

SL500/HZ 超精密平面磨床的试验模态分析*

唐学哲¹, 卢波¹, 郑艳琴¹, 洪芳², 翁泽宇^{1*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州机床集团有限公司, 浙江 杭州 310022)

摘要: 为了改善 SL500/HZ 超精密平面磨床的动态性能, 应用模态分析的基本理论, 得出了试验模态分析的理论和方法。根据 SL500/HZ 超精密平面磨床的实际工作状态和试验的实际环境条件, 采用脉冲锤击法对 SL500/HZ 超精密平面磨床进行了试验模态分析, 得到了该机床结构的前 8 阶模态参数和模态振型, 然后对所得模态参数进行了参数识别, 找出了机床结构的薄弱环节, 进而提出了机床结构的改进方案。研究表明, 该研究为进一步改善 SL500/HZ 超精密平面磨床的动态性能提供了结构改进的依据。

关键词: 平面磨床; 模态试验; 模态参数; 薄弱环节

中图分类号: TH161.21; TG586

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)04-0432-04

Experimental modal analysis of the SL500/HZ ultra-precision surface grinding machine

TANG Xue-zhe¹, LU Bo¹, ZHENG Yan-qin¹, HONG Fang², WENG Ze-yu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Hangzhou Machine Tool Group Co., Ltd., Hangzhou 310022, China)

Abstract: In order to improving the dynamic performance of the SL500/HZ ultra-precision surface grinding machining, the basic theory and methods of the experimental modal analysis was gotten from the basic theory of modal analysis. According to actual working conditions of the SL500/HZ ultra-precision surface grinding machine and the actual environmental conditions of the test, experimental modal analysis of the SL500/HZ ultra-precision surface grinding machine was made through the hammer testing, the modal parameters and mode shapes of the first stage to the eighth-order were obtained, the modal parameters of each order were analyzed, the weak links of the dynamic performance of the machine were found out. At last, the improvement program in the structure was designed for the weak link. The experimental results show that the research provides bases in the structure to improve the dynamic performance of the SL500/HZ ultra-precision surface grinding machine.

Key words: surface grinding machine; modal test; modal parameter; weak link

0 引言

随着制造技术的发展, 机床的加工精度越来越高, 有些甚至已经达到纳米级^[1]。精密级甚至超精密级机床的不断出现使得对机床加工性能的要求也越来越高。机床的加工性能取决于机床结构的动态性能, 动态性能对机床的加工精度、切削效率、切削稳定性和可靠性有很大的影响^[2], 目前它已经成为衡量机床结构性能好坏的一项非常重要的指标。

磨床作为高精度的加工设备, 对动态性能的要求比其他机床更高^[3]。超精密平面磨床的动态性能更

是保证其加工精度的重要因素。所以, 研究磨床的动态特性对改进精密磨床的机械结构、提高磨床的加工精度和加工稳定性有着重要的实际意义。

试验模态分析是研究机床动态特性的主要手段, 本研究采用该方法对 SL500/HZ 超精密数控平面磨床进行模态试验, 对试验所得的模态参数进行分析, 找出影响磨床动态性能的结构薄弱环节。

1 试验模态分析的基本理论

试验模态分析技术通过系统辨识理论和模态分析理论把理论分析和动态测试结合起来, 是一种很实用

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 浙江省重中之重学科开放研究基金资助项目 (AMT20100705)

作者简介: 唐学哲 (1970-), 女, 浙江杭州人, 主要从事机床振动方面的研究. E-mail: txzhyy@163.com

通信联系人: 翁泽宇, 男, 教授, 硕士生导师. E-mail: wengzy8888@163.com

的技术。现代信号测试与分析技术的发展以及计算机软、硬件水平的不断提高,促进了试验模态分析方法在实际工程中的广泛应用^[4]。通过对结构进行模态试验,并应用先进的计算机辅助测试与分析手段,可以获得精确的结构动态特性参数,如结构的各阶固有频率、模态振型等^[5]。在获得这些动态特性参数的基础上,能够直观地发现结构的薄弱环节,为设计人员修改结构、优化设计指明了方向。

对于 N 自由度的线性阻尼振动系统,其运动微分方程为:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{X}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{X}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{X}(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (1)$$

式中: $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{K}]$ —系统的质量、阻尼及刚度矩阵; $\{\mathbf{X}(t)\}$, $\{\dot{\mathbf{X}}(t)\}$, $\{\ddot{\mathbf{X}}(t)\}$ 及 $\{\mathbf{F}(t)\}$ —系统各点的位移响应向量、速度向量、加速度向量及激励力向量。

这是一组耦合方程,模态分析方法就是以无阻尼系统的各阶主振型所对应的模态坐标来代替物理坐标,使坐标耦合的微分方程组解耦为各个坐标独立的微分方程组,从而求出系统的各阶模态参数。这就是模态分析的经典定义^[6-7]。

对上式两边进行拉氏和傅氏变换,并令 $s = j\omega$,可以得到:

$$([\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}] + j\omega[\mathbf{C}])\{\mathbf{X}(\omega)\} = \{\mathbf{F}(\omega)\} \quad (2)$$

式(2)是一组耦合的方程组,直接对其进行求解比较困难,为了解耦,引入模态坐标可得:

$$([\mathbf{K}_r] - \omega^2[\mathbf{M}_r] + j\omega[\mathbf{C}_r])\{q\} = [\boldsymbol{\phi}]^T \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{M}_r]$ —对角化的模态质量矩阵, $[\mathbf{M}_r] = [\boldsymbol{\phi}]^T [\mathbf{M}] [\boldsymbol{\phi}]$; $[\mathbf{K}_r]$ —对角化的模态刚度矩阵, $[\mathbf{K}_r] = [\boldsymbol{\phi}]^T [\mathbf{K}] [\boldsymbol{\phi}]$; $[\mathbf{C}_r]$ —对角化的模态阻尼矩阵, $[\mathbf{C}_r] = [\boldsymbol{\phi}]^T [\mathbf{C}] [\boldsymbol{\phi}]$ 。

至此,具有耦合因子的系统方程式(1)被解耦成模态坐标下相互独立的 N 自由度子系统的方程组,从而便于系统方程的求解和分析。解耦后的第 r 个方程为:

$$(K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r) q_r = \sum_{j=1}^n \varphi_{jr} F_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

在任意坐标 l 下,其响应为:

$$X_l = \sum_{j=1}^n \varphi_{jr} q_r \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

采用模态坐标后, N 自由度振动系统的响应,相当于在 N 个模态坐标下单自由度系统的响应之和,这就是模态叠加原理。

上述讨论中,固有频率 ω_r 、固有振型 $\boldsymbol{\phi}_r$ 以及模态

坐标下的模态质量 M_r 、模态刚度 K_r 和模态阻尼 C_r 统称为系统的模态参数,其中固有频率和固有振型能直接反映系统的振动特性。

试验模态分析技术是通过试验测得实际响应来寻求相应的模型识别方程,从而求得模态参数。假设系统 p 点激励 l 点拾振,令 $\{\mathbf{F}\} = (0, 0, \dots, f_p, \dots, 0)^T$, 由式(4)和式(5)可得第 r 阶模态坐标为:

$$q_r = \frac{\varphi_{pr} f_p(j\omega)}{([\mathbf{K}]_r - \omega^2[\mathbf{M}]_r + j\omega[\mathbf{C}]_r)} \quad (6)$$

系统的响应可表示为各阶模态响应的线性组合。则系统在 l 点处的响应可表示为:

$$x_l(j\omega) = \sum_{r=1}^n \varphi_{lr} q_r = \frac{\varphi_{lr} \varphi_{pr} f_p(j\omega)}{([\mathbf{K}]_r - \omega^2[\mathbf{M}]_r + j\omega[\mathbf{C}]_r)} \quad (7)$$

所以,测量点 l 与激励点 p 之间的频响函数为:

$$\mathbf{H}_{lp}(j\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_{lr} \varphi_{pr}}{([\mathbf{K}]_r - \omega^2[\mathbf{M}]_r + j\omega[\mathbf{C}]_r)} \quad (8)$$

系统的传递函数矩阵为:

$$[\mathbf{H}(j\omega)] = \sum_{r=1}^n \frac{1}{([\mathbf{K}]_r - \omega^2[\mathbf{M}]_r + j\omega[\mathbf{C}]_r)} \begin{bmatrix} \varphi_{1r} \varphi_{1r} & \varphi_{1r} \varphi_{2r} & \cdots & \varphi_{1r} \varphi_{nr} \\ \varphi_{2r} \varphi_{1r} & \varphi_{2r} \varphi_{2r} & \cdots & \varphi_{2r} \varphi_{nr} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{nr} \varphi_{1r} & \varphi_{nr} \varphi_{2r} & \cdots & \varphi_{nr} \varphi_{nr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在这个传递函数矩阵中,如果利用导纳测量得到了传递函数的任一系列,则包含了模态矩阵的全部信息。因此不必测量任意两点之间的柔度,而只需要测量某一行或某一系列就足够了^[8]。测量一系列频响函数的典型方法是固定点激励,多点测量响应;测量一行频响函数的典型方法是固定点输出,多点轮流敲击进行激励。不管是哪种方法,都包含了模态的所有信息。

2 SL500/HZ超精密平面磨床的试验模态分析

SL500/HZ超精密平面磨床试验模态分析的试验系统主要包括:SL500/HZ超精密平面磨床、力传感器、压电式加速度传感器、动态数据采集与分析系统、模态分析处理软件和计算机^[9]。

该机床的试验模态分析采用脉冲锤激励的方式进行,锤头带有力传感器,可以用来测量冲击激励信号;试验的激励信号和响应信号分别由美国 PCB PIEZOTRONICS 公司生产的 086D05 力传感器和 356A02 三向加速度传感器测得,信号的采集和储存由美国

Spectral Dynamics 公司生产的 siglab20-42 信号分析仪控制;信号的处理和分析也是由美国 Spectral Dynamics 公司生产的模态分析软件 STAR 来完成^[10-11]。

SL500/HZ 超精密平面磨床模态试验的示意图如图 1 所示。

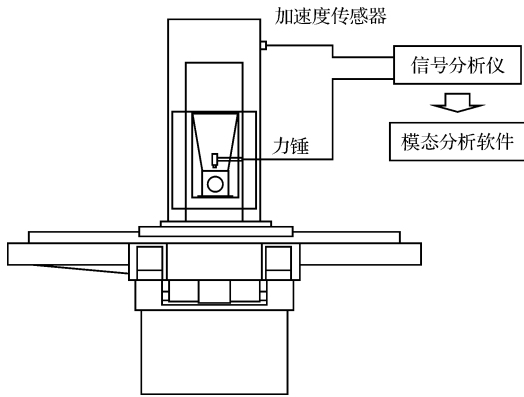


图 1 SL500/HZ 超精密平面磨床的模态试验示意图

根据 SL500 超精密平面磨床各结构件的尺寸和测点布置的原则来确定需要布置的几何测点数,对每一个几何点均测量其三向响应,以获得三维振型。本次试验共 423 个测点,如图 2 所示。

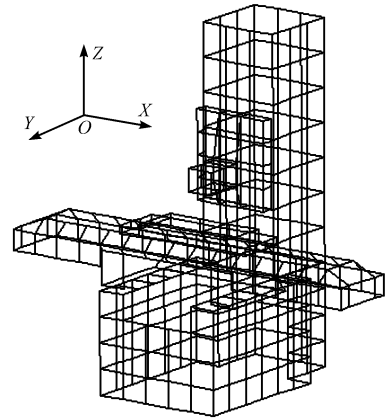


图 2 机床测点的布置

根据前面所述的试验模态理论可知,只需测得传递函数矩阵中的一行或一列,便可识别系统的模态参数。所以,试验采用单点激振法,脉冲锤的固定激励点选择在磨头上正中一点的负 Z 方向,同时不断移动三向加速度传感器来测量输出的响应信号。

将试验数据导入 STAR 软件进行数据处理和曲线拟合,最后所得的试验数据如表 1 所示,各阶振型图如图 3 所示。

表 1 机床的试验模态参数

阶次	固有频率 f/Hz	阻尼比 $\xi/(%)$	主要振型描述
第 1 阶	58.91	7.23	立柱作前后摆动,如图 3(a)所示
第 2 阶	99.67	5.97	床身侧面 X 向局部变形,立柱左右摆动,磨头底部绕主轴弯曲变形,如图 3(b)所示
第 3 阶	163.41	1.56	磨头绕主轴转动,并上下变形,立柱前后摆动,床身随之上下变形,如图 3(c)所示
第 4 阶	215.07	1.13	床身上下摆动,前床身绕 Y 轴弯曲变形,立柱前后摆动,如图 3(d)所示
第 5 阶	283.11	0.98	立柱床身前后摆动,磨头随立柱的摆动上下摆动,并绕主轴弯曲变形,如图 3(e)所示
第 6 阶	343.20	0.75	立柱左右摆动,绕 Z 轴扭动,床身前后摆动,拖板两端上下摆动,如图 3(f)所示
第 7 阶	384.30	0.40	立柱绕 Z 轴扭动,磨头绕主轴扭转明显,床身侧面局部变形,如图 3(g)所示
第 8 阶	473.12	0.25	磨头与立柱均前后摆动,且磨头上下摆动明显,立柱绕 Y 向摆动,拖板上下摆动,如图 3(h)所示

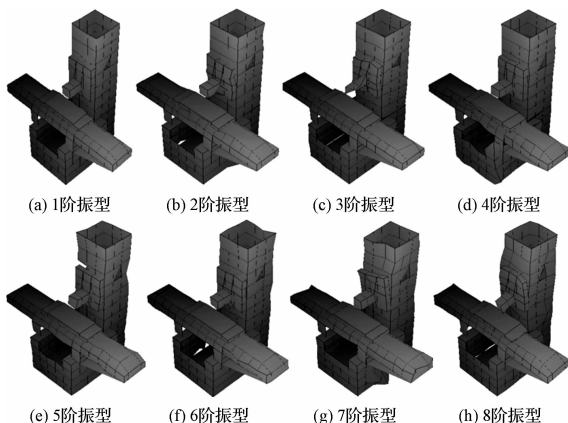


图 3 机床的各阶振型图

3 试验结果分析

从试验所得的数据和振型分析可以得出结构的薄弱环节主要在于:

- (1) 立柱和床身结合处的联结刚度不够;
- (2) 立柱本身的弯曲刚度和扭转刚度都较弱;
- (3) 磨头与立柱的结合面的联结刚度(即磨头的移动导轨刚度)不够;
- (4) 床身侧面的局部刚度较弱;
- (5) 磨头本身弯曲刚度不够。

机床整机的动态性能取决于机床大件本身的动态性能和大件之间结合面的动态性能^[12]。从上面的分析可以看出来,立柱的摆动是由立柱与床身的结合面刚度不够引起的,而立柱的扭动是因为它本身的刚度较弱;磨头本身的刚度以及磨头与立柱之间的结合面的刚度是引起磨头扭摆的主要原因;床身的局部变形是因为床身侧面的局部刚度不够。因此,可以考虑对机床结构的薄弱环节适当改进,为了提高立柱与床身的接触刚度,可以加大结合面的螺栓尺寸,这样不仅可

以提高螺栓的刚度,还能得到更大的预紧力,另外增加螺栓数量、改变螺栓位置也可以得到更大的预紧力,从而增加结合面的接触刚度;将立柱内部原有的“#”字形筋板改成“X”形筋板,能有效提高立柱的扭曲刚度和弯曲刚度;加宽磨头底部的尺寸,增大磨头与立柱之间的导轨和滑块的规格,可以有效改进磨头的扭摆;给床身侧面增加筋板能提高床身的局部刚度等等,这些措施都能有效地改善机床整机的动态性能。

4 结束语

本研究通过对SL500/HZ超精密平面磨床进行试验模态分析,得到了机床的各阶模态参数,进而找出了机床结构的薄弱环节,提出改进方案,为提高机床的动态性能提供了结构改进的依据。由此可知,试验模态分析技术是研究机床动态特性的重要手段,通过试验模态分析可以得到机床结构的模态参数,从而对机床的整个动态特性有一个比较全面的了解。

参考文献 (References):

[1] 李圣怡,戴一帆.超精密加工机床新进展[J].机械工程学报,2003,39(8):7-12.

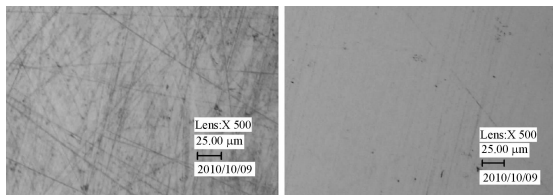
- [2] MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Model updating in structural dynamics; a survey [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 167(2):347-375.
- [3] 杨托,翁泽宇,卢波,等. MGK7350 数控高精度卧轴圆台平面磨床的试验模态分析[J]. 机床与液压, 2009(1):12-13.
- [4] EWINS D J. Recent Advances in Modal Testing [C]. 6th International Conference on Recent Advance in Structural Dynamics. London: [s. n.], 1997.
- [5] 温熙森,陈循,徐永成,等. 机械系统建模与动态分析[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [6] 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.
- [7] SCHMITZ T L. Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis[J]. *Annals of the CIRP*, 2000, 49(1):303-308.
- [8] 林循泓. 振动模态参数识别及其应用[M]. 南京:东南大学出版社,1994.
- [9] 沈晓庆. 数控机床直线滚动导轨动态特性研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [10] Spectral Dynamics, Inc. The STAR Reference Manual [M]. Spectral Dynamics, Inc., 2007.
- [11] Spectral Dynamics, Inc. STAR System Users Guide [M]. Spectral Dynamics, Inc., 2007.
- [12] 廖伯瑜,周新民,尹志宏. 现代机械动力学及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:柴福莉]

(上接第413页)

易与工具表面发生碰撞,从而破坏工具表面。

综合分析,选用转速6000 r/min和间隙60 μm,液流动压力在1.3 N左右。该区域等高线较为稀疏,即动压力有较好的加工稳定性。选择该参数对工件进行抛光2.5 h,结果如图6所示。抛光效果明显,获得了Ra为30 nm的模具工件表面质量。



(a) 抛光前工件表面(Ra:80 nm) (b) 抛光后工件表面(Ra:30 nm)

图6 模具液流悬浮抛光效果

4 结束语

本研究结合液流悬浮抛光原理,建立了模具液流悬浮抛光系统,包括定位平台和动态参数检测系统;并根据材料去除机理分析,构建了材料去除模型,重点研究了模型中液流动压力及转速;结合液流动压理论,分析了模型条件下的转速和压力分布情况。

本研究通过试验研究了抛光工具转速、加工间隙对液流动压的影响,通过液流动压力等高线示图,深入

分析了转速和间隙对液流动压的综合作用。结合实际试验,优选了6000 r/min转速和60 μm的加工间隙,对模具工件进行了抛光效果的试验,获得了Ra30 nm的表面质量,肯定了模具液流悬浮抛光方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 计时鸣,金明生,张宪,等.应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J].机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [2] 殷海龙.浅谈模具加工设备的现状及发展趋势[J].机械研究与应用,2010,3(3):7-8.
- [3] 马忠臣,李强,杨秀琳.现代模具工业发展述评[J].模具技术,2006,3(3):23-24.
- [4] 计时鸣,张利,金明生,等.气囊抛光技术及其现状[J].机电工程,2010,27(5):1-12.
- [5] MORI Y. Creation of perfect surfaces [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275(1):39-50.
- [6] 李长河,修世超,蔡光起. 微细游离磨粒借助流体动压力实现的超精密加工技术[J]. 机械设计与制造, 2005, 12(12):105-107.
- [7] 于兆勤,杨忠高,黄志刚,等.超光滑表面加工技术的发展及应用[J].机床与液压,2007,35(6):217-220.
- [8] 管力明,于保华,林剑. 模具型腔表面复合精密光整加工参数优化[J]. 机电工程, 2007, 24(2):35-37.
- [9] LEE S K. Effects of minimizing hydrodynamic pressure in ultra-precision mirror grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(10):1031-1036.
- [10] ZHANG Bo, NAKAJIMA A. Hydrodynamic fluid pressure in grinding zone during grinding with metal-bonded diamond wheels [J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(3):603-608.

[编辑:柴福莉]