高速电主轴单元-主轴箱体结合面模态分析与研究

梁兆顺1,李积元1 ,苟卫东2\*,白向娟1

（1.青海大学机械工程学院,青海 西宁 810016；

2.青海华鼎实业股份有限公司,青海 西宁 810000）

摘要：为准确了解高速电主轴的动态特性，提高加工精度。利用ANSYS Workbench建立基于高速电主轴单元-主轴箱体结合面特性的有限元分析模型，又利用吉村允孝法确定结合面的刚度，而后对其进行模态分析和谐响应分析，得出它的固有频率、振型和动刚度。最后采用锤击法试验验证，证明该分析方法的有效性，为产品设计分析提供理论依据。

关键词：动态特性；高速电主轴单元-主轴箱体结合面；模态分析；有效性

中图分类号： 文献标识码： 文章编号：

**Modal Analysis and Research on Joint Surface of High**

**Speed Motorized Spindle Unit - Spindle Box**

LIANG Zhaoshun1,LI Jiyuan1,GOU Weidong2\*，BAI Xiangjuan1

（1.College of Mechanical Engineering , Qinghai University,Xining 810016,China；

2.Qinghai Huading Industries Co., Ltd.,Xining 810000,China）

**Abstract：**In order to exactly comprehend the dynamic characteristics of high-speed motorized spindle,advance the machining accuracy. To establish the finite element analysis model of high-speed motor spindle unit - spindle box joints characteristics based on ANSYS Workbench, then use Yoshimura method to determine the joint stiffness, after that carried on the modal analysis and harmonic response analysis, obtains its natural frequency, vibration mode and the dynamic stiffness. The hammer test proved the efficiency of the method, and provide a theory basis for the analysis and design of product.

**Keywords:**Dynamic characteristics;The joint surface of the high-speed motor spindle unit-spindle box; modal analysis ; Efficiency

高速电主轴作为高档数控机床的核心功能部件，其在机械制造业中的应用越来越广泛，因此电主轴的工作性能成为人们关注的焦点[1-2]。对高速电主轴进行动态特性分析，是提高其性能的重要方法。

经研究可知，机床总刚度的60-80%源自结合面的接触刚度，机床总阻尼的90%以上源自结合面阻尼，结合面的振动占机床振动的60%以上[3]，所以，结合面之间的特性对机床的动态特性影响很大，在产品设计时就应该准确建立结合部特性模型，充分预估其动态特性。

目前，数控机床朝着模块化、高效化和数字化的方向发展，本文针对高速电主轴功

能部件利用吉村允孝法建立基于高速电主轴单元-主轴箱体结合面特性的有限元模型，又基于ANSYS Workbench对其进行动态特性分析，通过试验验证，得出分析方法的正确性。

收稿日期：

基金项目：青海省科技厅计划项目（2015-GX-Q18A）

作者简介：梁兆顺(1991-)，男，硕士，青海大学机械工程学院硕士研究生，研究方向：先进制造技术/数字化设计技术。E-mail：liangzhaoshun1991@163.com

\*通讯作者：苟卫东(1963-)，男，硕士，高级工程师，青海华鼎实业股份有限公司，研究方向：高档数控机床的结构与应用。E-mail：gouwd@163.com

结合面可分为以下三类：固定结合面、滑动接合面和滚动结合面，本文所针对的结合面为高速电主轴单元与主轴箱体的螺栓固定结合面，如图1所示。



结合面

图1 螺栓固定结合面

**1 带有箱体的高速电主轴模态分析**

**1.1 三维建模与网格划分**

文章以某企业的高速电主轴功能部件为例，其最高转速可达15000r/min。首先利用Solid Edge三维软件根据实际尺寸进行有效建模，为了减少计算量和不必要的接触关系，忽略结构中的一些倒角和螺纹，一些极小的零部件直接和主轴单元作为一个整体建模，不单独作为零件进行装配，前后轴承均以定位预紧进行装配[4-5]。另外，考虑到整个主轴单元装配零件复杂且较多，在定义材料时一些次要零件与主轴部件均按照同一材料来定义，其详细参数如下表1所示：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 名称 | 材料 | 密度（kg∙m-3） | 弹性模量（Gpa） | 泊松比 |
| 紧固螺母 | 45号钢 | 7890 | 209 | 0.27 |
| 主轴单元 | 40Gr | 7850 | 206 | 0.30 |
| 箱体 | HT200 | 7800 | 140 | 0.30 |

表1 各部件材料属性

将三维模型导入到ANSYS Workbench平台中，利用四面体网格划分中的Patch Conforming法并将Relevance Center设为Fine进行网格划分，划分结果如图2所示：

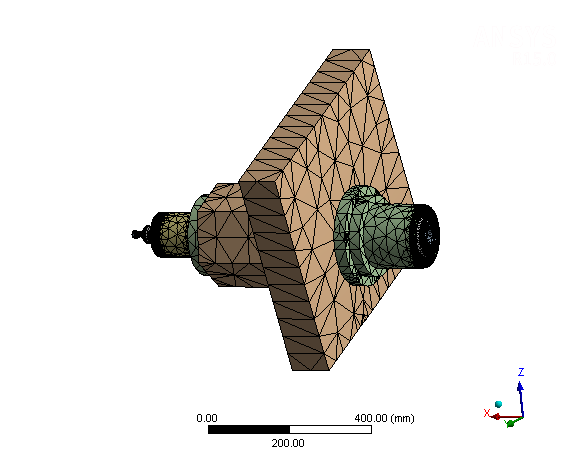


图2 网格划分

从中得出，节点数为1025951，单元数为596879，整体网格质量良好。

**1.2 模型中结合面模拟**

在有限元分析中，通常用一连串弹簧阻尼单元COMBIN14来等效模拟结合面接触特性。高速电主轴单元与主轴箱体的螺栓固定结合面共采用8个螺栓连接，因此对高速电主轴单元与主轴箱体的固定结合面选取8个x、y、z方向的COMBIN14单元[6]。吉村允孝通过实验研究，建立不同单位面积正压力和不同结合条件下结合面的等效刚度和等效阻尼数据库[7]，经查阅得到高速电主轴单元与主轴箱体固定结合面的法向单位接触面积的等效阻尼系数c2和等效接触刚度k2，以及切向单位接触面积的等效接触刚度k1和等效阻尼系数cl，经过积分公式（1）计算后，求得结合面特性参数值，如下表2所示。



（1）

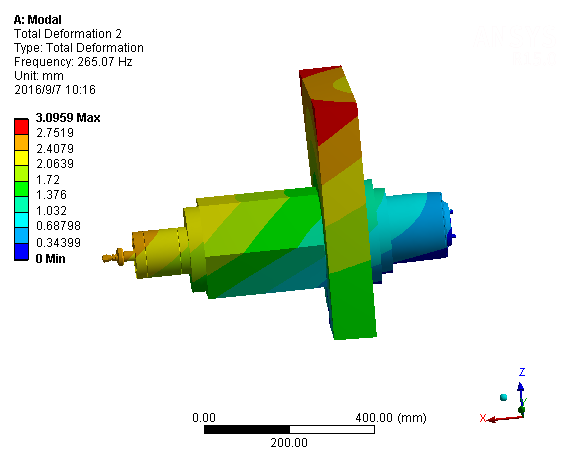
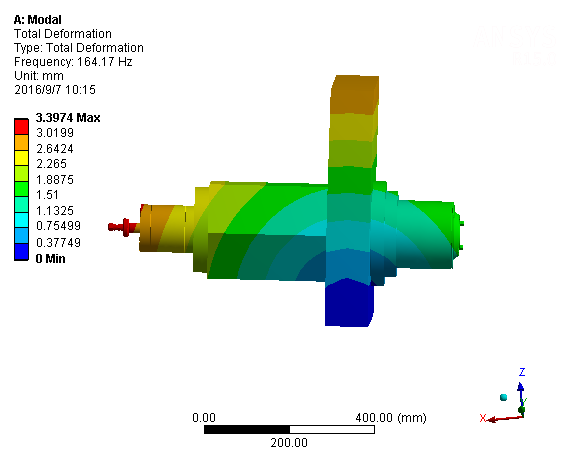
式中，K1为法向等效刚度，C1为法向等效阻尼，K2为切向等效刚度，C2为切向等效阻尼。

表2 固定结合面特性参数值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| K1×106  （N·m-1） | C1/（N·s·m-3） | K2×1012  （N·m-1） | C2/（N·s·m-3） |
| 16.5 | 8266 | 38 | 380 |

**1.3模态分析**

根据1.2所求，进行边界条件模拟和模态分析，结合主轴转速，求解分析其前二阶振型，结果如图3所示。



（a）一阶振型 （b）二阶振型

图3 电主轴前二阶振型

详细数据如下表3所示

表3 振型数据

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 阶次 | 1 | 2 |
| 频率(Hz) | 164 | 265 |
| 振型 | 平动 | 一阶弯曲 |
| 对应转速(r/min) | 9840 | 15900 |

从结果可以看出，考虑高速电主轴单元-主轴箱体结合面特性的该型号的电主轴，在10000r/min和15000r/min左右运转时将发生共振。振型主要为主轴箱体做出明显的前后摆动和绕X轴扭曲变形。此振动直接对部件的安装定位精度造成影响，进而影响加工质量。可以通过提高螺栓预紧力或增加螺栓安装数目的方式，改善结合面的刚度，降低振动的变形。

**2 带有箱体的高速电主轴谐响应分析**

谐响应分析是一种时域分析，是在正弦变化的简谐载荷作用下的稳态响应。简谐载荷可以采用频率、相位角和幅值来描述，也可以通过频率、实部和虚部来表示，本文利用前者来描述，其形式如（2）式所示：

 （2）

式中p1—幅值，ω—频率，φ—相位角。

幅值的大小等于刀具加工时受到的切削力F，以端面铣刀为例对F进行求解，其受力情况如图4所示



图4 端面铣刀受力示意图

切削力F是三个方向力的合力。其中Fc为主切削力，影响着整个加工过程和加工质量，是三个分力中最大的；Fp为法向切削力，是假定工作面上的垂直分力，不消耗功率；Fo是轴向铣削力，作用于主轴方向。根据牛顿第三定律，切削力F又可以分解为三个分力，水平纵向进给力Ff是刀具进给方向上的力，影响铣床纵向进给；Fe为水平横向进给力，影响横向进给；Fv是垂直进给力，作用在机床升降台运动方向上。以上各分力可写成如下公式：  （3）

在实际加工过程中，Fc是整个切削力的主要分力和主要影响因素，因此，在计算过程中可以忽略其它两个分力，直接用主切削力Fc代替F。本文所针对的端铣刀具是直径为125mm，齿数为6的硬质合金端面铣刀，切削试件材料是HT200，硬度为HB290。经研究，力Fc可由如下公式求出[8]：  （4）

ap——背吃刀量，取50mm； fZ——每齿进给量，取0.2mm/z；

ae——侧吃刀量，取5mm； Z——铣刀齿数，取6；

d0——铣刀直径，取125mm； KFC——铣削力修正系数，查资料后取1.15；

带入求得FC=1486N。激振力的频率ω=6n/60=1500Hz，φ近似为零值，至此，确定整个简谐载荷。

在上述模态分析的基础上进行谐响应分析，因为一阶固有频率为164Hz，设置频率范围为0-400Hz，步长为10Hz。另外，在Magnitude栏中输入1486N，相位角为0°，然后进行谐响应分析计算。经过后处理，得出整个范围内主轴轴端相应的折线位移曲线图如图5所示。

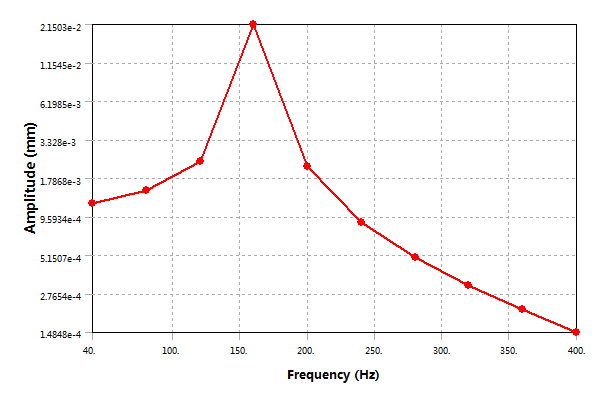
****

图5 轴端位移曲线图

从折线位移曲线图来看，当激振频率从40Hz上升到164Hz时，其变形量逐渐增大，在164Hz时达到整个频率段的变形最大量，大小为21μm，因为此时是电主轴单元的一阶固有频率，故振动量最大，经计算动刚度大小为71N/μm，根据有关标准[9]能够满足加工精度需求。当频率在164Hz与400Hz之间时，其变形量逐渐减小，随着到达二阶固有频率265Hz时，变形量略有增大，但由于主轴各方面系统的逐渐稳定，变形量变化不明显。本型号的电主轴最高转速可达15000r/min，由图可知，当频率为250Hz，电主轴达到最高转速，此时的位移量约为0.85μm，计算出动刚度为1748 N/μm，具有良好的动刚度。因此，此型号的电主轴完全可以达到最高转速。

**3 模态分析试验研究**

模态试验方法有锤击法、MIMO激振器法、纯模态法和工作模态法。本试验采用锤击法[10]，其特点在于简单易实施，适用于钢硬的结构，另外测试时不附加其它质量，不会影响被测件的动态特性，提高了测试精度。试验用力锤敲击电主轴前端，利用三轴加速度传感器和LMS采集系统对其进行数据的采集、处理和分析。实验原理如图6所示：



图6模态分析测量与分析系统的

主要仪器和流程

为了保证测试的精确性，试件安放在专门的隔振器上面，另外，在电主轴前半部分布置12个检测点，每个检测点粘贴一个三轴加速度传感器，如图7所示。根据检测点和被测件的实际尺寸建立结构模型，如图8所示。按照图6所述原理连接硬件设备，并做以下调节设置：在调节带宽设置时，通过锤击试件，检查带宽的选择，确定选用钢制锤头；力锤敲击各检测点时，应基本一致，每个检测点敲击5次，取平均值，从而减小系统非线性或噪音信号等因素对结果的影响；为保证完美的测试，选取自动拒绝过载激励和双击；对激励信号进行加窗设置，选择加窗函数以提高信噪比，解决泄漏问题；为了提高测试置信度，对输出和输入信号做相干函数性分析。

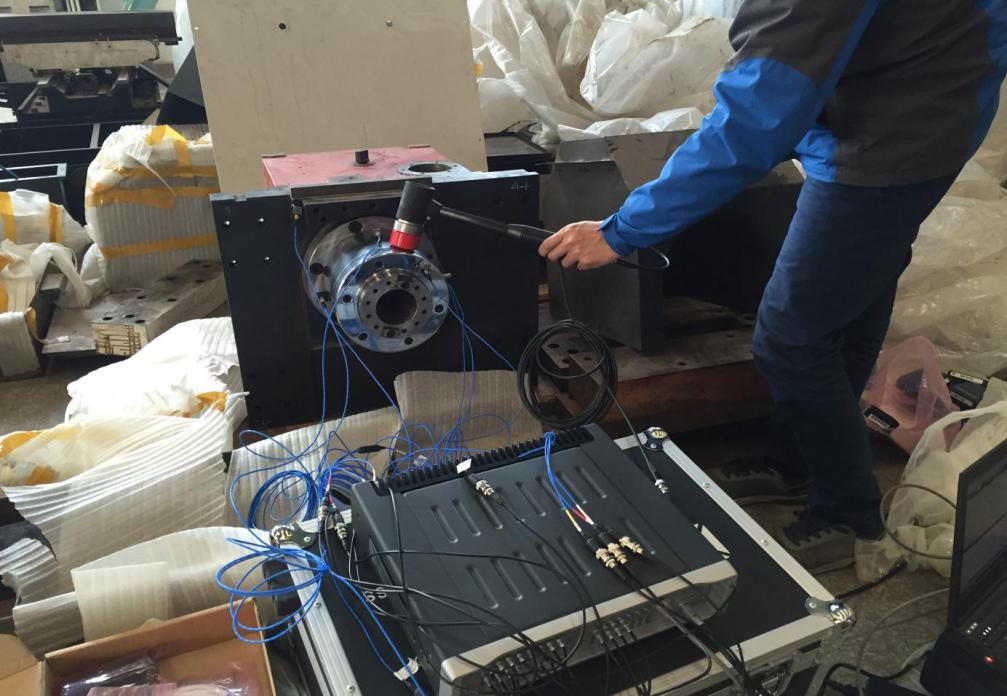
****

图7 模态分析操作图

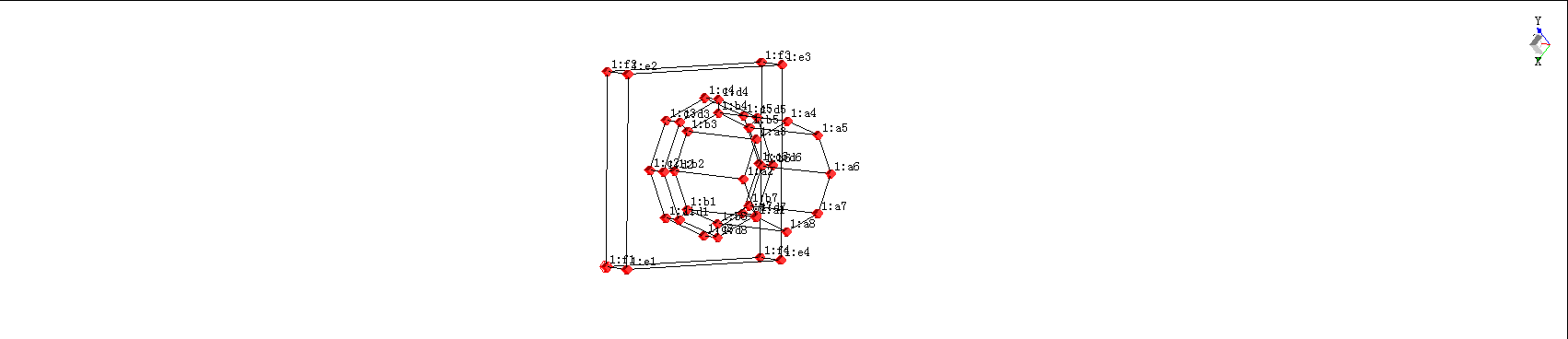
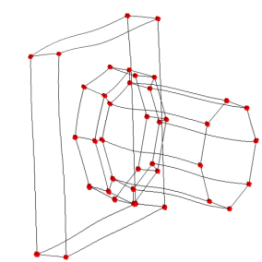
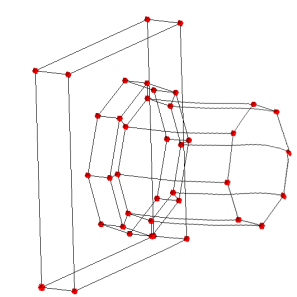


图8 模态分析结构模型

试验时，用力锤敲击电主轴前端，利用LMS采集处理系统完成对测试信号的频响函数测量，而后作数据调理，输入平滑参数在原始曲线上作平滑和曲线拟合。最终通过A/D转换显示在计算机上，得到激励载荷下的频率响应曲线和主轴的固有频率，如下图9所示，对应的结构模型振型如图10所示。



图9 频响函数曲线稳态图



（a）一阶振型 （b）二阶振型

图10 前两阶结构振动模型

由上图可知，电主轴在180Hz和230Hz左右时X、Y、Z三个方向均出现一个最高的峰值和一个较小的峰值，180Hz之前出现的峰值可视为系统误差，忽略不计。由此得出电主轴单元的一阶模态固有频率为180Hz,二阶模态固有频率为230Hz，与前面有限元分析得出的数值对比如下表4所示。

表4 计算与实验模态结果对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 阶数 | 计算（Hz） | 实验（Hz） | 误差（%） |
| 1 | 164 | 180 | 8.9 |
| 2 | 265 | 230 | 15.2 |

从表中可以看出，一阶的实测结果与计算结果误差非常小，虽然二阶误差稍大，但是二阶在实际应用中出现的频率较小，所以，可以得出实验结果有力的验证了模态分析建模的有效性。

**4 结论**

利用吉村允孝法，经过对基于高速电主轴单元-主轴箱体结合面特性的有限元模型进行分析得到它的动刚度、固有频率和振型，总结出该型号的电主轴具有较好的动态特性，但是其固有频率较低，在10000r/min或15000r/min左右运转时易发生共振，可以通过提高刚度、减少质量的方法提高其固有频率。采用方便快捷的锤击法验证了分析方法的合理性和有效性。本文对高速电主轴的模态分析与研究，为下一步的优化设计提供必要的理论依据。

**参考文献**

[1] 姚华.[数控机床高速电主轴的研究进展](http://epub.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?QueryID=0&CurRec=34&DbCode=CJFQ&dbname=CJFD2010&filename=ZJYC201008046&urlid=&yx=" \t "http://epub.cnki.net/kns/brief/_blank)[J].机床与液压，2004（2）5-6.

YAO Hua.The Situation of High Speed Motorized Spindle of CNC Machine Tool[J].Machine Tool & Hydraulics,2004（2）5-6.

[2] 严道发.电主轴技术综述[J].机械研究与应用，2006,19（6）：1-3.

Yan Daofa. Summarization of electronic spindle[J].

Mechanical Research & Application，2006,19（6）：1-3.

[3] 张学良，徐格宁等.机械结合面静动态特性研究回顾及展望[J].太原重型机械学院学报，2002,23（3）276-281.

[4] 文怀兴，崔康.基于ANSYS Workbench的高速电主轴静动态性能分析[J].组合机床与自动化加工技术，2012（12）：49-52.

WEN Huaixing ,CUI Kang.Static and Dynamic Characteristic Analysis of High-speed Motorized Spindle Based on ANSYS Workbench[J].Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2012（12）：49-52.

[5] 米良，胡秋等.基于主轴轴承运行刚度的高速主轴动力学建模[J].机床与液压，2014，42（10）：1-5.

MI Liang,HUQiu,etc.Dynamic Characteristic Analysis of Motorized Spindle Based on Bearing Dynamic Stiffness[J].Machine Tool & Hydraulics，2014，42（10）：1-5.

[6] 王禹林，吴晓枫等.基于结合面的大型螺纹磨床整机静动态特性优化[J].振动与冲击，2012,31（20）：147-152.

WANG Yulin，WU Xiaofeng,etc.Static and dynamic characteristics optimization for a whole large-sized thread grinder based on joint surface[J].Journal of Vibration and Shock，2012,31（20）：147-152.

[7] 廖伯瑜，周新民等.现代机械动力学及其工程应用[M].北京：机械工业出版社，2004.

[8] 韩荣第.金属切削原理与刀具[M].哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2007：199-201.

[9] JB/T 1081.3-2007电主轴第3部分：数控车床用电主轴[S].

[10] 袁胜万，崔岗卫等.高速机床主轴—轴承系统动态性能研究[J].机床与液压，2014,42（10）：38-41.

YUAN Shengwan，CUI Gangwei，etc.Research on Dynamic Performance of Spindle-Bearing System of High Speed Machine Tool[J].Machine Tool & Hydraulics，2014,42（10）：38-41.