

# 电主轴动态特性分析

梁小明

(1. 西安文理学院机械与材料工程学院 陕西西安 710065; 2. 陕西省表面工程与再制造重点实验室 陕西西安 710065)

**摘要:** 主轴是电主轴系统中的关键部件, 其动态特性是影响主轴性能的主要因素。在进行电主轴设计时, 不仅要考虑到其静态特性, 而且还应充分考虑其动态特性。本文主要对某款型号为 KX-300 的电主轴进行了动态特性分析。首先, 通过有限元分析软件 ANSYS 对其进行建模和网格划分, 并利用 Ansys Workbench 对其进行模态分析; 然后, 通过计算获得了其前六阶固有频率和振型; 最后, 通过模态试验对其固有频率进行了验证。

**关键词:** 电主轴; 动态特性; 模型建立

**引言:** 机床主轴作为机床的关键部件, 其性能直接影响着机床的加工精度、加工效率和加工质量。现代高速精密加工技术的发展对主轴部件提出了更高的要求, 其动态特性是影响主轴精度和切削稳定性的主要因素。国内外学者对此进行了广泛而深入的研究, 并提出了相应的改进方案。国内学者研究了基于有限元理论、现代计算技术、试验技术等多种方法对高速精密电主轴进行分析与设计。

## 一、电主轴有限元模型的建立

ANSYS 是一款应用广泛的结构有限元分析软件, 它是以数学、物理和工程力学为基础, 集设计、计算、分析和仿真于一体, 具有结构有限元分析、热分析、流体动力学分析、动力学分析和优化设计等功能。ANSYS 具有良好的结构耦合特性, 能与其他软件很好地集成。本文所使用的 ANSYS 是 APDL 语言编写的有限元分析程序, 该程序可以实现建模和网格划分的自动控制, 具有较高的计算精度和效率。根据实际情况, 本文将电主轴简化为空心圆柱体, 利用 APDL 语言编写了三维实体模型的几何处理模块。将实体模型导入到 ANSYS 中, 利用 APDL 语言编写了前处理模块。根据实际情况对主轴进行了网格划分。为使主轴模型具有较高的计算精度, 采用四边形单元和三角形单元来划分网格, 且将主轴划分为 4 个自由度的节点自由度 (6 个自由度), 将主轴分为 6 个质量块单元 (质量为 0.22 kg)。然后根据实际情况将主轴进行了固定约束和自由约束。

### 1.1 单元属性

在 ANSYS 中, 定义了六个质量块单元 (mass body element), 单元类型分别为: 四面体 (4 plane), 正方形 (4 pine), 圆柱 (6 pine), 圆形 (6 curves), 正方形+圆柱体 (6 pines), 正方体+圆柱体+圆球 (6 pines+6 vectors), 六面体类单元。

六面体单元具有很高的刚度和强度, 但是结构比较复杂。圆柱单元由于是线弹性材料, 具有良好的弯曲特性, 但是在受力时会发生弯曲变形。因此需要对其进行拉伸变形和压缩变形分析。对六面体单元进行拉伸和压缩的分析, 以得到主轴在受力时的变形情况。

### 1.2 网格划分

通过 ANSYS 软件的前处理模块, 可建立有限元模型, 并进行网格划分, 如图 1 所示, 其单元大小和网格尺寸参数根据实际情况而定, 在本模型中, 采用四边形单元和三角形单元来划分网格, 且

将主轴划分为 4 个自由度的节点自由度 (6 个自由度)。主轴采用了六面体单元和三角形单元进行网格划分。



图 1: 网格划分

为了提高有限元模型的计算精度, 将电主轴的各个部件进行了连接。为了方便计算, 在各个部件之间建立了刚性连接。

### 1.3 边界条件

为研究主轴的动态特性, 建立了电主轴的固定约束和自由约束, 其中固定约束包括: ①轴上轴承孔内圆心在轴线上的相对位置; ②主轴的轴向载荷; ③主轴与刀柄之间的连接处; ④主轴与底座之间的连接处; ⑤主轴与刀架底座之间的连接处; ⑥电机轴与主轴连接处; ⑦电机轴与刀柄连接处。自由约束包括: ①轴承孔内圆心在轴线上的相对位置; ②轴承孔内圆心在轴线上的相对位置; ③主轴与刀柄连接处的约束; ④主轴与刀柄之间的连接处, 考虑到电主轴与刀柄连接处受力大, 不能直接施加约束, 需要施加边界条件。根据主轴和刀柄连接处的尺寸参数, 在 ANSYS 中定义了六个节点自由度。其中节点 2、4、6 分别定义为轴向、径向和切向自由度, 节点 5 定义为横向、竖向自由度, 节点 8 和 9 分别定义为径向、切向自由度。在 ANSYS 中建立了电主轴的 6 个单元, 分别对应 6 个自由度。

## 二、主轴的模态分析

主轴模态分析是根据已知的主轴固有频率和振型来确定主轴的动态特性, 分析结果可以为电主轴结构的设计和改进提供重要参考。本文主要对电主轴进行模态分析, 首先, 应用有限元分析软件 ANSYS 建立了主轴的有限元模型, 并将其划分成节点数为 1902 的实体单元, 然后定义其材料属性为: 密度为 1350 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 1845 MPa, 泊松比为 0.3, 密度和弹性模量都是定值。接着, 将

网格划分完成的模型导入到 ANSYS 中进行设置。最后,将单元属性赋予后在 ANSYS 中进行模态分析,如图 2 所示。

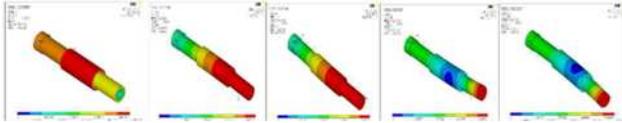


图 2 模态分析

### 2.1 前六阶固有频率与主轴转速之间的关系

通过对主轴系统前六阶固有频率的计算,发现其前六阶固有频率与主轴转速之间存在一定的关系。为了确定主轴系统的最佳工作转速,需要确定主轴系统的前六阶固有频率与主轴转速之间的关系。

前六阶固有频率随着主轴转速的提高而提高,并且其对应的前六阶固有频率也会随着主轴转速的提高而升高,这说明在进行电主轴结构设计时,必须在保证电主轴的整体刚度和稳定性以及满足加工精度要求的前提下,确定合适的主轴转速。而且前六阶固有频率与主轴转速之间存在一个最佳工作转速,即当电主轴转速大于最佳工作转速时,前六阶固有频率随主轴转速增加而升高;当电主轴转速小于最佳工作转速时,前六阶固有频率随主轴转速增加而降低。

### 2.2 主轴结构的改进

主轴的一阶固有频率为 24.951 Hz,二阶固有频率为 35.534 Hz,三阶固有频率为 27.423 Hz,四阶固有频率为 24.723 Hz,五阶固有频率为 25.517 Hz。主轴前四阶振动都很小,而五阶振动明显增大。主轴的一、二、三阶的振型都是以二次振动为主,而四阶振型以一次振动为主。主轴的一、二、三阶振型均表现出较强的周期性,因此,电主轴在工作时必须要有足够大的刚度和足够小的质量。本文通过改变主轴的结构来改善主轴的固有频率和振型,例如增加支承系统的刚度、减小主轴质量等。当然,这些都是在保证主轴工作性能前提下进行的结构改进。通过改变主轴的结构,可以提高主轴系统的固有频率和振型,从而提高了电主轴系统在工作时的稳定性和可靠性。这是目前比较常见也比较有效地一种方法。

## 三、模态试验

模态试验是通过锤击法获得主轴系统的固有频率、振型及相应振型的一种试验。本文采用激振器激励法,通过测试系统获得了主轴系统的自由振动,并在此基础上进行模态分析,主轴系统的前六阶固有频率分别为:1~3 阶、4~6 阶、7~8 阶、9~10 阶、11~12 阶以及 13 阶,该电主轴前六阶固有频率为:1~3 阶模态振型为:1~3 阶弯曲振动;4~6 阶模态振型为:4~6 阶弯曲振动;7~9 阶模态振型为:7~9 阶挠性振动;10~12 阶挠性振动。由此可以看出,该电主轴前六阶固有频率与理论计算值吻合较好,验证了前六阶固有频率与理论计算值相吻合。

### 3.1 实验测试

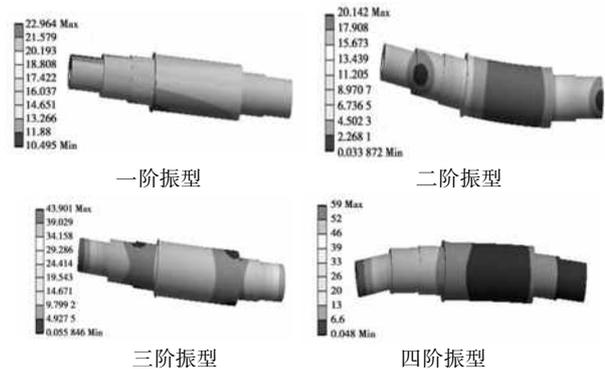
通过在测试系统中加载振动台,在主轴上施加激振力,激励力的大小根据主轴的振动情况确定,通过改变激振力的大小可以调整主轴系统的固有频率和振型。在加载方式上,分别采用了自由加载、等效激励和对称加载方式。其中,自由加载方式可以让主轴系统自由地在一个无约束或有约束的状态下工作。等效激励方式是通过改

变激振力的大小来改变主轴系统在不同模态下的固有频率,避免了激振力大小对固有频率的影响。对称加载方式是将主轴系统作为一个整体来施加激励,由于该主轴系统处于无约束或有约束状态下工作,其振动情况较自由状态下更为复杂,故采用对称加载方式。当激振力的大小改变时,主轴系统将产生不同频率和不同振型的固有频率和振型。

### 3.2 数据分析

#### 1)电主轴固有频率和振型的变化规律

电主轴系统的一、二阶固有频率变化不大,但三、四阶固有频率明显增大。其振型呈 1~3 阶弯曲振动,4~6 阶为扭转振动,7~9 阶为挠性振动。这是由于电主轴在工作过程中,会产生振动,且不同的工作状态下其振动规律也不一样。当主轴处于 1 阶弯曲模态时,主轴的一、二阶固有频率相差不大,但三、四阶固有频率相差较大;当主轴处于 2 阶挠性模态时,主轴一大,但三大。在整个工作状态下,电主轴的一、二、三、四阶固有频率分别为 1~3 阶、4~6 阶、7~9 阶和 10~12 阶。



#### 2)电主轴各阶振型

电主轴的前六阶模态振型基本一致。随着转速的增加,电主轴各阶模态的振型逐渐增强,其中 1~3 阶振型变化不大;4~6 阶振型以扭转为主;7~9 阶振型以弯曲为主;10~12 阶振型以弯曲为主。由此可见,电主轴前六阶固有频率与转速的关系为一种近似线性关系。

结束语:在对电主轴进行动态特性分析时,应充分考虑电主轴系统中各零部件之间的耦合作用,并对各零部件进行合理的布置和优化。在进行电主轴动态特性分析时,还应考虑到其与外界环境之间的耦合作用。如果外界环境存在较强的激励或干扰时,则应对电主轴系统进行适当的处理。

### 参考文献:

[1]王华国,赵鹏宁.定向装配法在精密主轴装配中的应用[J].机床与液压,2012(40).  
[2]吴玉厚.数控机床电主轴单元技术[M].北京机械工业出版社,2011.  
[3]徐金方,龙晓林.高速切削加工中电主轴的运用[J].设备管理与维修,2004(1):34.  
西安市科技计划项目:基于 LMS 系统的电主轴动态特性分析(21XJZZ00067)