

引文格式: 孙椰望, 曹也, 孙松涛, 等. 基于模态特性的机床高刚度结构共性优化设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 62-67, 75.
SUN Yewang, CAO Ye, SUN Songtao, et al. Structural stiffness general optimization technology of machine tools based on modal analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 62-67, 75.

基于模态特性的机床高刚度结构共性 优化设计技术研究*

孙椰望^{1,2}, 曹也², 孙松涛³, 杨秋娟⁴, 杨鲁伟¹

(1. 中国科学院理化技术研究所热力过程节能技术北京市重点实验室, 北京 100190;
2. 北京理工大学, 北京 100081;
3. 中国人民解放军 32368 部队, 北京 100190;
4. 北特圣迪科技发展有限公司, 北京 100028)

[摘要] 针对机床高刚度优化设计的共性技术问题, 鉴于机床结构复杂和尺寸较大导致的数值迭代优化算法分析不足、优化加工试验成本较高的弊端, 采用有限元模态分析和试验模态分析相结合的方法进行精密立式加工中心和龙门镗铣床的机床结构动态刚度优化设计。结果表明, 在简化机床结构运动副的刚度阻尼等部件结合面的情况下, 机床的有限元模态分析结果能够较好地揭示机床结构的动态特性, 并结合试验模态分析结果, 能够获取准确的模态参数; 基于振型和模态参数, 进一步指导机床结构的动刚度薄弱区, 实现结构的优化设计, 促进立式加工中心和龙门镗铣床低阶频率分别提升 10% 和 40% 以上, 验证了优化分析方法在机床结构优化设计分析过程的良好适用性。

关键词: 模态分析; 结构刚度; 优化设计; 有限元(FEM); 机床

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.062



孙椰望
高级工程师, 特聘研究员, 研究方向为精密智能制造技术。

机床的动态刚度和高精度设计制造是机床装备的核心目标, 而动态高刚度直接决定了机床精度的抗振性和精度稳定性, 同时机床动态高刚度主要体现机床的运行动态响应和环境冲击振动的结构强度和精度稳定性; 然而, 机床结构的动态响应和冲击基于机床的固有动态特性, 所以能够反映机床固有动态特性的模态参数成为机床结构动刚度特性的首要分析和优化内容。本研究以市场化较高的车铣精密机床为对象, 通过模态分析判定结构设计的合理性和动态刚度鲁棒特性。装备结构模态

分析是指导结构刚度优化设计最有效的方法, 机床等高精密装备的设计制造必须进行严格的刚度优化设计, 其模态分析成为高端机床必须进行的环节; 同时, 模态分析数据是机床结构优化设计的关键依据^[1-3]。另外, 以机床装备为代表的装备领域具有较大的体积、较高的精度和刚度技术标准要求, 但机床模态分析试验方法和结构优化方案存在设计、试验、计算和分析方法杂乱的现象, 主要存在以下 3 个问题^[4-6]。

(1) 试验模态的试验数据采样布点方案缺乏规范性, 导致采集数据

* 基金项目: 国家自然科学基金(51805035); 山东省重大专项(2017CXGC0801); 中国博士后基金(2017M620634)。

的分析结果不能较好地表达装备完整的准确固有动态特性。

(2) 试验模态数据与有限元数值分析的数据存在模糊匹配现象,特别是运动部件的模态分析刻意矫正了两种分析数据,忽视了试验方法和仿真分析结果的客观误差,不能准确揭示装备的动态特性。

(3) 装备模态分析属于整体系统分析,部件的细化分析过程必须基于整体系统的试验和仿真分析结果,部分研究过程的单纯局部模态分析存在原则性的失真,容易导致装备固有模态数据的失真,不能较好优化结构动态刚度。

因此,本研究针对机床重大专项课题资助的关键共性技术问题,以机床行业最典型的精密龙门镗铣床和立式加工中心为对象,开展基于模态分析的机床高刚度共性优化设计技术研究。

1 机床模态试验分析方案设计

模态分析包括计算模态分析与试验模态分析两种方法。利用两种方法的优势,能够得到机床合理的模态参数,从而为机床结构优化分析提供理论基础^[7-9]。

目前,试验模态分析包括SIMO、MIMO和MISO 3种方式,为了方便得到结构的完整准确模态数据,可以根据设备的结构特点选择适应的测试方法。试验模态分析过程主要依据数据采集的布点方案,从而获取较好的弯曲和扭曲振型。本研究针对机床设备特点,采用SIMO方法,组成单点激励多点振动响应的试验方案,提高测试效率和准确度^[10-13]。

如图1和2所示,未获取较完整的机床主要前阶的弯曲和扭曲模态参数必须在试验模态过程中以最大响应点和关注区为信号采集点,以机床悬臂主轴端部为信号采样点,激励

振动点布置在机床的结构关注区,弯曲振型点数不少于3个,扭曲振型不少于6个激励点。另外,测振点不要布置在激发信号微弱的近地面紧固约束区。

2 试验模态分析

基于上述试验模态分析原则和设计方案,针对龙门镗铣机床和立式加工中心进行试验模态分析,如图3和4所示。

鉴于试验模态分析中装备复模态的必然存在性,使得试验获取的试验模态数值较多、主模态定阶困难,为弥补试验模态的不足,较好的方式是结合计算模态结果进行机床模态参数的准确定阶和定量。

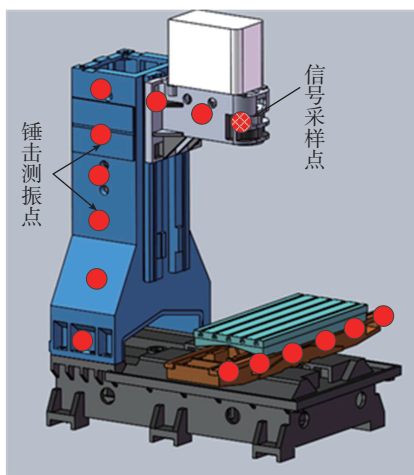


图1 立式加工中心试验模态测试方案
Fig.1 Modal test design of vertical CNC machine tool

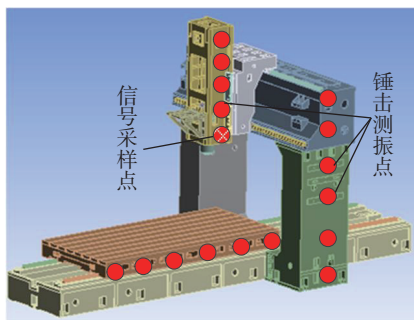


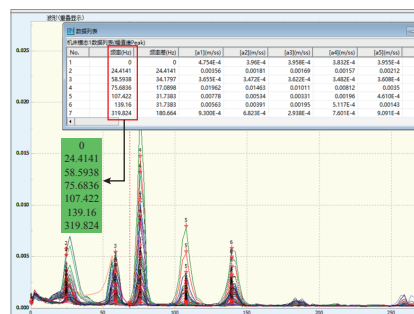
图2 龙门加工中心试验模态测试方案
Fig.2 Modal test design of gantry boring-milling CNC machine tool

3 机床模态有限元分析

目前,计算模态分析主要采用有限元分析,为获得合理的模态参数,采用实际工况约束模态分析,如图5



(a) 试验模态数据采集

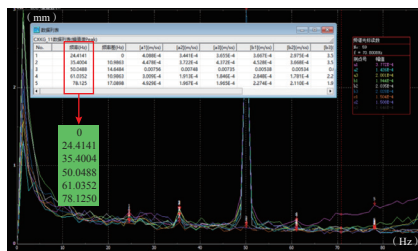


(b) 试验模态自谱分析

图3 优化前立式加工中心试验模态分析
Fig.3 Modal test analysis of original vertical CNC machine tool



(a) 试验模态数据采集



(b) 试验模态自谱分析

图4 优化前龙门镗铣床试验模态分析
Fig.4 Modal test analysis of original gantry boring-milling CNC machine tool

和 6 所示的机床底部地面约束的工况边界 FEM 模态分析。

机床 FEM 模型的结合面不均匀性和刚度阻尼情况全部采用便捷的均匀接触和刚性部件简化建模,快速获得线性分析结果。

由图 5 和 6 可见,立式加工中心和龙门镗铣床的共同刚性薄弱区主要体现在主轴箱和立柱部件,所以优化设计机床的主轴箱和立柱成为主要方面。

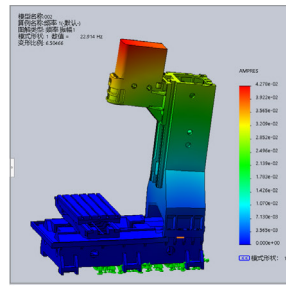
4 基于模态参数的结构优化设计分析

为了提升机床的刚度和运行精度稳定性,针对上述模态振型刚度薄弱区进行立式加工中心立柱、龙门镗铣床横梁和立柱的高刚性结构优化设计,并进行分析验证,如图 7~12 所示。

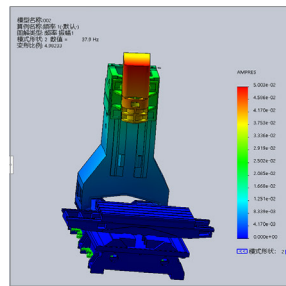
图 7 为立式加工中心结构刚度薄弱环节的主要优化方案,重点进行立柱结合部大面积充分接触、体积适当扩大、力矩平衡优化等方面设计。分析结果如图 8 试验结果和图 9 数值分析结果所示。

根据立式加工中心优化后的分析结果(图 8 和 9),结合初始结构分析结果(图 3 和 5),得到的数据如表 1 所示。

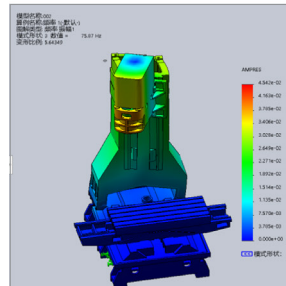
根据表 1,立式加工中心通过结构优化实现了刚度的显著提高,低阶固有频率提升 10% 以上,对于机床的刚度性能提升具有直接增益。另外, FEM 模态分析和试验模态结果基本吻合,个别数据虽然存在差异,但是 FEM 能够较好预测立式加工中心结构刚性变化的规律,并且 FEM 的清晰主振动模态振型与试验模态的试验数据能够较好的优势互补。FEM 和试验模态的误差在优化后存在总体增加现象,主要在于优化后机床的刚度增大,体现在试验模态主要振动频率增加显著,从而使得误差值放大,其中振动频率增加值较大的为



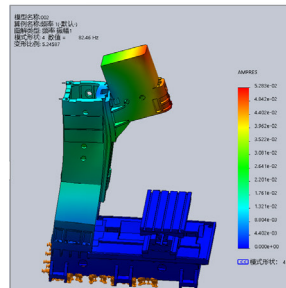
(a) 1 阶模态 22.914Hz



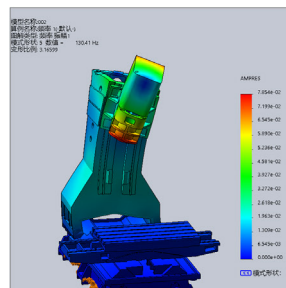
(b) 2 阶模态 37.9Hz



(c) 3 阶模态 75.87Hz

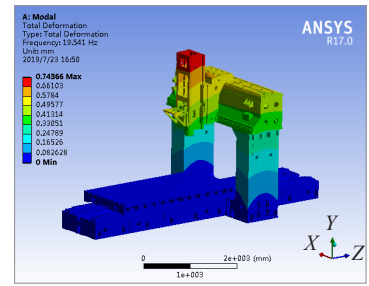


(d) 4 阶模态 82.46Hz

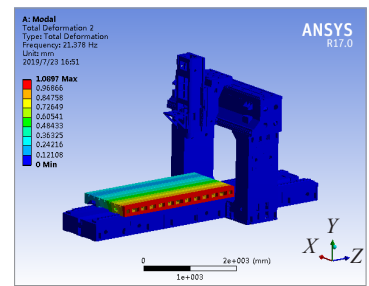


(e) 5 阶模态 130.4Hz

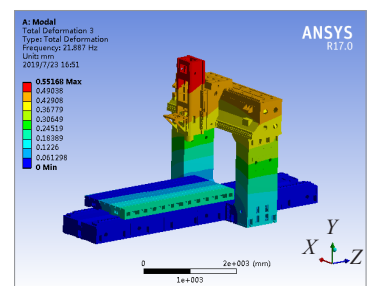
图5 立式加工中心初始结构FEM模态分析
Fig.5 FEM modal analysis of original vertical CNC machine tool



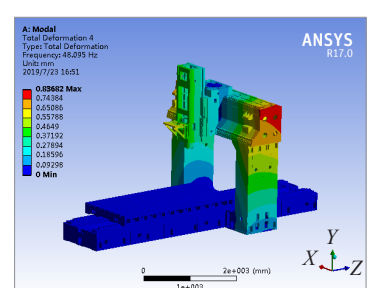
(a) 1 阶模态 19.541Hz



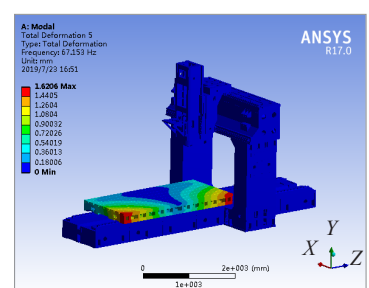
(b) 2 阶模态 21.9Hz



(c) 3 阶模态 48.1Hz



(d) 4 阶模态 67Hz



(e) 5 阶模态 72Hz

图6 龙门镗铣床初始结构FEM模态分析
Fig.6 FEM modal analysis of original gantry boring-milling CNC machine tool

2~4 阶。

图 10 为龙门镗铣床加工中心的结构刚度薄弱环节优化方案,重点进行立柱结合部大面积充分接触、体积适当扩大、垂直力矩补偿优化等方面设计,分析结果如图 11 和 12 所示。根据龙门镗铣床优化后模态分析结果,结合结构优化前的图 5 和 6 分析结果,总结得表 2 数据。由表 2 数据可见,龙门镗铣床通过结构优化实现了高刚度的显著提高,固有频率

提升 40% 以上,机床的刚度性能提升显著。FEM 和试验模态个别数据虽然存在差异,但是 FEM 能够较好预测龙门镗铣床的结构刚性变化规律,并且 FEM 的清晰主振动模态振型与试验模态的试验数据能够实现较好的优势互补。

FEM 和试验模态数据的差异主要原因在于:

(1) 本研究的 FEM 机床分析模型忽略了结合面的非均匀接触实际

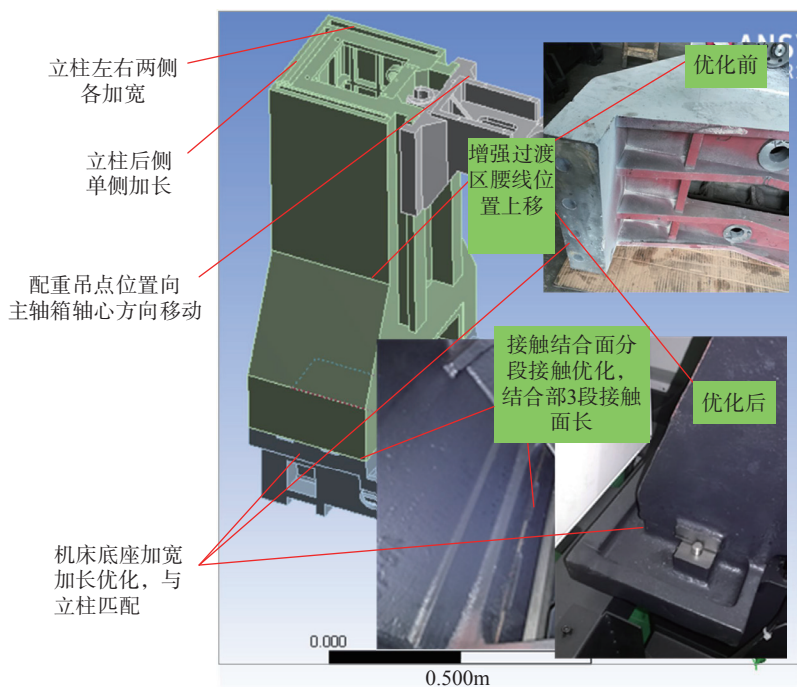
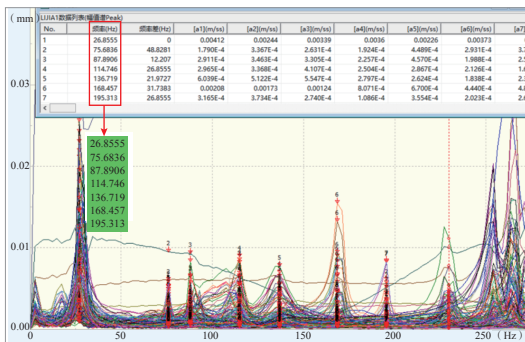


图7 立式加工中心优化方案

Fig.7 Optimized design of vertical CNC machine tool



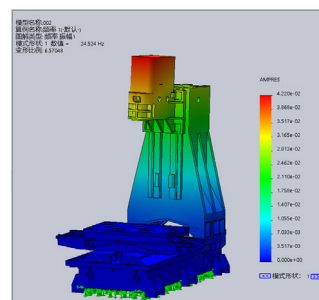
(a) 数据采集



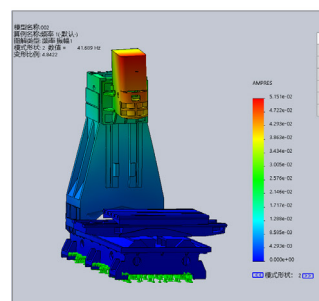
(b) 自谱分析

图8 优化后立式加工中心试验模态分析

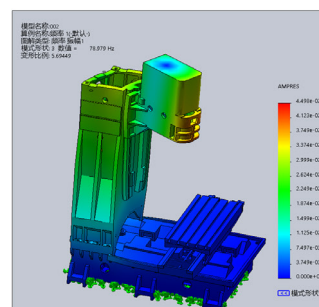
Fig.8 Modal test analysis of optimized vertical CNC machine tool



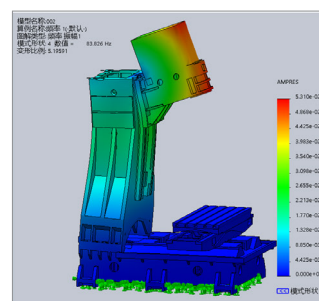
(a) 1 阶模态 24.524Hz



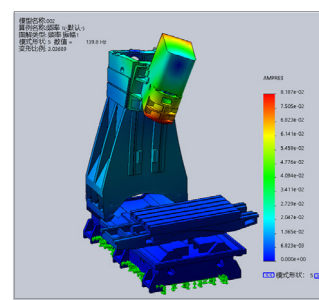
(b) 2 阶模态 41.689Hz



(c) 3 阶模态 78.979Hz



(d) 4 阶模态 83.826Hz



(e) 5 阶模态 139.8Hz

图9 优化后立式加工中心FEM模态分析
Fig.9 FEM modal analysis of optimized vertical CNC machine tool

表1 立式加工中心模态分析对比

Table 1 Analysis data comparison of vertical CNC machine tools

优化前后	立柱横摇 1阶	立柱纵摇 2阶	立柱横扭 3阶	立柱垂荡 4阶	立柱纵扭 5阶
优化前试验模态/Hz	24.41	58.59	75.68	107.42	139.16
优化前 FEM 模态 /Hz	22.9	37.9	75.9	82.50	130.4
优化前试验与 FEM 误差 /%	6.1	35.3	0.3	23.1	6.3
优化后试验模态 /Hz	26.86	75.68	87.89	114.75	136.72
优化后 FEM 模态 /Hz	24.5	41.7	78.9	83.8	139.8
优化后试验与 FEM 误差 /%	8.8	45	10.2	27	2.2
优化前后试验模态比较 /%	10	29.2	16.1	6.8	-1.75

特征,简化为理想均匀接触,结合面非线性变动特性简化为线性变动特性。

(2) 结构部件细节忽略,螺栓、运动副结构简化较大,导致机床部件细节动态变化分析数据差别明显。

(3) 机床整体结构为简化模型,并且结构部件简化成了刚性体,阻尼特性无法较好体现,所以试验模态的复模态特性与 FEM 模态数据存在差异。但是 FEM 机床主模态参数与测试主模态参数具备变动特性一致的吻合特点, FEM 的局部数据可视化特性更能较好指导机床的优化设计。

另外,如表 2 所示, FEM 和试验模态的误差在优化后存在总体增加现象,主要在于优化后机床的刚度增大,特别是体现在试验模态主要振动频率增加显著,从而使得误差值放大,其中振动频率增加值较大的为 3~5 阶。

5 结论

(1) 机床模态分析需要充分根据装备结构特点进行适应性的试验方案设计,并通过试验与数值计算相互验证的方法合理评定模态参数,准确分析结构刚度薄弱环节,有利于机床及其相似装备的结构优化

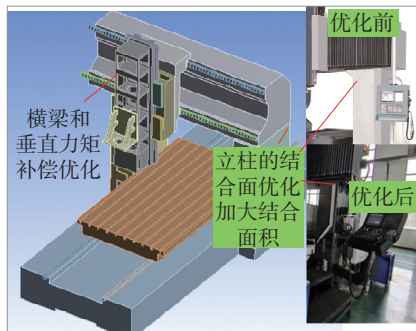
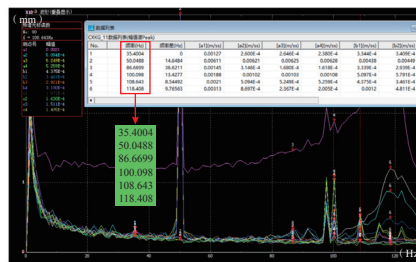


图10 龙门镗铣床结构优化方案

Fig.10 Optimized design of gantry boring-milling CNC machine tool

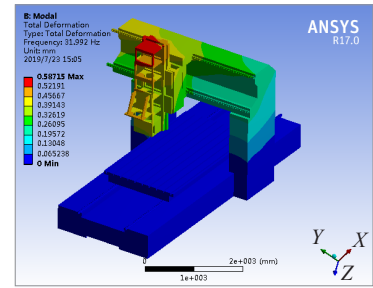


(a) 数据采集

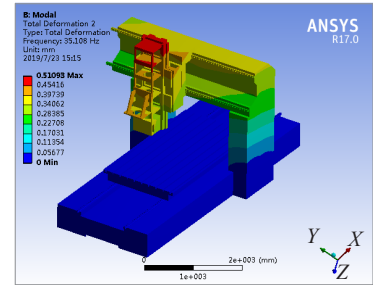


(b) 自谱分析

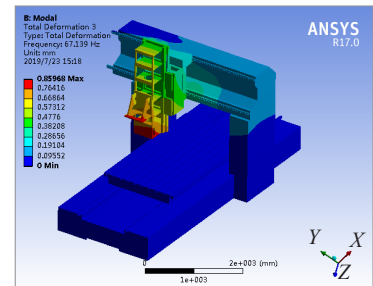
图11 优化后龙门镗铣床试验模态分析
Fig.11 Modal test analysis of optimized gantry boring-milling CNC machine tool



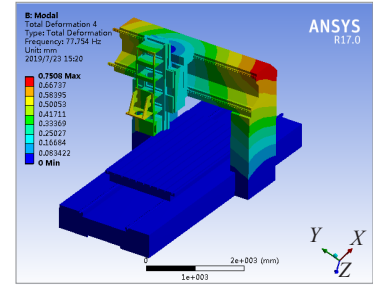
(a) 1阶模态 31.992Hz



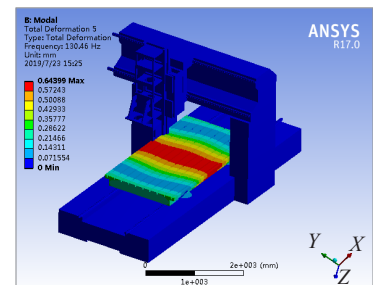
(b) 2阶模态 35.108Hz



(c) 3阶模态 67.139Hz



(d) 4阶模态 77.754Hz



(e) 5阶模态 130.46Hz

图12 优化后龙门镗铣床FEM模态分析
Fig.12 FEM modal analysis of optimized gantry boring-milling CNC machine tool

表2 龙门镗铣床模态分析对比

Table 2 Analysis data comparison of gantry boring-milling CNC machine tools

优化前后	立柱横摇 1阶	立柱纵摇 2阶	立柱横扭 3阶	立柱纵扭 4阶	拖板垂荡 5阶
优化前试验模态 /Hz	24.4	35.4	50	61	78.1
优化前 FEM 模态 /Hz	19.54	21.9	48.1	67	72
优化前试验与 FEM 误差/%	20	38.1	3.8	9.8	7.8
优化后试验模态 /Hz	35.4	50	86.7	100	108.6
优化后 FEM 模态 /Hz	32	35.1	67.1	77.8	130.5
优化后试验与 FEM 误差/%	9.6	30	22.6	22.2	20.2
优化前后试验模态比较/%	45	41.2	73.4	63.9	39

设计。

(2) 机床试验模态分析和 FEM 分析存在数据误差, 归因于模型简化的方式和理论计算模型的理想化特征; 但是 FEM 模态分析能够较好分析机床优化结构的模态和刚度变化趋势, 特别是在振型呈现结果和细化结构刚度优化方面, FEM 比试验模态分析更具优势。

(3) 本研究主要针对机床结构的动刚度方案设计进行分析研究, 机床运行过程的动态精度稳定性和外部激励冲击还需要深入研究, 需要进一步进行切削加工动态的精度保持性、切削力振动、外部激励综合试验研究和加工工艺设计。

参考文献

[1] 闻邦椿. 机械振动理论及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

WEN Bangchun. Theory of mechanical vibration and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

[2] 应怀樵. 现代振动与噪声技术(第9卷)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.

YING Huaiqiao. Modern vibration and noise technology (9th)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.

[3] 段建国, 李爱平, 谢楠, 等. 可重构制造系统多态可靠性建模与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 104-111.

DUAN Jianguo, LI Aiping, XIE Nan, et al. Multi-state reliability modeling and analysis of reconfigurable manufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 104-111.

[4] 刘称意. 考虑导轨结合面影响的数控机床动态特性分析及结构优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

LIU Chengyi. Study on dynamic characteristics and structural optimization of CNC machine tool considering influence of rolling guide joint[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[5] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

FU Zhifang, HUA Hongxing. Modal analysis theory and application[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.

[6] 王红军, 郑军, 赵川. 精密高速电主轴动力学特性及轴承刚度软化分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(4): 81-85.

WANG Hongjun, ZHENG Jun, ZHAO Chuan. Study of dynamics characteristics and bearing stiffness softening for precision high-speed motor spindle system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(4): 81-85.

[7] 田晶, 艾延廷, 赵丹, 等. 螺栓联接结构弯曲刚度优化设计[J]. 航空制造技术, 2014, 57(3): 86-89.

TIAN Jing, AI Yanting, ZHAO Dan, et

al. Optimization design of bending stiffness of bolted structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(3): 86-89.

[8] 王奎, 屠丹红. 某中速柴油机底座刚度对整机模态影响分析[J]. 柴油机, 2021, 43(3): 15-19.

WANG Kui, TU Danhong. The impact analysis of engine base stiffness of a medium speed diesel engine on the whole engine mode[J]. Diesel Engine, 2021, 43(3): 15-19.

[9] 闵光云, 刘小会, 蔡萌琦. 三阶模态耦合效应下悬索的1:1主共振与稳定性分析[J]. 计算力学学报, 2021, 34: 1-8.

MIN Guangyun, LIU Xiaohui, CAI Mengqi. 1:1 principal resonance and stability analysis of suspension cable under third-order modal coupling effect[J]. Journal of Computational Mechanics, 2021, 34: 1-8.

[10] 孙岩, 李耸, 刘香辰. 新型导管搬运机器人的静刚度及动态特性分析[J]. 机械传动, 2021, 45(8): 144-150.

SUN Yan, LI Song, LIU Xiangchen. Analysis of static stiffness and dynamic characteristic of a new pipe handling robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(8): 144-150.

[11] PETER A. How many points are enough when running a modal test[J]. SEM Experimental Techniques, 2010, 6: 1-2.

[12] 孙椰望. 船用多功能数控机床动态性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

SUN Yewang. Research on dynamic performance of marine compound NC machine tool[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[13] 张建成, 刘伟, 杨志勤. 可重配置机床及其模态分析[J]. 制造业自动化, 2015, 37(6): 143-147.

ZHANG Jiancheng, LIU Wei, YANG Zhiqin. Reconfigurable machine tools and its modal test analysis technique[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(6): 143-147.

通讯作者: 曹也, 工程师, 研究方向为微细制造技术。

(下转第75页)

Development of 5-Axis Continuous Fiber 3D Printer and Its Numerical Control System

DUAN Jiaqi, HAO Minghui, QIN Ruosen, ZHANG Peng, FU Hongya
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] In order to solve the difficult problem of precisely forming complex trajectory in 3D printing of traditional 3-axle continuous fiber, a 5-axis continuous fiber 3D printer with 5 linkage shafts (*XYZBC*) and 1 auxiliary shaft of resin screw extruder was designed and built. Aiming at the problems of typical 3D printing control scheme, such as small number of linkable shafts, poor expandability and poor real-time performance, the full-software open CNC system was studied and applied in continuous fiber material increment manufacturing. Based on open-source CNC platform LinuxCNC and EtherCAT industrial Ethernet, a full-software open CNC system for 5-axis continuous fiber 3D printer is designed and developed. By optimizing the RT-Preempt real-time core, the HAL module integrated with IgH-EtherCAT was developed to complete the 5-axis linkage control, and the screw extruding shaft was used as the spindle to achieve the accurate control of its speed. The maximum dither control of user-level and core-level scheduling is tested within 5 μ s, the maximum dither of CNC system with integrated EtherCAT is less than 50 μ s, which prove that the CNC has good real-time performance. Finally, the feasibility of the 5-axis continuous fiber 3D printing system scheme is verified by standard tensile property test and forming experiment of space lattice structure.

Keywords: Continuous fiber reinforcement; Resin matrix composite; 3D printing; LinuxCNC; EtherCAT; RT-Preempt
(责编 古系)

(上接第67页)

Structural Stiffness General Optimization Technology of Machine Tools Based on Modal Analysis

SUN Yewang^{1,2}, CAO Ye², SUN Songtao³, YANG Qiujuan⁴, YANG Luwei¹

(1. Beijing Key Laboratory of Thermal Energy Technology of Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. PLA 32368, Beijing 100190, China;

4. Beijing BSD Science Development Co., Ltd., Beijing 100028, China)

[ABSTRACT] Aiming at the stiffness optimization key problems of machine tools, due to insufficient analysis of numerical iterative optimization algorithm and high cost of optimization machining test caused by complex structure and large size of machine tool, this paper provided the method of combining finite element modal analysis and experimental modal analysis to optimize the dynamic stiffness of machine tools including the vertical and gantry boring-milling CNC machine tools. Combined with the modal test analysis and FEM, the results show that without considering the stiffness and damping of moving pairs of machine tools, the simplified FEM modal analysis of the machine tool could better reveal the dynamic characteristics of the machine tool structure. According to the weak area of the dynamic stiffness of the structure, the low-order frequencies of the machine tools are increased by more than 10% and 40% respectively. Importantly, it is showed that the optimization analysis method could be applied to the analysis process of structural general optimization design.

Keywords: Modal analysis; Structural stiffness; Optimization design; FEM; Machine tool

(责编 古系)