

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2012.15.005

五轴数控磨床床身结构分析与优化

张祥雷¹, 姚博世², 江铁强¹, 姚斌¹

(1. 厦门大学机电工程系, 福建厦门 361005; 2. 陕西汉江机床有限公司, 陕西汉中 723003)

摘要: 在 ANSYS 软件平台上建立五轴数控磨床有限元模型, 对其床身结构进行静、动态特性分析与优化, 通过对比提出两种优化方案, 分析结果表明: 综合改进后的床身相比原床身在静态特性上得到极大提高, 且动态特性也有相应的增强。

关键词: 磨床床身; 结构优化; 模态分析

中图分类号: TG593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2012)15-018-4

Structure Analysis and Optimization for 5-axis CNC Grinder Bed

ZHANG Xianglei¹, YAO Boshi², GANG Tieqiang¹, YAO Bin¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China; 2. Shaanxi Hanjiang Machine Tool Co., Ltd., Hanzhong Shaanxi 723003, China)

Abstract: Finite element model of 5-axis CNC grinder bed was built on ANSYS software platform. The two optimal schemes for the bed structure were extracted on the basis of static and dynamic analyses and optimization. Comprehensive analysis shows that the static performance of the improved bed has been greatly enhanced and the dynamic performance has been correspondingly strengthened than original bed.

Keywords: Grinder bed; Structure optimization; Mode analysis

五轴联动高速、精密可转位刀片周边和双端面刃磨数控工具磨床是一种针对超细硬质合金、陶瓷可转位刀片周边和双端面刃磨的机床, 适应多种形状可转位刀片的高效高质量磨削。其床身是机床的基础件, 主要用于砂轮架、工作台和转台、头尾架的支撑, 五轴联动工具磨床采用整体式对称结构设计, 使机床具有高刚度、高热稳定性和良好的抗震性等优点。在设计中, 需要对床身结构进行静、动态特性分析和优化, 改进床身结构和筋板的布置形式, 提高机床的整体刚度, 使机床在工作过程中产生的弯曲和扭转低阶固有频率得到提高且振型合理。为了提高设计效率, 作者在 SolidWorks 环境下设计出磨床床身的三维 CAD 模型, 借助 ANSYS 软件建立磨床床身的有限元模型, 并对其进行了静、动态分析及优化, 探讨实现磨床床身结构改进的方法。

1 床身结构及受力情况简介

该磨床采用整体式矩形床身, 用于支撑立、卧回转工作台, 头、尾架, 修整器等部件, 因此床身受到这些部件的压力及自身重力的作用, 同时还受到切削力和运动惯性力的作用。要确保床身受力的变形量在允许的范围内, 必须使床身质量轻、体积小, 以节省材料降低成本, 同时也节省占用的工作空间。文中

所有分析都是把工作台放在导轨中间, 因为此时导轨的变形最大。

该床身是由灰铸铁铸造而成, 材料型号为 HT200, 弹性模量 $E = 1.5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 密度 $\rho = 7200 \text{ kg/m}^3$ 。为了增加机床的刚度, 在床身内部布置了田型筋板, 床身质量 1853.17 kg , 床身底部由垫铁支撑。磨床床身三维实体模型如图 1 所示。

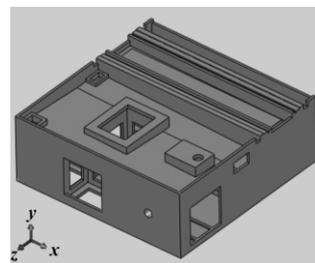


图 1 原磨床床身三维模型

1.1 床身模型简化及有限元模型的建立

建立正确有效的有限元模型是进行结构分析和优化改进的基础。对原模型进行必要的简化可以避免因小孔、小面、倒角等引起局部生成大量的有限元单元, 减少计算量和分析时间, 提高有限元分析的效率。同时删除小凹槽和细长的台阶面, 压缩机床表面间隔小于 5 mm 的间隙, 避免生成坏的有限元单元, 提高计算精度。对床身导轨下方的斜面进行平面化处理, 防止生成有限元模型时结合面出现过渡网格^[5]。

收稿日期: 2011-07-22

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (2010ZX04001-462)

作者简介: 张祥雷 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械设计及理论。E-mail: 591182405@qq.com。

图 2 所示为简化后的模型，采用 ANSYS 提供的 SOLID186 三维实体单元对床身结构进行网格划分。为了获得准确的计算精度，采用 Smart Size 4 级别进行自由网格划分，划分节点总数为 187 037，单元总数为 98 592。

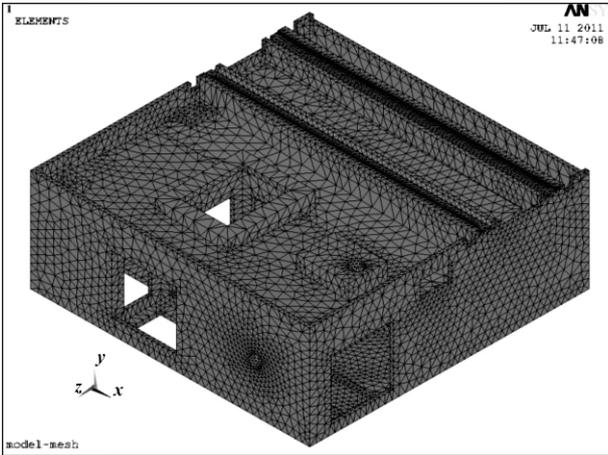


图 2 简化的有限元模型

1.2 载荷与边界条件的确定

床身受到的载荷主要有床身、夹具支撑座、工件、工作台、砂轮修整器和防尘罩的重力以及磨削时产生的载荷，这些载荷以均布载荷的形式加载到相应的作用面上。床身在工作时其底部有 7 个垫铁支撑，可分别对床身底部垫铁处的节点施加全约束，以模拟床身边界条件。

2 磨床床身结构有限元分析

2.1 静态分析及结果分析

根据磨床床身的实际工作情况，在其有限元模型上施加外在工作载荷，将磨削力转化为压力和弯矩加载在导轨上，并加载零件对磨床床身的压力和床身的重力，得到床身变形的结果如图 3 所示。

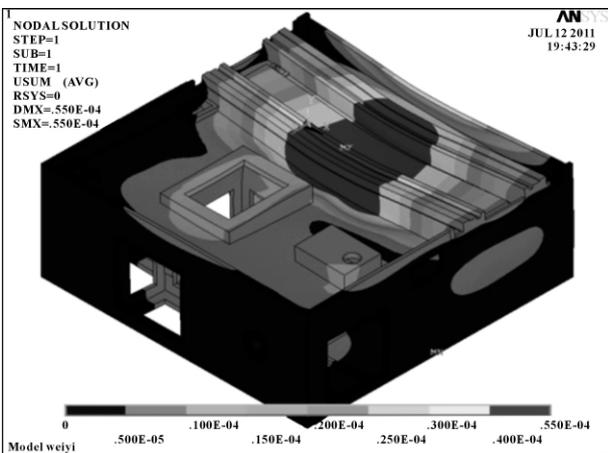


图 3 原床身位移云图

由图 3 可知：磨床床身的最大变形发生在导轨中部，变形量为 55.00 μm ，变形非常大，导轨的刚度不够，需要进行优化。

2.2 动态分析及结果分析

磨床床身结构动态特性是影响磨床产品性能的关键因素之一。在结构动态分析中，低阶模态特性基本决定了产品的动态性能。因此在工程计算中，一般只对几个低阶特征值和相应的特征向量比较关注^[2]。固有频率是结构本身的属性，与外界条件没有关系，因此在提出床身结构固有频率时不需要加上负载，只需要加上垫铁的位移约束。

对原磨床床身进行 ANSYS 模态分析，得到前 4 阶固有频率分别为 211.02、260.34、266.94、331.42 Hz。从模态分析的振型图（图 4—7）中可以看出：第一阶振型为床身中部在 y 轴方向的弯曲，床身中部发生明显的凸起，这不仅影响磨床导轨的进给精度，还将影响到磨床砂轮架的进给精度，影响磨削加工质量。因此需要增强床身中部刚性，可以考虑合理地设计和布置加强筋。第二阶振型为绕 x 轴弯曲，床身的振动较明显，特别是床身右侧排屑口处刚度不足，是振动的薄弱环节，可以考虑在导轨下方增加加强筋或筋板的厚度；床身右侧排屑口部分可以在不影响铸造和加工的条件下，适当减小开口的大小或增加约束以增加其刚性。第三阶振型为绕 x 轴扭转和弯曲，床身的振动较明显，扭转刚度较差，在磨削力的激励下，容易产生扭振，使磨削产生振颤，导致磨削表面质量恶化，处理的方法可与第二阶的处理方法相似。第四阶振型为床身右侧排屑口处发生了明显的弯曲，所以可以考虑适当减小开口的大小或添加约束以增强其刚性。

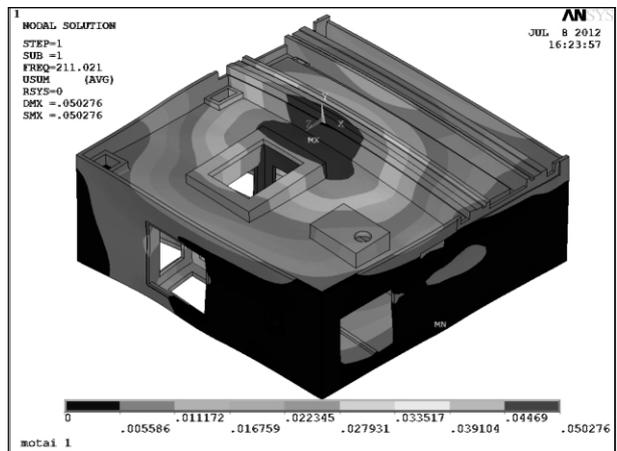


图 4 第一阶模态振型云图

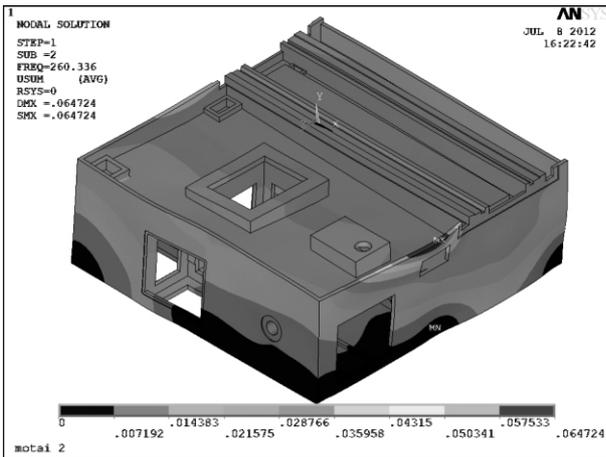


图 5 第二阶模态振型云图

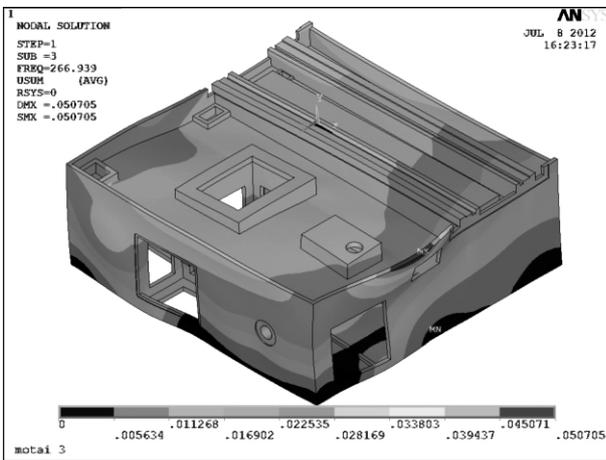


图 6 第三阶模态振型云图

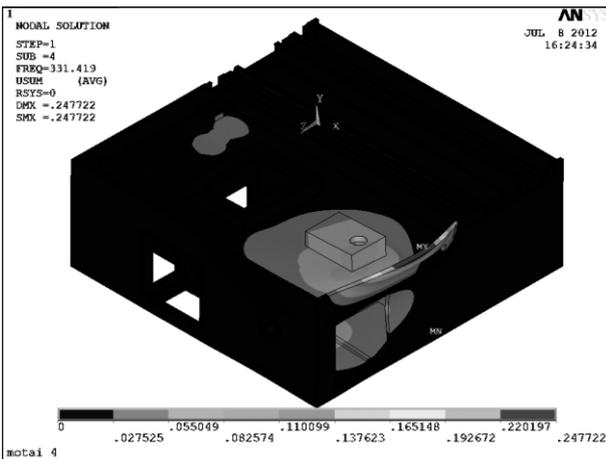


图 7 第四阶模态振型云图

3 床身结构优化

床身结构优化是以提高磨床床身静、动态特性特别是床身导轨部分的刚度为目标，同时保证不更多地提高床身质量为原则，通过改进床身结构尺寸和筋板的布置形式以提高床身刚度，使磨床在加工工件过程产生的弯曲和扭转低阶振型频率尽可能地提高且振型

合理，据此提出以下结构优化方案。

3.1 结构优化的方案

方案一，沿床身导轨方向，在导轨下方增加加强筋。床身的最大变形发生在导轨的中间区域，其变形量过大，考虑在导轨下方增加三角形的加强筋，如图 8—9 所示。

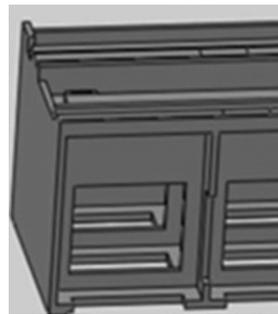


图 8 横向加筋前的床身的剖面图



图 9 横向加筋后的床身的剖面图

方案二，沿垂直导轨方向，在导轨下方增加三角形的加强筋，如图 10—11 所示。



图 10 纵向加筋前的床身的剖面图



图 11 纵向加筋后的床身的剖面图

方案三，填厚导轨下方较薄的部分。由于导轨上方承受了很大的压力，而导轨下方的支撑筋板给予的支撑力度不够，故考虑加厚导轨的本身厚度，以抵抗变形，如图 12—13 所示。



图 12 填平前的床身导轨下方的剖视图



图 13 填平后的床身导轨下方的剖视图

方案四, 导轨下方用近似菱形结构代替田型结构。由于床身原本的支撑结构并不是完全对称, 考虑生产的方便, 采用近似的菱形结构以便与原来的结构相吻合。模型如图 14 所示。

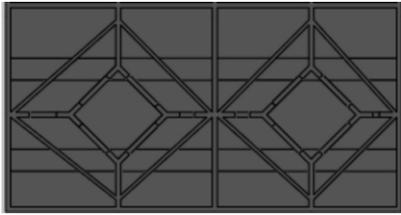


图 14 菱形结构代替田型结构的导轨下方的剖视图

由表 1 所示的磨床床身优化方案的静、动态特性的分析结果可以看出: 和原磨床床身比较, 增加筋板可以大大减少床身的变形, 同时固有频率也会相应提高, 但变化不大。填厚导轨下方薄弱部分虽然在一定的程度上降低了床身的变形位移, 但质量增加较多, 固有频率反而降低, 优化效果不显著。菱形结构可以在较大程度上增强床身的静、动态特性。

表 1 分析结果

	x 轴最大变形 / μm	y 轴最大变形 / μm	z 轴最大变形 / μm	总最大变形 / μm	固有频率 / Hz	质量 / kg
原床身	-12.23	-55.00	36.10	55.0	205.10	1 853.17
方案一	-6.50	-29.55	10.61	29.72	210.48	1 867.17
方案二	-6.06	-28.83	11.60	29.08	210.93	1 867.17
方案三	-6.46	-30.73	10.88	30.74	193.63	2 117.16
方案四	-5.27	-24.32	10.83	24.42	211.86	1 991.04

3.2 床身结构综合改进

综合比较以上 4 种改进方案, 取其最优形式, 提出两种床身综合改进方案: 方案一是在原田型结构磨床床身基础上, 沿导轨方向和垂直导轨方向各自增加加强筋, 并填厚导轨下方薄弱部分; 另一方案是用近似菱形结构代替原田型结构, 并在受力较大区域增加相应的加强筋。图 15 和 16 为优化后的结构剖视图, 图 17 和 18 为优化后的位移云图, 表 2 为分析结果。

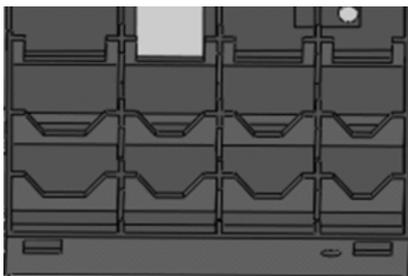


图 15 方案一的结构剖视图

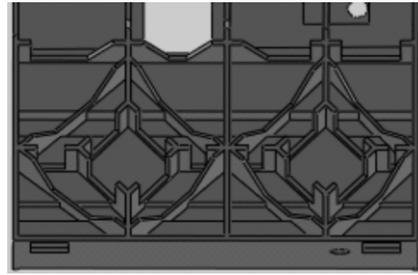


图 16 方案二的结构剖视图

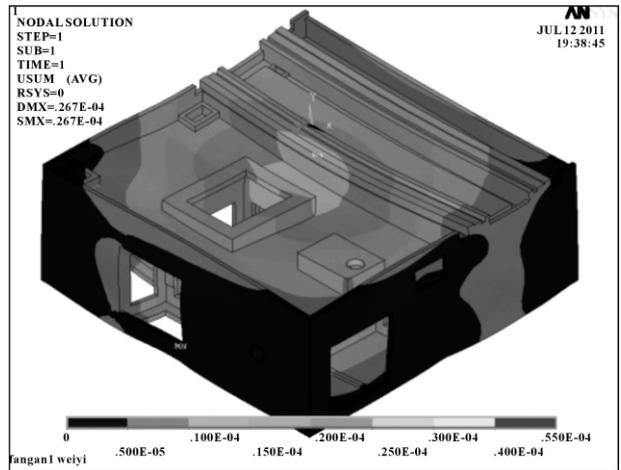


图 17 方案一的位移云图

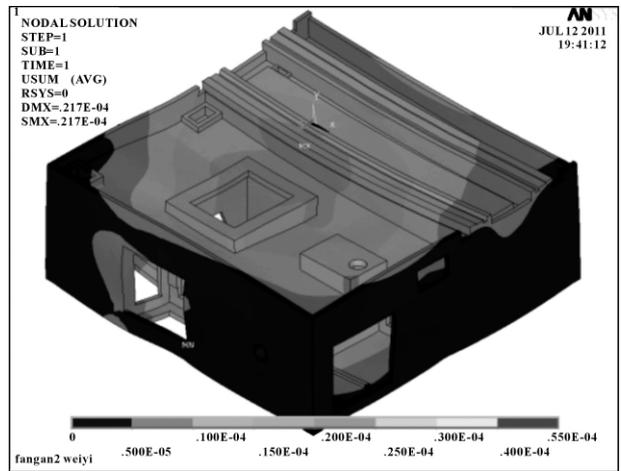


图 18 方案二的位移云图

表 2 综合优化方案磨床床身结构的静力、模态分析结果

	x 轴最大变形 / μm	y 轴最大变形 / μm	z 轴最大变形 / μm	总最大变形 / μm	固有频率 / Hz	质量 / kg
方案一	-5.88	-26.49	10.22	26.66	213.12	1 992.23
方案二	-5.32	-21.55	9.65	21.71	215.34	2 041.09

由表 2 的分析结果可以看出: 和原磨床床身比较, 方案一的床身最大变形减少了 28.34 μm , 相对减少 51.53%, 质量相对增加 7.50%, 固有频率提高 (下转第 26 页)

4 结论

(1) 改进了以往相关研究的实验方法及数据采集方法,使之更加符合实际的切削过程,同时大大减少了数据采集量,有助于进一步开发实用的刀具磨损监测设备。

(2) 通过对声发射信号进行 WPD 分解及重构,用软方法实现常规硬方法实现的多传感器融合,为刀具磨损实用化研究提供了一个新的思路。在此基础上,构造初始特征向量矩阵,进行奇异值分解,求奇异谱构造特征向量,实验结果表明:特征向量可以有效地刻画刀具的磨损特征。

(3) 文中构造的并联集成双网络结构,可以使用相同的特征向量同时在线实现刀具实时磨损量估算及未来 10 s 刀具磨损量预测。采用的 L-M 优化算法与其他算法相比,收敛速度更快、泛化能力更强。

参考文献:

- 【1】LI Xiaoli. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2002 42: 157 - 165.
- 【2】TANSEL I, TRUJILLO M, NEDBOUYAN A, et al. Micro-end-milling—III. Wear Estimation and Tool Breakage Detection Using Acoustic Emission Signals [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1998 38(12): 1449 - 1466.

(上接第 21 页)

0.99%。质量增加较少,变形位移减少却很多,是在原原型结构基础上改进的好方法;方案二的床身最大变形减少了 33.29 μm ,相对减少 60.53%,质量相对增加 10.14%,固有频率提高 2.05%。质量增加较多,但变形减少非常多,磨床床身刚度增加,动态特性得到了相应的提高,不过增加了制造的难度。

4 结语

采用 CAD/CAE 集成技术,建立五轴数控磨床床身的三维模型,导入 ANSYS 有限元软件,以结构的最大变形位移和低阶固有频率为目标对其进行静、动态特性分析与优化,得到了五轴数控磨床床身的满意设计结果,提出两种综合优化方案:第一种是在原床身结构通过加筋、填厚等方法进行优化;第二种是根据工程经验用菱形结构进行优化。该方法可以使设计者根据工程经验充分发挥自己的想象力,在设计中发现缺陷,在探索中改进设计,加快设计过程,避免了样机制造的长周期性和生产成本的增加,大大提高了设计生产的效率。

参考文献:

- 【1】罗卫平. 基于刚柔耦合的数控机床动态特性分析 [J].

- 【3】MARINESCU Iulian, AXINTE Dragos A. A Critical Analysis of Effectiveness of Acoustic Emission Signals to Detect tool and Workpiece Malfunctions in Milling Operations [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008 48(10): 1148 - 1160.
- 【4】高宏力. 切削加工过程中刀具磨损的智能监测技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院 2005.
- 【5】DIMLA D E JR, LISTER P M, LEIGHTON N J. Neural Network Solutions to the Tool Condition Monitoring Problem in Metal Cutting: A Critical Review of Methods [J]. International Journal of Machine & Tools Manufacture, 1997, 37(a): 1219 - 1241.
- 【6】SICK Bernhard. On-line and Indirect Tool Wear Monitoring in Turning with Artificial Neural Networks: A Review of More than a Decade of Research [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2002 16: 487 - 546.
- 【7】杨建国. 小波分析及其工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社 2005: 63 - 133.
- 【8】ALONSO F J, SALGADO D R. Analysis of the Structure of Vibration Signals for Tool Wear Detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2008 22: 735 - 748.
- 【9】SALGADO D R, ALONSO F J. Tool Wear Detection in Turning Operations Using Singular Spectrum Analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology 2006 171: 451 - 458.
- 【10】张德丰. Matlab 神经网络应用设计 [M]. 北京: 机械工业出版社 2009: 259 - 261.

机床与液压 2011 39(5): 118 - 120.

- 【2】王金龙, 王清明, 王伟章. ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析 [M]. 北京: 机械工业出版社 2010.
- 【3】涂振飞. ANSYS 有限元分析工程应用实例教程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2010.
- 【4】陈施光, 赵宏林, 吴智恒, 等. XK713 数控镗铣床整机静动态特性分析 [J]. 机床与液压, 2010, 38(23): 111 - 113.
- 【5】岳崇勤, 郭媛美. 外圆磨床床身结构有限元分析 [J]. 精密制造与自动化 2010(3): 29 - 30.
- 【6】章胜冬, 杨军刚, 张卫红. 薄板结构加筋布局设计的渐进结构优化方法 [J]. 现代制造工程 2009(4): 5 - 9.
- 【7】陈桂平, 文桂林, 崔中. 高速磨床床身结构动态分析与优化 [J]. 制造技术与机床 2009(2): 19 - 23.
- 【8】张镭, 袁广会, 张珂, 等. CKS6125 数控机床床身的有限元研究与分析 [J]. 机床与液压, 2009, 37(7): 171 - 173 223.
- 【9】徐红玉, 侯中华, 肖琪琳. 数控铣床振动模态分析 [J]. 机床与液压 2009 37(7): 189 - 191 214.
- 【10】赵岭, 陈五一, 马建峰. 高速机床工作台面筋板的结构仿生设计 [J]. 机械科学与技术 2008 27(7): 871 - 875.