

# 高速龙门加工中心摆角铣头动态特性分析\*

陈 艳 张 松 赵 滨 王乾俸

( 山东大学机械工程学院 , 高效洁净机械制造教育部重点实验室 , 山东 济南 250061 )

**摘 要:** 首先借助动态信号采集分析系统 , 对高速龙门加工中心摆角铣头进行锤击实验 , 确定了其固有频率及振型; 然后对机床进行空运转实验与切削实验 , 通过数据的对比分析 , 确定了机床受迫振动的振源与摆角铣头结构的薄弱环节; 最后针对测试结果提出相应的减振方案 , 为该龙门铣床摆角头的结构优化设计以及提高机床的加工精度提供了参考和依据。

**关键词:** 摆角铣头; 动态测试; 振动

**中图分类号:** TH161 + .6      **文献标示码:** A

## Dynamic characteristic analysis for angularly deflecting milling head of high speed gantry machining center

CHEN Yan ZHANG Song ZHAO Bin WANG Qianfeng

( Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture ( Ministry of Education ) ,  
School of Mechanical Engineering , Shandong University , Ji' nan 250061 , CHN )

**Abstract:** In order to find the sources of forced vibration in the machine tool and the structure weakness , the experimental modal analysis of angularly deflecting milling head of five axis linkage gantry milling machine was carried out. Firstly , the natural frequency and vibration mode are obtained through the pulse hammer experiment. Secondly , the vibration sources and the structure weakness are found out by means of free running experiment and cutting experiment at different spindle speed. Finally , some decreasing vibration methods are proposed , which offer reference and basis for reforming the structure of angularly deflecting milling head and enhancing machining accuracy.

**Keywords:** angularly deflecting milling head; dynamic test; vibration

摆角铣头是五轴加工中心的核心功能部件之一 , 其结构和性能在很大程度上决定了整台数控机床的加

工性能 , 因此成为五轴联动数控机床市场竞争的焦点之一。

### 3 选用

选用空气放大器冷却形式具有以下特点: ( 1 ) 只利用压缩空气 , 出口处空气流量能比进口处空气流量大 25 倍 , 低噪音、可靠。 ( 2 ) 原理、调整和操作简单 , 易实现。 ( 3 ) 使用寿命长 , 成本低 , 基本免维护。

### 4 结语

通过大量实验和应用 , 利用激光干涉仪测得两种状态数据进行比较 , 滚珠丝杠的热延伸量可减小近 50% , 这对各类数控机床的滚珠丝杠因温升而引起的

轴向延伸的改善解决 , 探索出一个简单、可操作和行之有效的办法。

### 参 考 文 献

- [1] 刘永平 , 陈桢 , 芮执元. 高速滚珠丝杠副气液二元冷却系统设计与仿真[J]. 中国机械工程 2013( 1 ) : 95 - 98.
- [2] 芮执元 , 张传辉 , 郭俊峰. 基于有限元法的中空冷却滚珠丝杠温升及热变形研究[J]. 机械设计 2011( 12 ) : 17 - 20.

第一作者: 郑卫, 男, 1960 年生, 总工程师, 从事机械设计和产品研发。

( 编辑 李 静 )

( 收稿日期: 2014 - 03 - 18 )

文章编号: 140722

如果您想发表对本文的看法 , 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

\* “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项( 2012ZX04006011 )

表1 每个测点所对应的测试通道及方向

测点	1			2			3			4		
通道	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
方向	$x +$	$y +$	$z +$	$x +$	$y +$	$z +$	$x +$	$y +$	$z +$	$x -$	$y +$	$z -$

目前对于机床结构性能的研究,主要集中在通过实验模态分析法或工作模态分析法对结构进行动态参数识别,获取结构的固有频率及振型,并通过振动测试确定结构的振源与薄弱环节或者诊断机床故障<sup>[1-5]</sup>。

为确定五轴联动龙门铣床的动态性能参数,找出该机床振动的主要振源及其重要功能部件摆角铣头结构的薄弱环节,本文借助动态信号采集分析系统,首先对五轴高速龙门加工中心摆角铣头进行了模态实验,确定了其固有频率及振型;然后对机床进行了空运转实验与切削实验,确定了机床受迫振动的振源与摆角铣头结构的薄弱环节;最后针对实验结果提出了相应的减振方案,为提高机床的加工精度提供了参考和依据。

## 1 实验设计

### 1.1 数控机床

本实验的测试对象为五轴联动高架式龙门镗铣加工中心的摆角铣头部件(图1)。该加工中心包括 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三直线轴以及绕 $X$ 轴旋转的 $A$ 轴、绕 $Z$ 轴旋转的 $C$ 轴。通过 $A$ 轴、 $C$ 轴与 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴的组合联动,可实现多面体和曲面的加工。

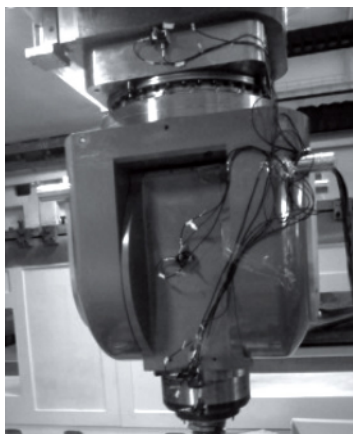


图1 摆角铣头

### 1.2 动态测试方案

#### 1.2.1 测试仪器及流程

测试装置采用动态信号测试分析系统,如图2所示,主要包括:DH5922信号测试采集系统,DH131E加速度传感器和力锤等。测试流程图如图3所示。

#### 1.2.2 模态测试



图2 实验现场布置图

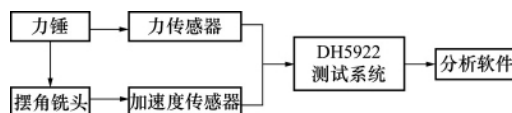


图3 模态分析测试系统框图

在停机状态下对摆角铣头进行锤击实验。本次实验使用单点激励、多点拾振的方法,对实际工况约束下的摆角铣头进行实验模态分析。

根据摆角铣头的结构特点,以不遗漏模式而又尽可能简化为原则<sup>[6]</sup>,本次实验共布置了32个测点,如图4所示,每个测点处均采用3个加速度传感器分别测量 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 这3个方向的加速度如图5所示。每个传感器对应一个通道(如表1),因此本实验共需要96个通道,分8批次分别进行信号采集。为保证结果的正确性,每批次均进行4次数据采集,在结果分析中取平均值。激励点选在垂直滑枕的背面如图4所示。

#### 1.2.3 空运转条件下的动态特性测试

机床空运转时的振动与切削加工无关,主要是由机床传动系统或外部因素引起的,因此,我们在进行加工工况下测试与分析之前,先对空转时的振动信号进行测试与分析。

如图6所示,分别在摆角铣头端部、摆角铣头近端部、摆角铣头中部(连接部位)、垂直滑枕端部等4个几何位置布置测点。每个测点处均采用3个加速度传感器分别测量 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 这3个方向的加速度。表1为每个测点所对应的测试通道及方向。进行空转振动响应测试时,为保证结果的准确性,分别测试在转速为1 000 r/min 2 000 r/min 4 000 r/min时各测试点的响

应信号。

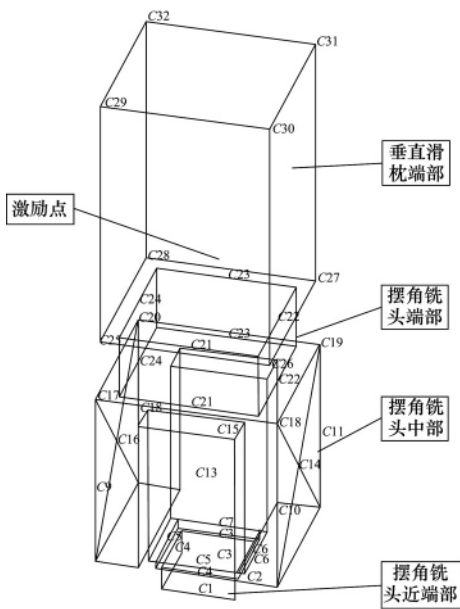


图4 测点布置图



图5 测点处各方向传感器布置示意图

1.2.4 切削条件下的动态特性测试

为找出切削过程中主要振源及振动位移量的大小,对摆角铣头进行直线切削实验与“S”形曲面切削实验。测试过程中测点的布置与空运转测试中相同。

切削过程中刀具选用 WPE20 铣刀,刀片数为 4,直径 20 mm,刀长(加刀杆)为 300 mm。切削参数选择该型号加工中心实际加工中常用的加工参数,即进给速度 1 000 mm/min。分别测试切深 10 mm,主轴转速为 1 000 r/min 2 000 r/min 4 000 r/min 时沿 Y 方向水平切削,以及切深 1 mm,主轴转速为 2 000 r/min,切削“S”形曲面时各测试点的响应信号。切削“S”形曲面所用试件如图 7 所示。

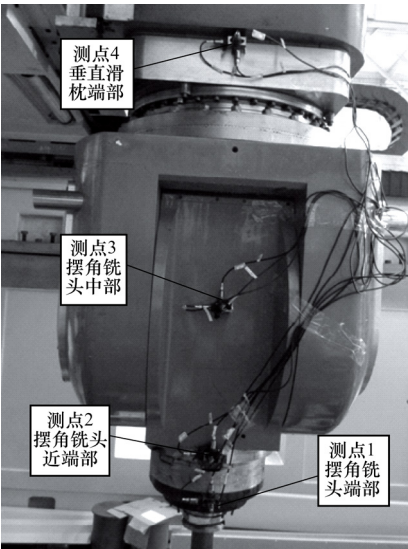


图6 空运转实验测点布置图

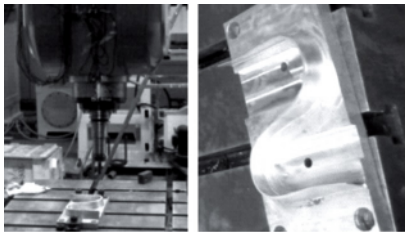


图7 “S”形切削图

表 2 摆角铣头前六阶模态频率及振型

阶次	频率/Hz	振型描述			
		垂直滑枕部位	连接部位	摆角铣头近端部位	摆角铣头端部
1	28.11	绕 Z 轴扭转	沿 Y 方向同时收缩或扩张	上部沿 X 方向摆动	沿 X 方向弯曲
2	95.57	绕 Z 轴扭转	沿 Y 方向同时收缩或扩张	绕 Z 轴扭转	沿 X 方向弯曲
3	123.8	沿 X 方向平移振动	沿 X 方向弯曲	绕 Z 轴扭转	沿 X 方向弯曲
4	154.37	绕 Z 轴扭转	沿 X 方向弯曲	绕 Y 轴扭转	沿 Z 方向弯曲
5	497.7	绕 Z 轴扭转	沿 X 方向弯曲	上部沿 X 方向摆动	沿 X 方向弯曲
6	543.67	绕 Z 轴扭转	沿 X 方向弯曲	上部沿 X 方向摆动	沿 X 方向同时收缩或扩张

## 2 结果分析

### 2.1 模态分析

经过 32 次锤击,得到 32 个测点的加速度响应信号,并进行频响分析<sup>[7]</sup>,得到各批次频响函数的幅值-频率曲线(图 8)。表 2 为摆角铣头的前 6 阶固有频率与振型描述。模态振型如图 9 所示。从图 9 中可以看出各阶模态频率在连接部位与摆角铣头端部的位置振型比较明显,说明这些位置在受到外界振动激励时容易产生结构变形,如果结构的变形干扰了机床的正常运转,说明结构需要改进,以减小这种变形所造成的不必要的影响。

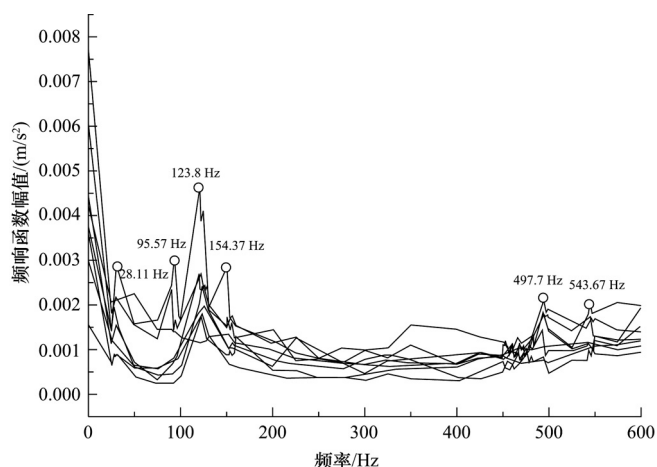


图8 摆角铣头频响函数幅值-频率曲线

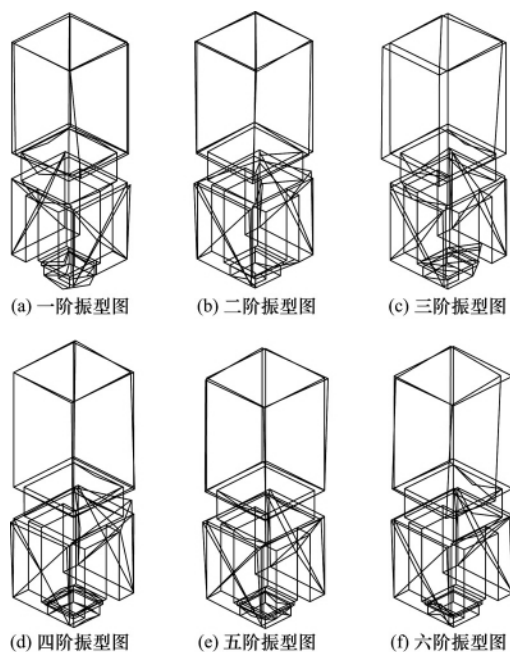


图9 摆角铣头各阶模态振型图

为了评价测量结果,需分析每个测点的相干函数,

取值区间为 0~1,外界因素影响越小,其值越接近 1。经过数据分析,得到各测点的相干函数均值曲线如图 10 所示。在实验测得各阶频率处的相干函数分别为: 0.87、0.86、0.96、0.89、0.93、0.98,其相干系数均在 0.85 以上,由此可认为外界干扰对本机床测试的影响较小,本次实验数据比较准确。

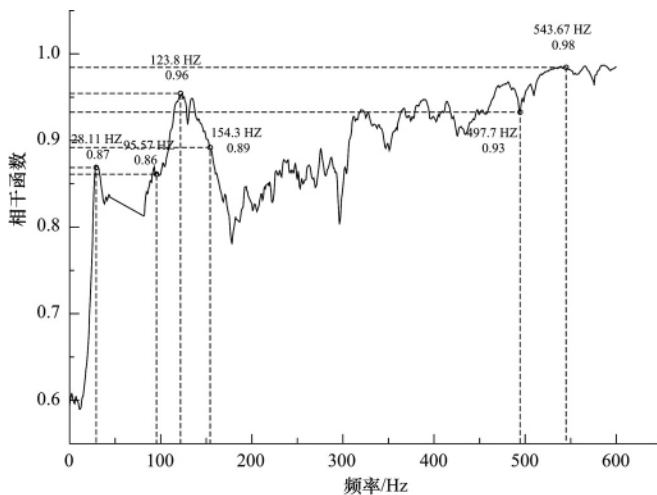


图10 相干函数均值曲线

该龙门机床的最高转速为 6 000 r/min,即铣削时的激振频率在 0~100 Hz 之间。经测试得到该摆角铣头存在低阶固有频率 28.11 Hz 与 95.57 Hz,为避免发生共振,铣削加工时转速应尽量避开 1 650~1 700 r/min、5 700 r/min~5 750 r/min。

### 2.2 空运转条件下的动态特性分析

对各转速下采集的信号进行频谱分析,图 11 为各转速下的响应频谱。由图中可看出各测点的加速度均在相同的频率下达到峰值,说明了测试的可靠性。提取各转速下加速度峰值所对应的频率如表 3 所示。

表 3 空运转实验各转速下的机床主要振动频率

转速/(r/min)	1 000	2 000	40 000
激振频率/Hz	16.7	33.4	66.7
频率/Hz	16.4	—	—
	33.6	32.8	32.5
	50	—	—
	—	66.4	66.4
	—	100	100
	133.6	133.6	133.6
	166.4	—	166.4
	197.7	200	200
	233.6	232.8	232.8
	266.4	—	266.4

由于转速不同,空转时所对应的激振频率在各转速下也不相同。由表 3 可以看出,在各转速下,振动响



应较大的地方所对应的频率也不相同,但均与该转速下的激振频率相同或成倍数关系。由此可以得出,空转状态下,摆角铣头的振动主要是来源于主轴转子的旋转不平衡引起的受迫振动。对测试结果进行对时间 $t$ 的二次积分,再进行频谱分析,可得频率-位移响应曲线,提取各转速下每个测点的主要频率所对应的位移的最大值,并进行比较,结果如图12。从图中可以看出,随着转速的增加,摆角铣头的振动略有加剧,但各转速下的振动位移量均在通道6处达到最大值,即摆角铣头近端部 $Z$ 方向的变形量最大,说明摆角铣头结构该处的刚度较低。

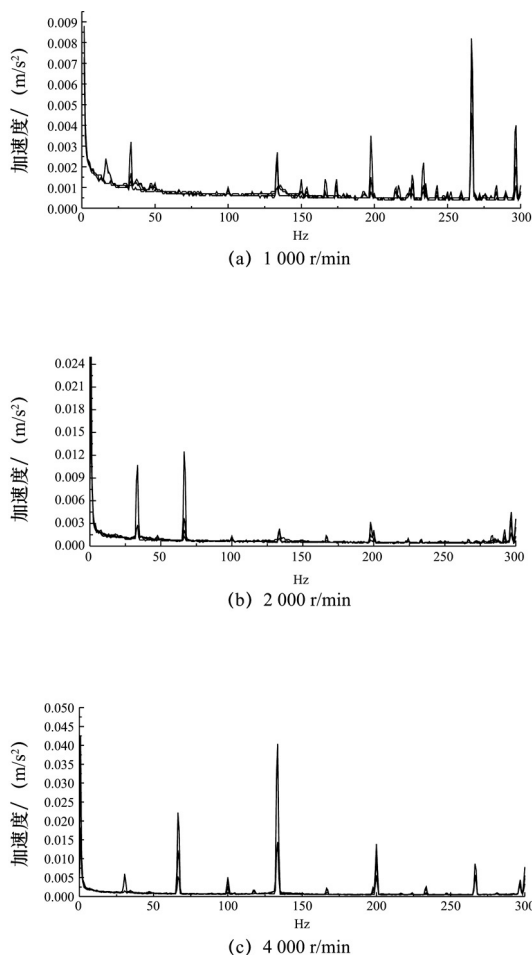


图11 各转速对应的响应频谱(空转)

## 2.3 切削条件下的动态特性分析

### 2.3.1 直线切削

对采集的信号进行频谱分析,图13为各转速下的响应频谱。由图中可看出各测点频谱在峰值处具有很好的相似性,说明了测试的可靠性。提取各转速下加速度峰值所对应的频率如表4所示。将测试结果进行对时间 $t$ 的二次积分,再进行频谱分析,可得频率-位移响应曲线,提取各转速下每个测点的主要频率所对

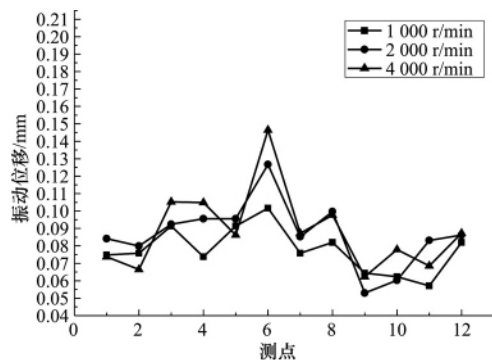


图12 不同转速下各测点的振动位移(空转)

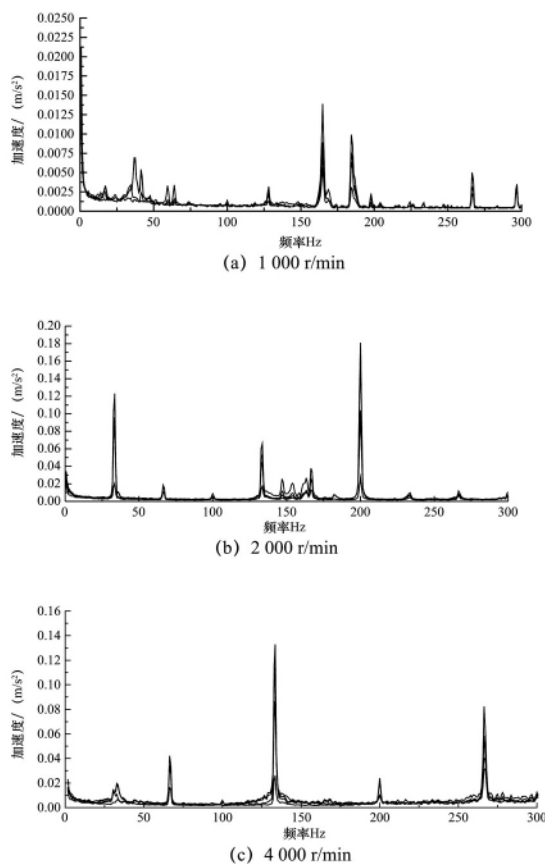


图13 各转速对应的响应频谱(切削)

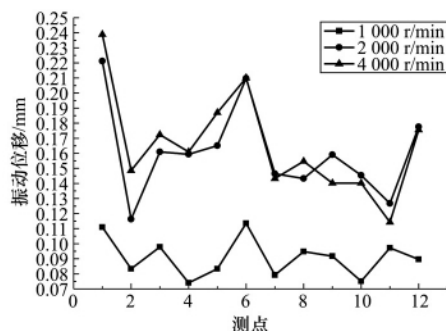


图14 不同转速下各测点的振动位移(直线切削)

应的位移的最大值,并进行比较,结果如图14所示。从图14可以看出,各转速下的振动位移量均比空转时

有所增加,且在通道 1、6 处达到最大值,即在摆角铣头端部的  $X$  方向与近端部  $Z$  方向刚度较小。

表 4 直线切削实验各转速下的机床主要振动频率

转速/(r/min)	1 000	2 000	4 000
频率/Hz	16.4	—	—
	34.4	33.6	33.6
	64.1	66.4	66.4
	—	100	—
	128.1	133.6	133.6
	164.8	166.4	—
	184.4	182	—
	197.7	200	200
	—	233.6	—
	266.4	266.4	266.4

### 2.3.2 加工曲面

对比切削响应频谱,分别选出主轴转速为 2 000 r/min 时空载、直线切削、“S”形曲线切削工况下,响应峰值最大的测点,对该测点测试结果进行二次积分与频谱分析,提取每个主要频率所对应的位移的最大值,并进行比较如图 15 所示。从图中可以看出,空转时由于主轴转子的旋转不平衡所产生的受迫振动位移远远小于切削时的振动位移,即切削工况下机床产生的振动主要为机床切削所引起的振动。

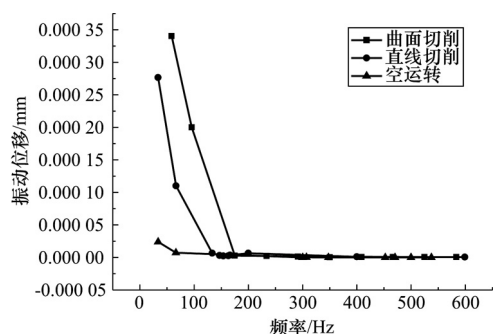


图15 不同工况下主要频率对应的振动位移对比图

### 2.4 减振方案分析

根据以上实验分析,可以得出引起该机床振动的原因主要有外界干扰对机床振动的影响。主轴转子旋转不平衡引起的振动、切削引起的振动等。其中切削是引起机床振动的主要振源。

外界干扰对机床振动的影响很小,由于机床结构较大,且该机床车间环境较复杂,可通过将机床安置在防振地基上,设置弹簧或橡皮垫等缓冲装置来减小振动<sup>[8]</sup>。

主轴转子旋转不平衡引起的振动振幅较小,在机床使用过程中,应注意机床转速的选取:机床主轴旋转所引起的激振频率应避开摆角铣头的固有频率,以避免产生共振。

切削是引起机床振动的主要振源。减小因切削引起振动的方法有:(1)通过对摆角铣头结构进行优化设计,提高其端部的  $X$  方向与近端部  $Z$  方向刚度来提高结构的抗振性;(2)合理选择与切削有关的参数,如切削深度、进给量、转速等。

### 3 结语

本文首先通过对五轴高速龙门加工中心摆角铣头进行了锤击实验,确定了摆角铣头的前六阶固有频率与振型,并根据振型确定摆角铣头与垂直滑枕的连接部位以及铣头端部为该部件的薄弱环节;再通过对摆角铣头进行空运转测试、直线进给切削测试与“S”形曲面切削测试,确定了切削是引起该机床受迫振动的主要振源,且摆角铣头端部的  $X$  方向与近端部  $Z$  方向刚度较低,可通过优化设计提高这两个部位的刚度来提高机床的抗震性。

### 参 考 文 献

- [1]董凯夫. MK7132A 数控卧轴矩台平面磨床的实验模态分析[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2008.
- [2]蔡力钢, 马仕明, 赵永胜, 等. 重载摆角铣头模态分析与实验研究. 振动与冲击[J]. 2011, 30(7): 250-255.
- [3]魏要强, 李斌, 毛新勇, 等. 数控机床运行激励实验模态分析[J]. 华中科技大学学报, 2011, 6(39): 79-82.
- [4]矣兰. 直驱式 A/C 轴双摆角数控万能铣头动态特性分析与检测[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [5]张力. 模态分析与实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [6]白向贺. 数控机床模态实验的激励点选择和响应测点布置优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [7]张强. 振动机械结构的模态参数辨识研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [8]陈家元. 机床的振动与防治措施[J]. 装备制造技术, 2012(9): 97-98.

第一作者: 陈艳, 女, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事数控机床关键零部件的动静特性分析及优化方面的研究工作。

(编辑 刘文元) (收稿日期: 2014-04-03)

文章编号: 140723

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

• 更正 •

2014 年第 6 期第 78 页“基于声发射信号检测的光学元件表面加工质量监控研究”一文漏刊资助基金“福建省自然科学基金(2012J05098)”现更正。