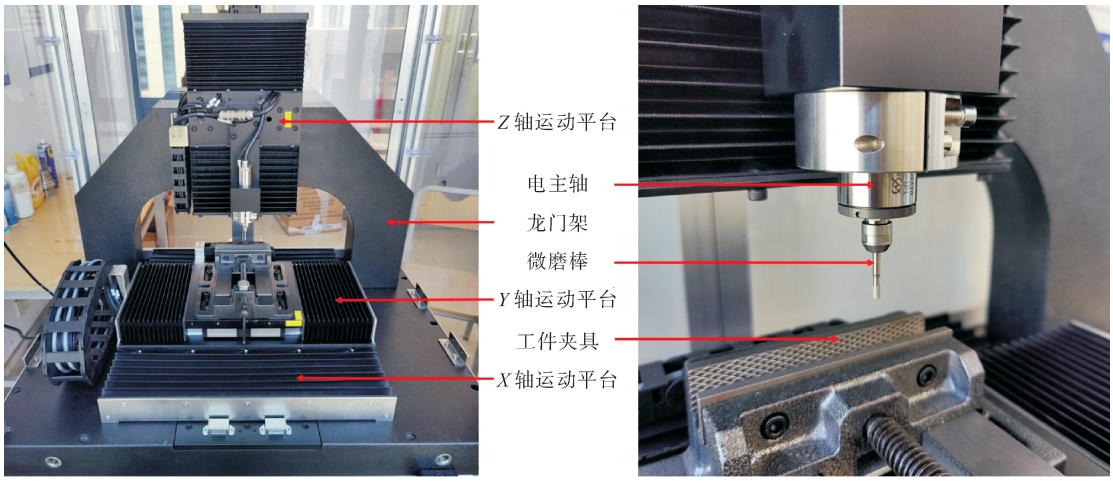


图 14　微磨床实验样机及主要构成

4　结论

从动力学设计和结构优化方面研制了一种用于微磨削的三轴微型机床，得出以下结论：

1）通过有限元分析软件 Ansys Workbench 对矩形、梯形、拱形和半圆形 4 种龙门结构进行了静力学和模态分析，通过比较 4 种结构的静、动态刚度特性，最后选择了拱形方案作为微磨床龙门结构。

2）与铸铁、低碳钢、不锈钢、铝合金相比，天然花岗岩表现出更好的硬度、刚度和阻尼特性。因此，由天然花岗岩制成的龙门结构显示出更好的静、动态特性，减少了机床结构振动。

3）对微磨床模型进行了适当简化，并对整机静、动态特性进行了分析。分析结果表明，整机最大变形量出现在磨床顶部，最大变形量为 1.457 6 μm，满足对精度的设计要求。1 阶频率为 246.81 Hz，低价频率较高且各阶频率间距分布均匀。

4）研制了微磨床实验样机，该微磨床 X、Y、Z 轴运动平台能实现三轴联动及微米级运动精度，高速电主轴转速最高能实现 80 000 r/min。

参考文献(References)：

[1]　HUO D H，CHENG K，WARDLE F. Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine-ultramill：Part 1　Holistic design ap-

proach,design considerations and specifications[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,47(9/10/11/12):867-877.

[2] 李长河,丁玉成,卢秉恒.高速切削加工技术发展与关键技术[J].青岛理工大学学报,2009,30(2):7-16.
LI Changhe,DING Yucheng,LU Bingheng. Development and key technology in high speed cutting[J]. Journal of Qingdao Technological University,2009,30(2):7-16.

[3] WANG Y S,ZOU B,WANG J C,et al. Effect of the progressive tool wear on surface topography and chip formation in micro-milling of Ti-6Al-4V using Ti(C_7N_3)-based cermet micro-mill[J]. Tribology International,2019,141:105900.

[4] ZAINAL A Z,TARISAI M P,HARRISON G. Chilled air system and size effect in micro-milling of nickel-titanium shape memory alloys[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology,2020,7(2):283-297.

[5] 孙杨,于联周,巩亚东.单晶材料微磨削表面粗糙度模型预测与优化[J].中国工程机械学报,2022,20(4):300-305.
SUN Yang,YU Lianzhou,GONG Yadong. Predictive and optimal model of surface roughness in micro-grinding single crystal material[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2022,20(4):300-305.

[6] DUTTA K,DEV P,DEWILDE P,et al. Integrated micromotor concepts[C]// Microelectronic Circuits and System Theory,1970:36-37.

[7] KITAHARA T,ISHIKAWA Y,TERADA T,et al. Development of micro-lathe[J]. Journal of Mechanical Engineering Laboratory,1996,50(5):117-123.

[8] LU Z N,YONEYAMA T. Micro cutting in the micro lathe turning system[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,1999,39(7):1171-1183.

[9] DAS A,SHUKLA S,KUMAR M,et al. Development of a vibration free machine structure for high-speed micro-milling center[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,116((11):3489-3506.

[10] 文翠芳.教学型数控微型铣床的研究与设计[D].南宁:广西大学,2020.
WEN Cuifang. Research and design of teaching type mini CNC milling machine[D]. Nanning:Guangxi University,2020.

[11] 吴金文,石尚.一种教学型桌面式微型五轴联动数控机床设计[J].现代制造技术与装备,2022,58(6):210-212.
WU Jinwen,SHI Shang. Design of a teaching desktop micro five axis CNC machine tool[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2022,58(6):210-212.

[12] 黄凯,聂强,毕庆贞,等.立式微铣床龙门结构的对比与优化设计[J].机械设计与制造,2014(6):1-4.
HUANG Kai,NIE Qiang,BI Qingzhen,et al. Comparison and optimization design of gantry structures for a vertical micro milling machine[J]. Machinery Design & Manufacture,2014(6):1-4.

[13] BOHEZ E. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2002,42(4):505-520.

[14] 肖紫圣,宋华伟,彭涛,等.基于UG与ANSYS Workbench联合的传动轮仿真与优化[J].农业装备与车辆工程,2023,61(6):46-49.
XIAO Zisheng,SONG Huawei,PENG Tao,et al. Transmission wheel simulation and optimization based on UG and ANSYS Workbench joint[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2023,61(6):46-49.

[15] 黄凯.微型三轴切削机床的设计与微细切削工艺实验研究[D].上海:上海交通大学,2015.
HUANG Kai. Development of a 3-axis micro machine tool and experimental study on micro cutting process[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2015.

[16] 杨梅菊,赖磊捷,谷国迎,等.微纳制造装备中拱形桥架的结构优化设计[J].机械设计与研究,2012,28(1):33-36.
YANG Meiju,LAI Leijie,GU Guoying,et al. Optimization design of a bridge structure for micro-nano manufacturing equipment[J]. Machine Design & Research,2012,28(1):33-36.

[17] JUNG D S,DAI G L. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design,2008,4(2):113-121.

[18] HUO D H,CHENG K. A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2008,222(B1):1-13.

[19] LONG Y F,ZHANG Y,HU X Y,et al. Optimization of mechanical and thermal expansion properties of resin mineral composites for ultra-precision machine tools[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites,2023,42(15/16):828-843.

[20] MOHRING H C,BRECHER C,ABELE E. Materials in machine tool structures[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2015,64(2):725-748.

[21] CHEN T C,CHEN Y J,HUNG M H,et al. Design analysis of machine tool structure with artificial granite material[J]. Advances in Mechanical Engineering,2016,8(7):1-14.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)