

# 高强栓接结构对分段式重载横梁动态特性的影响

刘志峰, 宋 斌, 郭铁能, 蔡力钢, 郭东亮, 王 锋

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院 北京市先进制造技术重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 针对高强栓接连接的超跨距分段式横梁与整体式横梁,以某机床厂生产的重型龙门数控机床三段式栓接重载横梁为研究对象,在横梁3种安装方式下分别对其进行动力学实验,并且利用三维建模软件与有限元软件对相应的整体式横梁进行了建模与分析.通过对照测试结果与分析结果,探究了栓接结合部对横梁动态特性的影响.结果表明:分段式横梁在3种情况下的动力学特性与整体式横梁并无显著差别,横梁栓接结合部对横梁动力学特性的影响较小.

**关键词:** 重型龙门机床; 动力学; 分段式横梁; 高强栓接结构

中图分类号: TH 212; TH 213.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)07-0961-06

## Influences of the Bolted Joints on Dynamic Characteristics of Multi-section Crossrail

LIU Zhi-feng, SONG Bin, GUO Tie-neng, CAI Li-gang, GUO Dong-liang, WANG Feng

(Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Research on the dynamic discrepancy of the integral type and multi-section crossrail, jointed by the high-strength bolt is required. This paper focuses on the dynamic characteristics of the three-section bolted crossrail. The dynamic experiment of the crossrail is carried out at three installation conditions, such as free-free condition, fixed on machine tool, and working condition. At the same condition, the integral crossrail, which ignore the bolted joint, is modeled by three-dimensional software and analyzed by the finite element method (FEM). By comparing the experiment and analysis results, the influences of the bolted joints on three-session beam are explored and no signification discrepancy of the integral and three-section crossrail is found in dynamic characteristics. Therefore, the bolted joints have slight influence on the three-section crossrail, and the conclusion provides an experimental basis for the design, analysis and optimization of the three-section crossrail.

**Key words:** heavy gantry machine tool; dynamic; multi-section crossrail; high-strength bolted joint

超跨距重型龙门数控机床是我国电力、航空航天、大型船舶等行业急需的制造装备,是国家的战略物资.超跨距重载横梁是重型龙门数控机床的一个极其重要的承载结构件,其力学特性直接影响整机

的精度和性能.由于超跨距横梁的尺寸和质量过于巨大,如果采用整体制造和运输,所需的铸造能力巨大,加工和运输难度高,不利于制造和节能减排.因此,采用分段式结构制造超跨距重载横梁是一种很

收稿日期: 2010-07-28.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04010011-002); 国家自然科学基金资助项目(50905004).

作者简介: 刘志峰(1973—),男,副教授,主要从事数字化设计与制造、齿轮动力学方面的研究, E-mail: lzf@bjut.edu.cn.

好的解决方案和发展方向,已经成为国内外重型、超重型数控机床制造企业急需解决的重要课题。

然而,若采用分段式制造,栓接结合面将对横梁整体力学特性产生影响。国内外的研究者已对栓接结合部的力学特性进行了研究,THOMLEY等<sup>[1]</sup>较早地研究了结合部的力学特性;黄玉美等<sup>[2]</sup>、张学良等<sup>[3]</sup>、伍良生<sup>[4]</sup>与毛宽民等<sup>[5]</sup>也对栓接结合面的特性进行了深入的研究;IBRAHIM等<sup>[6]</sup>对栓接结合面力学特性的不确定问题进行了总结。这些研究仅针对结合面的力学特性,并未考虑栓接结合面对整体结构的影响。

本文以某机床厂生产的三段式重载横梁为研究对象,通过动力学测试与有限元分析,在3种安装方式下,对比分段式实际横梁的动力学测试结果与整体式横梁的有限元分析结果,探究了高强栓接结合部对重载横梁力学特性的影响,为分段式横梁的设计与制造提供了依据。

## 1 分段式横梁

图1是国内某机床龙头企业在类比国外同类产品的基础上试制的一个超跨距重载分段式横梁,其跨度为10.5 m,总长为15 m,质量约为100 t。该横梁由3段组成,段与段之间通过29个高强螺栓连接,该螺栓是一种特殊的工业用高强螺栓。在安装过程中,先通过液压拉伸装置将螺栓控制到一定预变形,再锁紧螺母<sup>[7]</sup>。横梁采用球磨铸铁材料,将对应的整体式横梁模型按1:1的比例在三维软件中建模,如图2所示。



图1 横梁栓接部分

Fig. 1 Bolt joints in the crossrail

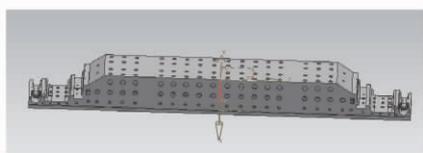


图2 横梁三维模型

Fig. 2 Three-dimension model of the crossrail

## 2 横梁动力学实验方法

由于横梁质量约100 t,且制造精度非常高,锤击法并不适合激励横梁模态。过大的冲击载荷容易将横梁局部组织破坏,而小冲击载荷得到的信号信噪比较低,不利于模态辨识。本实验中采用慢扫频激励法,由于该方法激励的频率变化较慢,激振能量在频谱上较集中,因此,若选择合适的激励位置,可以采用较小的激振力激励出所关心的频率。本研究采用单点激振器激励,多点拾振。选用HEV-200激振器,在使用过程中,激振力控制在100 N左右。关于激励点的选择主要考虑2个原则:1)应尽可能避开各阶模态的节点位置;2)应使各测点响应信号足够大。拾振传感器采用加速度传感器。测点的布置遵循2个原则:1)各拾振点的连线能勾勒出分段梁的轮廓变形形状;2)对于感兴趣的结构部分(如栓接部位)可以将拾振点布置得更密一些<sup>[8]</sup>。测试分粗扫频和细扫频方式进行,在搜索结构固有频率时采用粗扫描方式,大致确定结构固有频率的大小后,再通过细扫频方式确定固有频率的精确值。

## 3 横梁动力学特性实验与分析

国内外学者的研究表明,栓接结合部的动态特性主要是通过结合部两侧相对位移产生的切向阻尼、切向刚度、法向阻尼和法向刚度体现<sup>[9]</sup>。这些特征均可以通过整体结构固有频率的变化得到体现<sup>[10-11]</sup>。对横梁如下几种安装和工作状态进行实验:1)加工完毕但尚未安装的横梁(自由状态);2)安装在立柱上尚未安装功能部件的横梁;3)龙门机床上安装完整的横梁。通过将实验结果与同样条件下的整体横梁有限元分析结果进行对比,分析高强栓接结构对横梁整体动力学特性的影响。

### 3.1 横梁自由状态

#### 3.1.1 模态实验

对加工完毕但尚未安装的横梁进行模态实验。为了达到较好的实验效果,将横梁用天车通过拉索吊起,拉索长度超过20 m,并且在晚上干扰较少的情况下进行实验。实验采用动态扫频的方式进行激励,考虑到横梁动力学特征主要受低频模态的影响,因此选择激励点的位置在横梁端部。测点与激振如图3所示,采用Brüel & Kjaer加速度传感器采集数据。

考虑到机床的转速较低并且主要受低频模态的影响,实验过程中主要进行5~100 Hz的扫频激励。测点C处的频响函数如图4所示,对各测点的频响

函数进行辨识,最终得到 100 Hz 以下的固有频率为 36.50 Hz,振型为横梁弯曲,如图 5 所示。

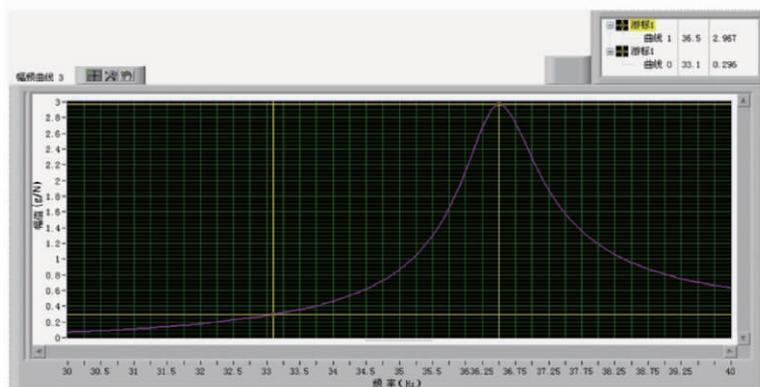
### 3.1.2 有限元分析

为对比整体式横梁与分段式横梁的动力学差别,将对应的整体式横梁自由状态下的三维模型导入有限元软件中进行模态分析,采用 solid 45 单元对模型进行网格划分,如图 6 所示。划分后得到的

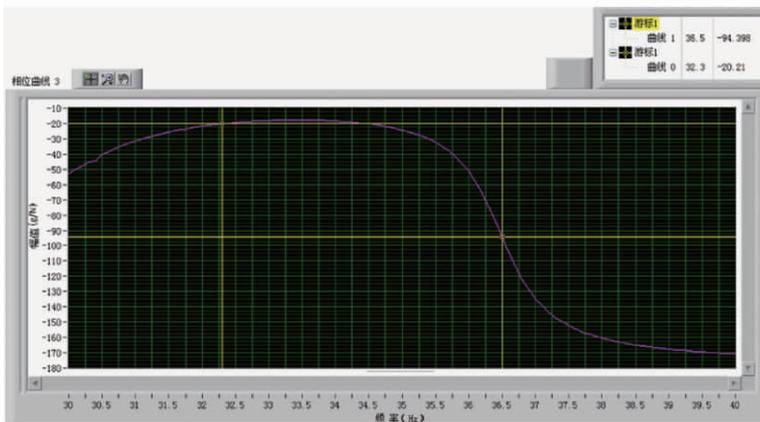


图 3 测点的布置

Fig. 3 Layout of the measuring points



(a) 幅频曲线



(b) 相频曲线

图 4 横梁自由状态下测点 C 的频响函数

Fig. 4 Frequency response function of the point C in free-free condition

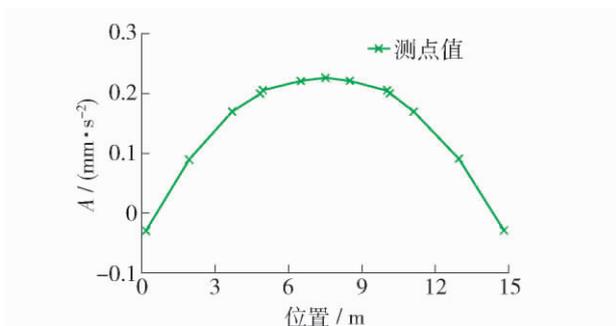


图 5 自由横梁第一阶振型实测结果

Fig. 5 First mode shape of the crossrail in free-free condition by experiment

有限元单元数为 1 050 328,节点数为 266 719。由于横梁采用球墨铸铁材料铸造而成,因此根据国家标准,将铸铁密度设为  $7\ 200\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量设为  $174\text{ GPa}$ ,泊松比设为  $0.275$ 。

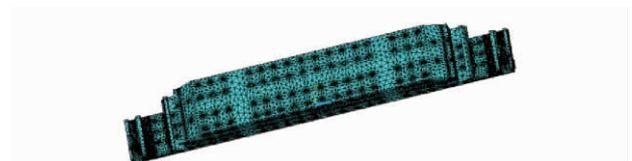


图 6 横梁自由状态下的有限元模型

Fig. 6 FEM model of the crossrail in free-free condition

通过有限元分析,最终得到的横梁固有频率为 36.19 Hz. 振型为横梁的弯曲变形,如图 7 所示. 这与实验结果基本相符,并且振型最大处(端部)与最小处(中间)的比值与实验基本相同. 由此可见,在自由状态下,栓接结合部并未对横梁整体动态特性造成较大影响.

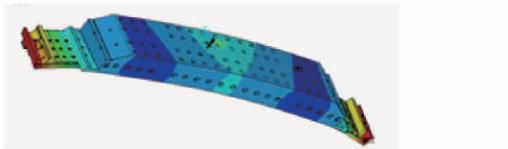


图 7 自由横梁第一阶振型分析结果  
Fig. 7 First mode shape of the crossrail in free-free condition by analysis

### 3.2 横梁初始安装状态

#### 3.2.1 模态实验

将横梁装配到立柱上之后,对其进行模态实验,并未安装滑枕和溜板,以探究当横梁两端加上装配约束后,栓接结合部对其动态特性的影响. 激振方式与测点的选择与前述相同,激振点安装位置在中点偏左上方的位置. 通过实验得到测点 C 的功率谱如图 8 所示,对其频响函数进行辨识,最终得到此种安装方式下横梁的固有频率为 15.20、30.01 Hz,振型分别为绕机床 y 轴顺时针翻转与端部摆动.

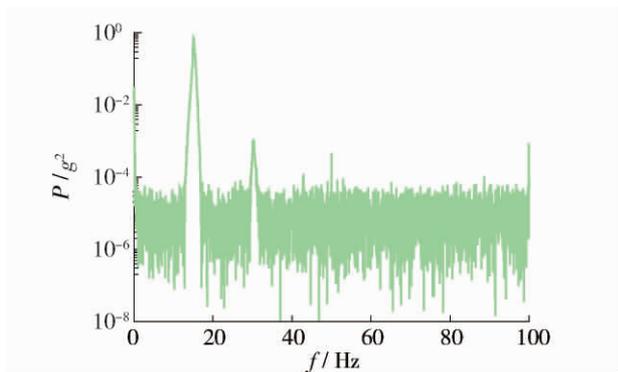


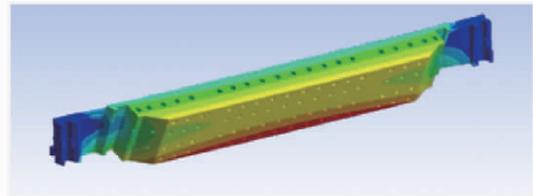
图 8 测点 C 的功率谱  
Fig. 8 Power spectrum of the point C

#### 3.2.2 有限元分析

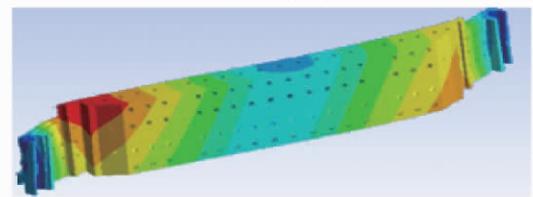
对相应的整体式横梁进行有限元分析. 由于机床和横梁处于调试状态,横梁仅靠在立柱之上,并未通过与立柱连接的压板安装,因此横梁与立柱之间配合的导轨结合部实际上并未发生作用. 又由于立柱上没有安装丝杠,仅横梁丝杠下端用支撑物撑起,因此根据这样的接触状况,考虑到横梁振动时立柱对横梁模态的贡献非常小,在横梁的外侧导轨采用 x 向固支约束,并在丝杠面处采用 z 向固支约束,

即忽略横梁与立柱的导轨结合面的刚度.

通过有限元计算,最终得到横梁的固有频率为 15.51、29.79 Hz,振型分别为绕机床 y 轴顺时针翻转与端部摆动,如图 9 所示. 这仍然与实验固有频率及振型相符. 这说明在横梁两端加上装配约束之后,栓接结合部对横梁动态特性的影响仍然较小.



(a) 第一阶振型



(b) 第二阶振型

图 9 初始安装横梁的振型

Fig. 9 Mode shape of the installed crossrail

### 3.3 机床安装完整

#### 3.3.1 模态实验

机床安装和精度调整完成后,横梁两端的约束情况与第二次模态实验相比发生了变化,横梁通过压板安装在立柱之上,导轨间的间隙调整到工作状态,丝杠安装在立柱之上,此外,溜板和滑枕的关键部件也安装至横梁之上,并调整好间隙和精度. 实验方法与前述基本相同,激振器安装位置为滑枕的支撑架中部偏右,如图 10 所示.

实验测得 C 点处的频响函数如图 11 所示,通过对各点的频响函数进行辨识,最终得到这种状态下横梁的固有频率为 18.54、42.49、81.22 Hz. 振型分别为弯曲变形、绕机床 y 轴翻转与 S 型弯曲变形,如图 12 所示.



图 10 安装完整横梁的模态实验  
Fig. 10 Mode testing of the installed crossrail

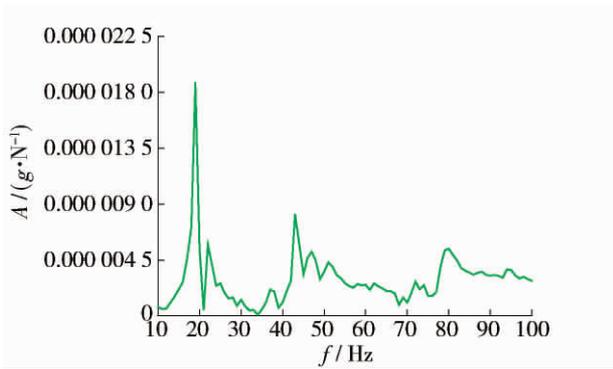


图 11 安装溜板和滑枕的横梁测点 C 频响函数

Fig. 11 Frequency response function of the point C in the crossrail with saddle and vertical milling head

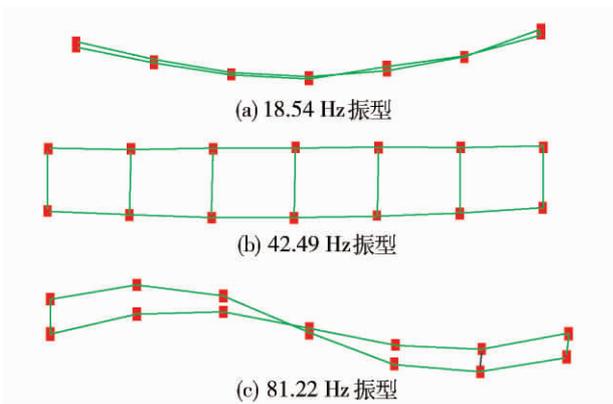


图 12 安装溜板和滑枕的横梁振型测试结果

Fig. 12 Mode shapes of the crossrail with saddle and vertical milling head by experiment

### 3.3.2 有限元分析

对安装完整的横梁进行有限元分析. 由于这种状态下横梁与立柱的接触状况较之前又有所不同, 因此根据实际接触情况, 对横梁相应的边界条件进行设置. 丝杠的作用为支撑横梁上下运动, 刚度很大, 丝杠接触处将机床  $z$  向固支约束; 考虑到在横梁的局部模态中立柱的影响非常小, 因此在横梁的内、外侧导轨采用机床  $x$  向对称固支约束并且在内侧导轨采用机床  $y$  向单边固支约束, 同样忽略横梁与立柱的导轨结合面的刚度影响, 如图 13 所示; 又由于溜板与横梁之间的导轨接触面对横梁整体变形影响很小, 因此分析时同样忽略其刚度影响, 采用固接的约束方式. 通过有限元计算, 最终得到横梁的固有频率分别为 18.65、43.11、81.73 Hz. 振型分别为弯曲变形、绕机床  $y$  轴翻转与 S 型弯曲变形, 如图 14 所示. 固有频率、振型仍然与实验结果相符. 这说明横梁在工作状态下, 其动态特性也基本不受栓接结合部的影响.

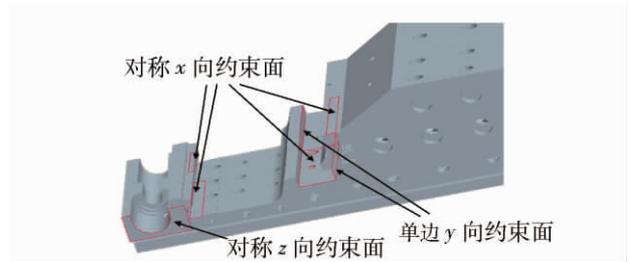


图 13 横梁约束方式

Fig. 13 Boundary conditions of the crossrail

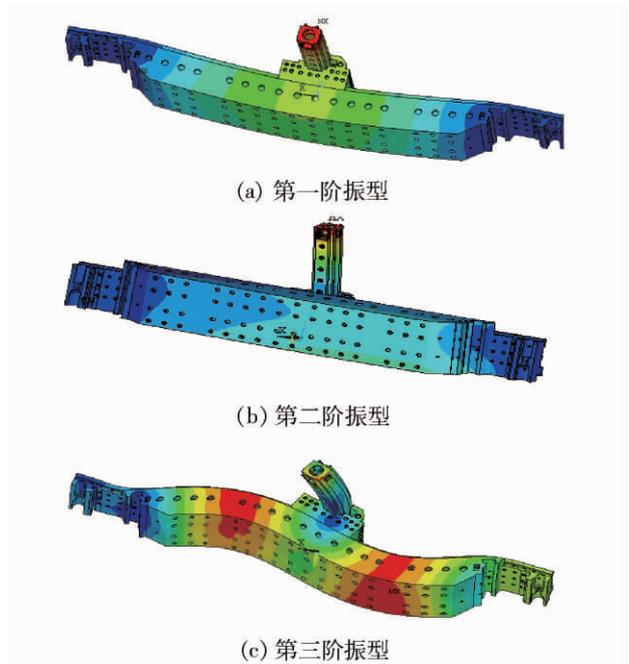


图 14 安装溜板和滑枕的横梁振型分析结果

Fig. 14 Mode shapes of the crossrail with saddle and vertical milling head by analysis

### 3.4 分析

对比 3 种安装情况下分段式横梁的动力学测试结果与整体式横梁有限元分析结果, 见表 1.

表 1 实验结果与有限元结果对比

Table 1 Comparison of test results and FEM results

安装情况	横梁的固有频率/Hz		误差/%
	模态实验	有限元分析	
自由状态	36.50	36.19	-0.87
装在立柱上	15.20	15.51	0.20
	30.01	29.79	-0.73
安装完整	18.54	18.65	0.59
	42.49	43.11	1.46
	81.22	81.73	0.63

由表1可知,无论横梁处于哪种装配状态,分段式横梁的动力学测试结果与整体式横梁有限元分析结果都十分接近.由此可见,分段式高强栓接横梁与整体式横梁体现出了相同的动态特性,这说明在合理的栓接条件与螺栓分布情况下,栓接结合部对分段式横梁动态特性的影响较小.

#### 4 结论

1) 分段式横梁在自由状态、初始安装状态、机床安装完整3种情况下的动力学特性与整体式横梁并无显著差别.

2) 横梁栓接结合部对横梁的动力学特性的影响较小.

#### 参考文献:

- [1] THOMLEY R H, CONNOLLY R. The effect of surface topography upon the static stiffness of machine tool joints [J]. *International Journal Machine Tool Design*, 1965, 5 (1/2): 57-74.
- [2] 黄玉美,董立新,董献国,等. 机械平面结合部静特性的研究及其在机床CAD中的应用[J]. *工程力学*, 1995, 12(1): 66-71.  
HUANG Yu-mei, DONG Li-xin, DONG Xian-guo, et al. Research on the static behavior of mechanical plane joints and its application to cad of machine tools [J]. *Engineering Mechanics*, 1995, 12(1): 66-71. (in Chinese)
- [3] 张学良,贾庭芳,文晓光,等. 悬臂梁结合面建模与接触刚度参数识别[J]. *太原科技大学学报*, 2010, 31(6): 478-490.  
ZHANG Xue-liang, JIA Ting-fang, WEN Xiao-guang, et al. Modeling and contact stiffness parameter identification of cantilever beam joint interfaces [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2010, 31(6): 478-490. (in Chinese)
- [4] 伍良生. 带弹性夹层的层板结构的振动特性研究[J]. *机械工程学报*, 1999, 35(1): 81-84.  
WU Liang-sheng. Study on vibration behaviour of sandwich structure with spring interlayer [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1999, 35(1): 81-84. (in Chinese)
- [5] 毛宽民,黄小磊,田红亮,等. 机床固定结合面参数识别及其拟合方法[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(3): 18-21.  
MAO Kuan-min, HUANG Xiao-lei, TIAN Hong-liang, et al. Identifying dynamic parameters of fixed joints in machine tools and its fitting method [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech: Natural Science Edition*, 2011, 39(3): 18-21. (in Chinese)
- [6] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problem of bolts joints and other fasteners [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279(3/4/5): 857-936.
- [7] 吴凤和,袁荣娟. 大直径螺栓的液压拉伸预紧[J]. *重型机械*, 2001(5): 30-31, 38.  
WU Feng-he, YUAN Rong-juan. Hydraulic pretension of major-diameter bolts [J]. *Heavy Machinery*, 2001(5): 30-31, 38. (in Chinese)
- [8] 李方泽,刘馥清,王正. 工程振动测试与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 413-416.
- [9] 赵宏林,丁庆新,曾鸣,等. 机床结合部特性的理论解析及应用[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(12): 208-214.  
ZHAO Hong-lin, DING Qing-xin, ZENG Ming, et al. Theoretic analysis on and application of behaviors of machine tool joints [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 208-214. (in Chinese)
- [10] ČELIČ D, BOLTEŽAR M. Identification of the dynamic properties of joints using frequency-response functions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 317(1/2): 158-174.
- [11] 郭铁能,李玲,蔡力钢,等. 基于频响函数辨识机械结合部动态参数的研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 69-92.  
GUO Tie-neng, LI Ling, CAI Li-gang, et al. Identifying mechanical joint dynamic parameters based on measured frequency response functions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 69-92. (in Chinese)

(责任编辑 刘 潇)