

TK6926 重型落地镗铣床静态、模态、热态性能 仿真分析与实验测试*

李殿新^①, 李东晖^①, 刘建勇^①, 冯平法^②

(^①北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617; ^②清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘要: 以 TK6926 重型落地镗铣床为对象, 采用仿真分析和实验测试相结合的方法研究了其静态、模态、热态性能。建立了 TK6926 重型落地镗铣床的三维实体模型, 添加边界条件后仿真得到了机床的静刚度、固有频率、模态振型、温度场和热变形; 搭建了实验系统, 测量得到了机床的静态、模态、热态性能参数, 并与仿真结果进行了对比。结果表明, 机床 3 个方向静刚度的仿真误差不超过 14%, 前 3 阶固有频率的仿真误差不超过 15%, 关键温度点和 3 个方向热变形的仿真误差都不超过 20%。对大型机床整机静态、模态、热态性能仿真分析与实验测试具有指导意义。

关键词: 静刚度; 固有频率; 模态振型; 温度场; 热变形; 重型落地镗铣床

中图分类号: TG65 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.01.023



全文在线

Simulation analysis and experimental test for static, modal and thermal performances of a TK6926 heavy-duty floor boring and milling machine

LI Dianxin^①, LI Donghui^①, LIU Jianyong^①, FENG Pingfa^②

(^①School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, CHN;

^②Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, CHN)

Abstract: TK6926 heavy-duty floor boring and milling machine was taken as the research target, and its static, modal and thermal performances were investigated by combining simulation analysis and experimental test. The three-dimensional solid model of the machine tool was established, and the static stiffness, natural frequency, mode shape, temperature field and thermal deformation of the machine tool were obtained by adding boundary conditions. The experimental systems were set up, and the static, modal and thermal performance parameters of the machine tool were measured and compared with the simulation results. The results show that the simulation error of the static stiffness in three directions of the machine tool is not more than 14%, the simulation error of the first three orders of the natural frequency is not more than 15%, and the simulation errors of the key temperature points and the thermal deformation in three directions are not more than 20%. The paper is of guiding significance for the simulation analysis and experimental testing of static, modal and thermal performance of large machine tools.

Keywords: static stiffness; natural frequency; mode shape; temperature field; thermal deformation; heavy-duty floor boring and milling machine

数控机床的静态、模态、热态性能对机床的加工精度和使用性能具有重要影响^[1-4], 有限元仿真

分析和实验测试都是了解机床性能的有效方法。杨勇等^[5]仿真了某小型数控机床的静力变形结果和模

* 国家重点研发计划项目(2023YFB4605900); 北京市科技新星项目(20230484429); 北京石油化工学院致远科研基金项目(2023003)

态结果，提出了机床薄弱件的结构优化方法，在质量下降的情况下提高了机床的静动态性能。CHAN T C 等^[6]采用有限元仿真和实验测试相结合的方法，分析了一台小型三轴机床的静刚度和模态性能，对机床的结构进行了拓扑优化，减小了机床的变形并提高了固有频率。马骋等^[7]首先仿真分析了一台小型五轴卧式加工中心电主轴的模态性能，然后提出了优化方案，通过模态仿真和优化后的振动实验验证了优化方法的有效性。班仔优等^[8]考虑了热源和传热系数，仿真得到了一台小型内喷式低温加工机床的温度场，并基于热-流-固耦合分析得到了机床的热变形。BRECHER C 等^[9]以一台小型五轴机床为研究对象，对机床的热态性能进行了有限元仿真，基于仿真结果建立了机床的热误差模型，并通过实验验证了有限元仿真和热误差模型的正确性。

文献分析可知，目前研究存在的不足主要有以下2点：一是机床的尺寸越小，仿真分析和实验测试越容易，因此目前机床性能仿真分析和实验测试的研究对象主要是小型机床，由于大型机床的尺寸大、结构复杂，目前的研究相对较少；二是目前采用仿真分析和实验测试对某型机床静态、模态、热态性能进行全面分析的研究很少。因此，本文以项目合作单位的某大型机床——TK6926 重型落地镗铣床为研究对象，采用仿真分析和实验测试相结合的方法，研究了该机床的静态（静刚度）、模态（固有频率和模态振型）、热态（温度场和热变形）性能，研究方法和结论对于大型机床的性能研究具有指导意义。

1 静态、模态、热态性能仿真分析

1.1 三维实体建模

重型落地镗铣床结构如图 1a 所示，机床沿 x 、 y 、 z 向的尺寸分别是 8、9.6、5 m。为了方便有限元仿真，选择床身、滑座、立柱、主轴箱、滑枕、铣轴和镗轴这些关键零部件，忽略掉圆角、倒角及小孔等细节结构特征，建立的整机三维实体模型如图 1b 所示，其中铣轴安装在滑枕内部，镗轴安装在铣轴内部。热态性能仿真时，还要建立精度测试棒和主轴轴承的模型。床身、滑座、立柱、主轴箱、滑枕的材料是 HT300，铣轴和镗轴的材料是 45 号钢，精度测试棒和轴承的材料是合金钢，主轴内起强制冷却作用的是 32 号润滑油，材料属性^[10]见表 1

（静态、模态性能仿真只需要考虑材料的密度、弹性模量和泊松比，热态性能仿真还需要考虑线胀系数、导热系数和比热容）。有限元仿真时，对整机进行自由网格划分。

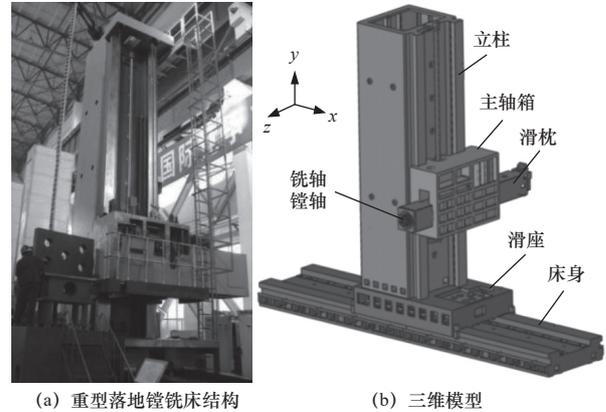


图 1 重型落地镗铣床

Fig. 1 Heavy-duty floor boring and milling machine

表 1 机床材料属性参数

Tab. 1 Material property parameters of the machine tool

参数	HT300	45号钢	合金钢	32号润滑油
密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	7 250	7 850	7 830	865
弹性模量 E/GPa	130	210	206	—
泊松比 μ	0.24	0.269	0.3	—
线胀系数 $\alpha / (\times 10^{-5} / ^\circ\text{C})$	1.1	1.159	1.13	—
导热系数 $\lambda / (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	45	49.8	50.66	0.144
比热容 $C / (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	510	486	477	1 955

1.2 有限元模型建立

1.2.1 静态性能仿真结合面建模

对机床整机的静刚度仿真时，需要在不同零件之间的结合面位置添加刚度弹簧，结合面主要分为4类：①存在于滑座与立柱之间的螺栓固定结合面，建模方法是在螺栓位置设置一个沿 x 、 y 、 z 向的弹簧；②存在于床身与滑座、立柱与主轴箱、主轴箱与滑枕之间的静压导轨油垫结合面，建模方法是在每个油垫位置建立一个垂直于油垫支撑平面的弹簧；③存在于立柱与主轴箱、主轴箱与滑枕之间的滚珠丝杠结合面，建模方法是设置一个沿滚珠丝杠方向的弹簧；④存在于滑枕与铣轴、铣轴与镗轴之间的轴承结合面，建模方法是在每个轴承位置设置一个沿 x 、 y 、 z 向的弹簧。

在确定了结合面的建模方法之后，需要对弹簧添加刚度值，刚度值可查阅清华大学开发的《机床

结合面静态特性参数数据库系统》软件，在软件中输入材料名称、接触压力、接触面积及接触介质等参数，可以得到弹簧沿不同方向的刚度值。查阅软件得到4类结合面的刚度值如下：①螺栓固定结合面 z 向的刚度为 9.8×10^9 N/m， x 、 y 向的刚度为 3.9×10^9 N/m；②床身与滑座之间的油膜刚度为 1.544×10^{10} N/m，立柱与主轴箱之间的油膜刚度为 1.251×10^{10} N/m，主轴箱与滑枕之间的油膜刚度为 6.037×10^9 N/m；③立柱与主轴箱之间滚珠丝杠结合面的刚度为 2.96×10^9 N/m，主轴箱与滑枕之间滚珠丝杠结合面的刚度为 1.14×10^9 N/m；④FAG角接触球轴承的轴向刚度和径向刚度分别为 6.3×10^8 和 8.82×10^8 N/m，NSK角接触球轴承的轴向刚度和径向刚度分别为 3.76×10^8 和 5.26×10^8 N/m。

1.2.2 模态性能仿真结合面建模

对机床整机的模态性能仿真时，结合面参数不仅包括刚度值，也包括阻尼值。由于结合面参数更复杂，但是对于模态性能影响显著的主要是床身、滑座、立柱、主轴箱和滑枕这几个尺寸较大的零件，因此模态性能仿真只考虑螺栓固定结合面和静压导轨油垫结合面。查询《机床结合面静态特性参数数据库系统》软件，得到各结合面的刚度和阻尼值，见表2。

表2 模态仿真结合面参数
Tab. 2 Joint surface parameters for modal simulation

结合面参数	螺栓固定结合面	静压导轨油垫结合面		
		床身-滑座	立柱-主轴箱	主轴箱-滑枕
法向刚度 k_n /(N/m)	2.198×10^{11}	8.026×10^9	6.513×10^9	3.327×10^9
法向阻尼 C_n /(N·s/m)	6.676×10^8	2.428×10^7	1.974×10^7	1.106×10^7
径向刚度 k_r /(N/m)	1.284×10^{10}	—	—	—
径向阻尼 C_r /(N·s/m)	5.794×10^6	—	—	—

1.2.3 热态性能仿真边界条件

热态仿真的边界条件相对复杂，需要考虑热源发热、对流换热系数和零件间的接触热阻。为了方便测量，热态实验时机床主轴空转，因此热源主要是主轴的轴承发热；对流换热系数主要包括3部分：①主轴、锥柄及测试棒等暴露在空气中的旋转体与空气间的强制对流换热；②轴承外围冷却套内冷却油的强制对流换热；③机床静止表面与空气间的自然对流换热（一般取 9.7 W/(m²·K)^[11]）。零件间的接触热阻可以查阅清华大学开发的《机床结合面接

触热阻参数数据库系统》软件，关键结合面的接触热阻值见表3。轴承发热^[12]、旋转体表面的强制对流换热^[13-15]和冷却油的强制对流换热^[16-17]都有成熟的计算方法，本文不再赘述，该机床主轴的常用转速是500 r/min，计算得到在该转速下FAG角接触球轴承和NSK角接触球轴承的发热功率分别为906.0、553.7 W，主轴、锥柄、测试棒与空气间的强制对流换热系数分别为47.1、43.7、32.6 W/(m²·K)，冷却油的强制对流换热系数为208.6 W/(m²·K)。

表3 接触热阻值
Tab. 3 Contact thermal resistance m²·K/W

结合面位置	热阻值
精度测试棒与镗轴锥套	2.04×10^{-3}
镗轴与铣轴	1.73×10^{-4}
主轴轴承内圈与铣轴	8.67×10^{-5}
主轴轴承外圈与滑枕	1.14×10^{-4}
滑枕与主轴箱	2.01×10^{-4}
主轴箱与立柱	1.13×10^{-3}

1.3 有限元仿真结果

1.3.1 静态性能仿真结果

根据机床的常用切削参数，由文献[5]可计算得到机床 x 、 y 、 z 向的切削力一般为1 800~2 100 N，因此在主轴中心位置沿 x 、 y 、 z 向分别施加2 000 N的静态集中力，将机床底面与地面的接触面固定约束，得到 x 、 y 、 z 向的变形云图分别如图2a~图2c所示。主轴中心点沿 x 、 y 、 z 向的变形分别为28.72、21.22、6.394 μ m，用2 000 N的载荷值除以变形值，计算得到机床沿 x 、 y 、 z 向的刚度分别是69.63、94.25、312.79 N/ μ m。由静态仿真结果可知，轴承结合面的刚度值明显小于其他结合面，因此机床的静态变形主要发生在主轴系统，而且机床 z 向的静刚度明显高于另外2个方向。

1.3.2 模态性能仿真结果

对机床性能影响显著的主要是前几阶模态，因此本文仿真机床的前3阶模态特性。将机床底面与地面的接触面固定约束，得到前3阶固有频率的仿真值分别为17.052、23.786、46.085 Hz，前3阶模态振型分别如图3a~图3c所示。模态仿真结果可知，机床的前2阶模态主要是立柱带动主轴箱绕 x 、 z 轴转动，第3阶模态主要是主轴箱绕 y 轴转动。

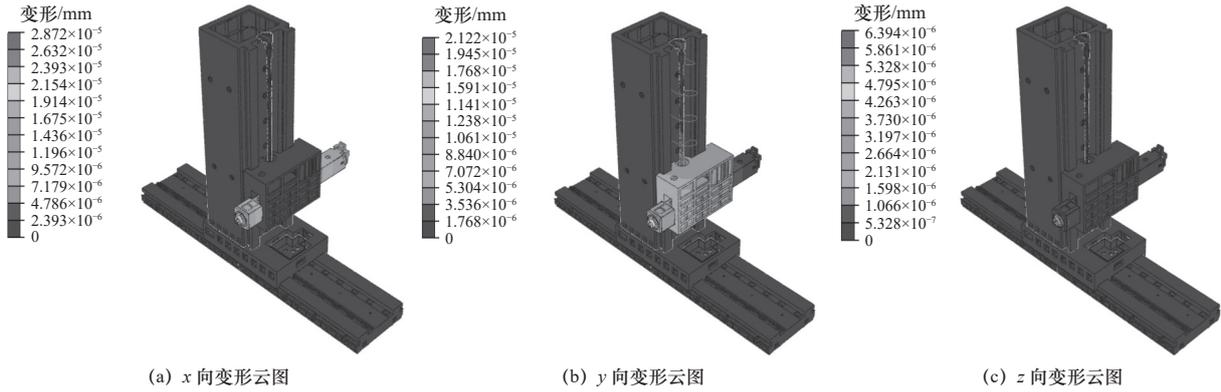


图2 静态性能仿真结果

Fig. 2 Static performance simulation results

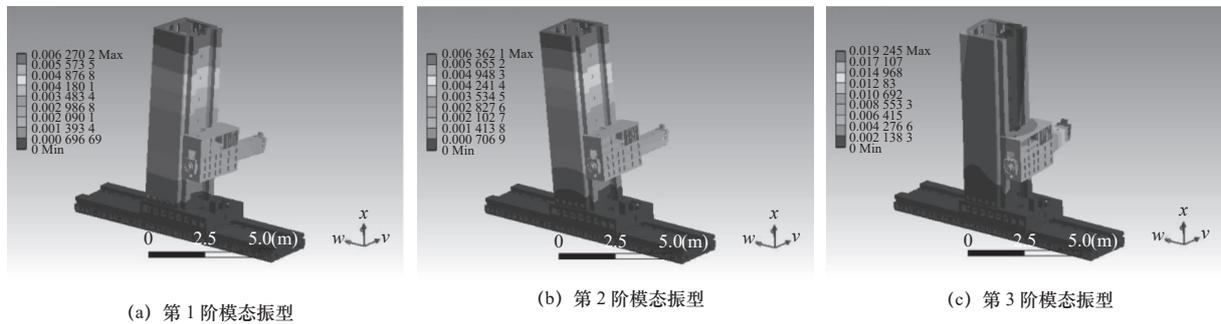


图3 前3阶模态振型

Fig. 3 First 3 orders of modal shapes

1.3.3 热态性能仿真结果

添加热源、对流换热系数和接触热阻后，设置瞬态热仿真时间 25 200 s（根据实验结果可知，机床的主轴系统 7 h 达到热平衡），得到机床的温度场如图 4a 所示。由仿真结果可知，主轴轴承位置温升明显，最高温度达到 71.492 °C。基于温度场仿真结果，将机床底面与地面的接触面固定约束，得到机床沿 x、y、z 向的热变形分别为 21.44、66.54、612.72 μm。由于机床沿 x 向是个热对称结构，因此 x 向热变形最小，而 z 向热变形显著高于另外 2 个方向。

2 静、动、热态性能实验测试

2.1 静态性能实验测试

以 z 向静刚度实验为例，实验系统如图 5 所示。实验仪器包括加载器、力传感器、数显控制仪、涡流位移传感器和磁力座。实验时，旋转加载器对主轴施加载荷，每隔 100 N 记录一次载荷值和主轴的变形值，直至载荷加载到最大 2 000 N。为了减小实验误差，重复以上步骤测量 3 次，3 次结果取平

均值用于计算 z 向的静刚度。x、y 向静刚度的测量方法与 z 向相同。

根据实验结果计算得到机床沿 x、y、z 向的静刚度，并与仿真结果对比，结果见表 4。机床 3 个方向静刚度的仿真误差不超过 14%，能够比较准确地分析机床的静刚度。另外，机床 x、y 向的静刚度明显低于 z 向，是静刚度优化的主要对象。

表 4 机床静刚度结果对比
Tab. 4 Comparison of machine static stiffness results

方向	实验值 / (N/μm)	仿真值 / (N/μm)	误差 / (%)
x向	62.4	69.63	11.59
y向	97.1	94.25	-2.94
z向	274.4	312.79	13.99

2.2 模态性能实验测试

模态测试的实验仪器包括 LMS SCADAS III 多通道数据采集前端、ICP 加速度传感器、力锤和数码显示仪。由于机床的尺寸太大，本文采用单点激振、多点拾振的测量方法。根据图 3 的仿真结果，将 8 个三向加速度传感器布置在机床上，其中立柱

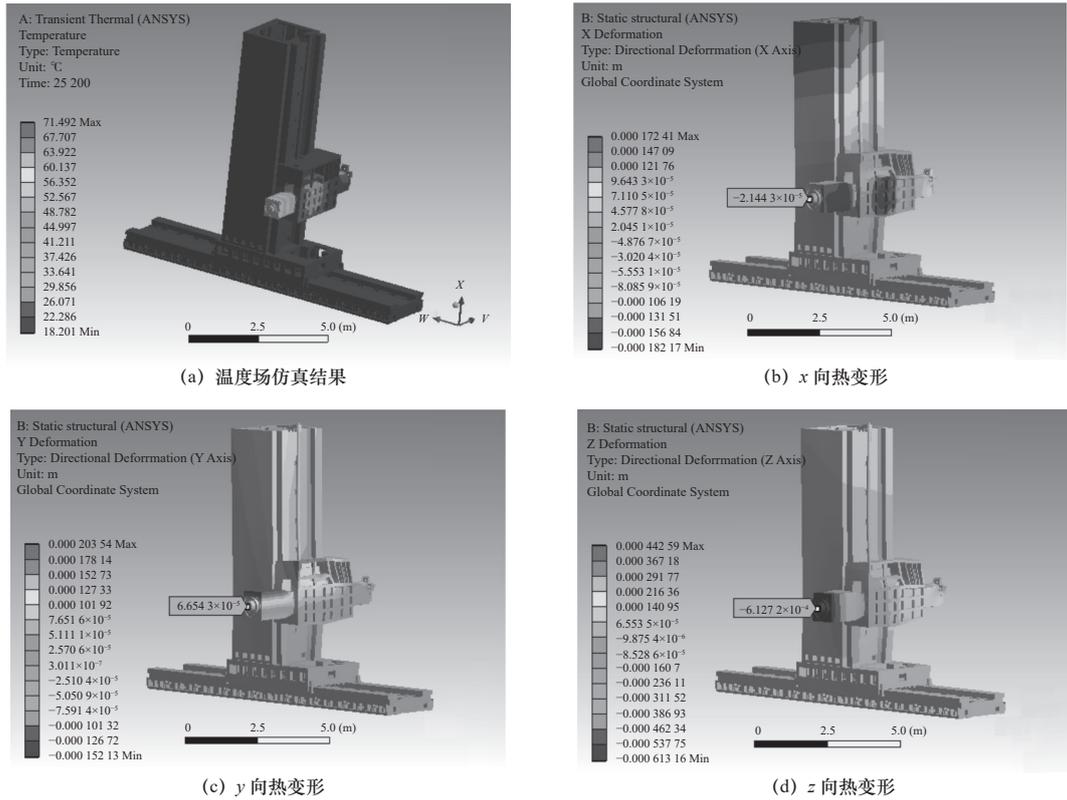


图4 热特性仿真结果

Fig. 4 Thermal characteristics simulation results

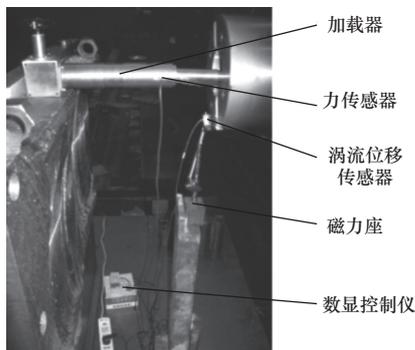


图5 z向静刚度实验

Fig. 5 Static stiffness test for z-direction

上布置4个，主轴箱和滑枕上各布置2个。在LMS Test. Lab中建立机床的节点模型，如图6a所示，测试过程中，依次敲击节点模型中的节点，每个节点敲击3~5次以减小随机误差，得到整机前3阶模态振型，如图6b~图6d所示。

根据实验结果得到机床前3阶固有频率，并与仿真结果对比，见表5。前3阶固有频率仿真误差不超过15%，而且图3和图6的模态振型也相符，证明模态仿真精度较高。

2.3 热态性能实验测试

热态测试的实验仪器包括32个PT100铂电阻

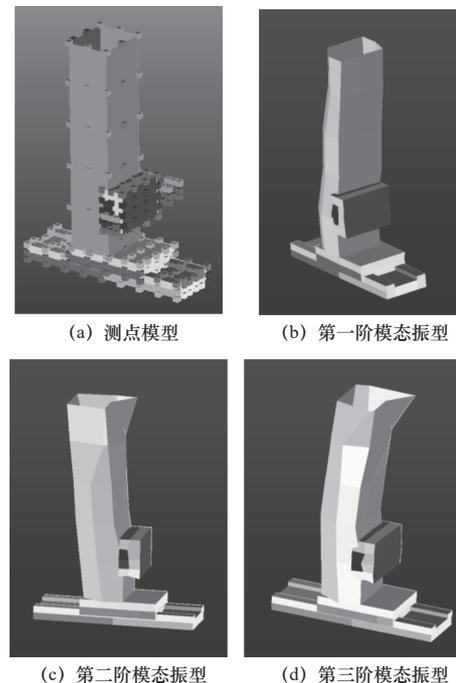


图6 模态实验结果

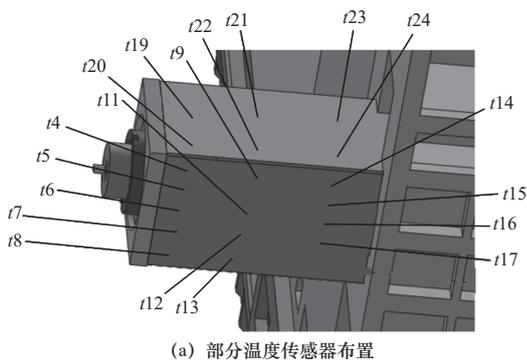
Fig. 6 Modal experiment results

温度传感器、智能温度巡检仪、2个激光位移传感器、1个涡流位移传感器、数据采集卡和一体化开关电源。将30个铂电阻温度传感器布置在机床主轴系统的热关键点位置，部分温度传感器布置

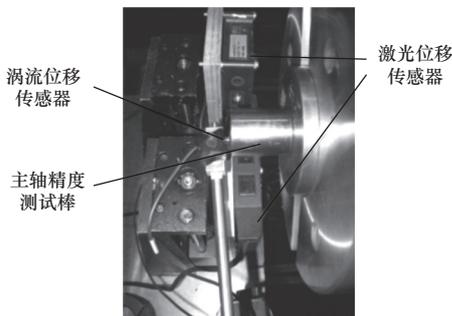
如图 7a 所示, 另外 2 个布置在床身和滑座上测量环境温度变化。3 个激光位移传感器布置如图 7b 所示, 分别测量主轴精度测试棒沿 x 、 y 、 z 向的热变形。

表 5 机床模态结果对比
Tab. 5 Comparison of modal results

阶数	实验频率/Hz	仿真频率/Hz	仿真误差/(%)
1	13.981	16.052	14.81
2	22.696	23.786	4.80
3	25.880	26.085	0.79



(a) 部分温度传感器布置



(b) 位移传感器布置

图 7 机床热态性能实验

Fig. 7 Thermal performance test of machine tools

主轴系统以 500 r/min 的转速旋转 7h, 将轴承位置关键温度点 t_6 、 t_{11} 、 t_{16} 的温度仿真值与实验值进行对比, 见表 6。机床沿 x 、 y 、 z 向热变形的仿真值与实验值对比同样列于表 6。3 个关键温度点的仿真误差不超过 10%, 3 个方向热变形的仿真误差不超过 20%, 证明热特性仿真精度较高。

3 结语

(1) 建立了 TK6926 重型落地镗铣床的有限元模型, 对机床的静态、模态、热态性能进行了仿真分析, 静态仿真考虑了关键结合面之间的静刚度参数, 模态仿真考虑了关键结合面之间的刚度和阻尼

参数, 热态仿真考虑了热源、对流换热和关键零件之间的接触热阻。

(2) 搭建了静态、模态、热态性能测试系统, 测量得到了机床 3 个方向的静刚度、前 3 阶固有频率和模态振型、温度场分布和 3 个方向的热变形, 结果表明有限元仿真误差都不超过 20%, 证明了仿真分析的准确性。

(3) 采用仿真分析的方法可以在设计阶段准确预测机床的性能, 并针对薄弱环节进行优化, 是经济高效开发机床的有效手段, 对于大型机床的研发尤其重要。

表 6 热特性结果对比
Tab. 6 Comparison of thermal characterization results

参数	实验值	仿真值	仿真误差/(%)
t_6 温度	45.6 °C	49.82 °C	9.25
t_{11} 温度	47.5 °C	49.41 °C	4.02
t_{16} 温度	41.1 °C	43.2 °C	5.11
x 向热变形	26.7 μm	21.44 μm	-19.70
y 向热变形	77.8 μm	66.54 μm	-14.47
z 向热变形	648.6 μm	612.72 μm	-5.53

参 考 文 献

- [1] BAE W, KIM S, KIM Y, et al. Suppression of machine tool spindle vibration using TiC-SKH51 metal-matrix composite[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(8): 3619-3625.
- [2] LIANG Y C, CHEN W Q, BAI Q S, et al. Design and dynamic optimization of an ultraprecision diamond fly cutting machine tool for large KDP crystal machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(1-4): 237-244.
- [3] SUN W, KONG X X, WANG B. Precise finite element modeling and analysis of dynamics of linear rolling guideway on supporting direction[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2013, 15(3): 1330-1340.
- [4] 李殿新, 黄鹏, 冯平法. 基于热态特性仿真的龙门铣床主轴系统热关键点选择方法 [J]. *制造技术与机床*, 2023(10): 177-183.
- [5] 杨勇, 孙群, 沈晔湖, 等. 基于结构-整机性能映射模型的机床薄弱环节结构优化方法 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 420-428.
- [6] CHAN T C, CHANG C C, ULLAH A, et al. Study on kinematic structure performance and machining characteristics of 3-Axis machining center[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(8): 4742.
- [7] 马骋, 邵佳焯. 卧式五轴数控机床电主轴的动态特性分析及振动抑制优化 [J]. *制造技术与机床*, 2024(6): 177-182.
- [8] 班仔优, 刘阔, 韩灵生, 等. 内喷式超低温加工机床的温度场仿真分析 [J]. *制造技术与机床*, 2019(4): 45-50.
- [9] BRECHER C, DEHN M, NEUS S. A FE model for the efficient simulation of the thermo-elastic machine tool behavior[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2024, 25(5): 913-923.

- [10]成大先. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 1-11.
- [11]NJAIFI A, MOVAHHEDI M R, ZOHOOR H, et al. Dynamic stability of a Hexaglide machine tool for milling processes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5-8): 1753-1762.
- [12]LI R Y, ZHAO L B, ZHOU B, et al. Research on machining error control method driven by digital-twin model of dynamic characteristics of machining system[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2023, 237(1): 321-335.
- [13]KERSTING P, BIERMANN D. Simulation concept for predicting workpiece vibrations in five-axis milling[J]. *Machining Science and Technology*, 2009, 13(2): 196-209.
- [14]ZHANG L L, XUAN J P, SHI T L, et al. Robust, fractal theory, and FEM-based temperature field analysis for machine tool spindle[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(5/6): 1571-1586.
- [15]ZHANG Y, LI H, QIN X D, et al. Analysis of vibration response and machining quality of hybrid robot based UD-CFRP trimming[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(6/7): 974-986.
- [16]BAE W, KIM J, CHO S, et al. Suppression of thermal deformation of machine tool spindle using TiC-Fe composite[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(5): 2511-2520.
- [17]MAHMOUDI A, RAHIM N A, HEW W P. An analytical complementary FEA tool for optimizing of axial-flux permanent-magnet machines[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2011, 37(1): 19-34.

第一作者/通信作者: 李殿新, 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密制造技术, 发表论文 30 余篇。E-mail: liidianxin@bipt.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2024-09-19)

论文推荐

毛柯夫, 苑明海, 孙超, 等. 基于扰动事件的智能车间生产管理系统研究[J]. *制造技术与机床*, 2022(9): 97-103.



扫码获取全文

基于扰动事件的智能车间生产管理系统研究

毛柯夫 苑明海 孙超 裴凤雀 顾文斌

河海大学机电工程学院

摘要 智能车间异构制造资源众多, 车间扰动繁杂, 生产服务模块更加多样且复杂, 因此为了实现对车间不同功能模块的清晰化管理, 设计开发一种基于扰动事件的智能车间生产管理系统尤为重要。根据用户对产品独特性和时效性要求, 提出了基于智能车间扰动事件的调度管理系统业务流程和总体架构。采用B/S(Browser/Server)体系结构, 并基于Visual Studio.NET集成平台, 使用Web ASP.NET进行数据库开发, 从五大功能模块进行设计, 实现车间制造数据信息的充分利用, 并对系统的主要功能界面进行展示, 最后验证智能制造车间对异常事件监控处理及生产调度模型的可行性和合理性。

关键词 智能车间; 管理系统; 数据库开发; 车间扰动