

仪表技术

# 电主轴单元实验平台螺栓结合部 动力学模型解析<sup>\*</sup>

沈浩<sup>1,2</sup> 王明威<sup>2</sup> 赵跃超<sup>2</sup> 谢黎明<sup>1,2</sup> 靳岚<sup>1,2</sup>

(兰州理工大学数字制造技术与应用省部级共建教育部重点实验室<sup>1</sup>, 机电工程学院<sup>2</sup>, 兰州 730050)

**摘要** 针对电主轴单元实验平台系统, 在铅垂方向上建立其螺栓结合部动力学模型, 利用结合面积分法计算出结合部的特性参数, 对螺栓结合部动力学模型进行理论解析, 提出减小振幅的措施。

**关键词** 电主轴 结合部 动力学模型

中图分类号 TH131.3; 文献标志码 B

电主轴单元作为数控机床的核心部件, 其动态性能的好坏至关重要, 电主轴单元的抗振性、旋转精度、刚度、动平衡等方面都有严格要求<sup>[1]</sup>。为了深入地电主轴单元进行研究, 建立电主轴单元动态性能检测实验平台具有重要意义, 在电主轴单元实验平台上监测电主轴在高速回转中动态回转精度变化, 刚度变化, 振动频谱等, 为高速电主轴单元的综合性能评价提供依据。图 1 为电主轴单元实验平台装置 3D 模型, 图中 1、2、3、4、5、6 分别表示构件: 平台、传感器 1、传感器 2、底座、电主轴、上盖。在铅垂方向上, 平台与底座, 底座与上盖之间靠螺栓连接, 形成两组螺栓结合部如图 2 所示。为确保在实验平台上准确提取电主轴单元动态特性数据, 螺栓结合部应具有足够的刚度, 底座和上盖的振幅不能影响电主轴的测试结果。因此有必要对两组螺栓结合部的刚度和阻尼特性参数进行计算, 建立螺栓结合部的动力学模型并对其进行研究。

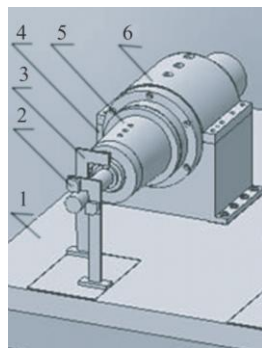


图 1 电主轴单元实验平台装置 3D 模型

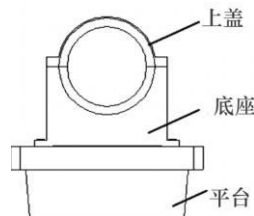


图 2 电主轴单元实验平台螺栓结合部

现采用结合面积分法对螺栓结合部的刚度和阻尼特性参数进行理论识别, 利用识别结果求出动力学模型中底座和上盖振幅表达式, 提出减小振幅的措施。

## 1 螺栓结合部特性参数的理论计算

螺栓结合部由螺栓和接触平面两部分组成, 其刚度和阻尼特性参数与螺栓联接幅和结合部的表面质量有关<sup>[2]</sup>。吉村允孝<sup>[3]</sup>对机床中的螺栓结合部作了研究, 测定了结合面不同结合条件下的等效刚度和等效阻尼, 获得了在结合部单位面积接触压力下, 不同结合条件下的等效刚度和阻尼数据图表, 提出了可利用结合面单位接触压力下的数据获

2010 年 5 月 6 日收到 国家重大科技专项项目 (2009ZX04001) 资助  
第一作者简介: 沈浩 (1965-), 男, 兰州理工大学机电工程学院副教授, 硕士。研究方向: 成套装备及自动化、数控技术及精密制造装备、复杂型面精密加工技术。E-mail: shen hao\_65@163.com.

得整个结合面的刚度和阻尼的方法,即结合面积积分法。这种方法的思想是,尽管结合面的接触面积不同,但只要平均接触压力相同,结合面每单位面积值的动态数据均能用于具有同样接触表面特性而形状和接触面积不同的一般结合面。当结构确定后,相应的结合面也就确定了,这时只要根据结合面条件由图表查出相应的单位面积的特性参数,乘以结合面的面积即得到结合面的等效刚度和阻尼。

图 3 表示横坐标平均接触压力  $P$  ( $\times 10^5$  Pa) 与纵坐标为单位接触面积的等效弹簧刚度  $k$  ( $\times 10^4$  N/m<sup>3</sup>) 的关系,图 4 表示横坐标平均接触压力  $P$  ( $\times 10^5$  Pa) 与纵坐标在等效粘性阻尼系数  $c$  和等效弹簧刚度  $k$  之比  $c/k$  的关系。

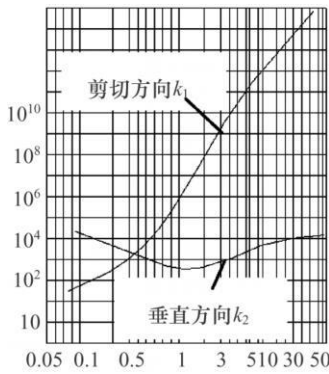


图 3 结合部刚度与平均接触压力的关系

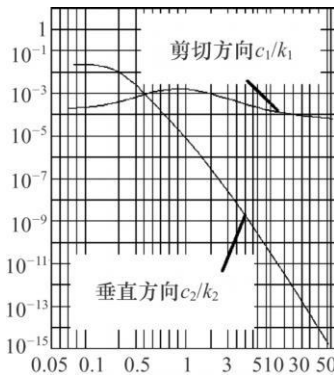


图 4 结合部阻尼与刚度之比与平均接触压力的关系

设  $m_1$ 、 $m_2$  分别表示底座和上盖的质量,平台与底座结合面面积为  $S_1$ ,底座与上盖结合面面积为  $S_2$ 。借助 3D 软件 SolidWorks 里的测量功能得出

$$m_1 = 111.76 \text{ kg} \quad m_2 = 63.68 \text{ kg} \quad S_1 = 0.045 \ 317 \ 9 \text{ m}^2, \\ S_2 = 0.055 \ 567 \ 17 \text{ m}^2.$$

平台与底座结合部表面的接触压力 (设为  $F_1$ ) 由螺栓联接的预紧力 (设为  $F_{01}$ ) 与底座、上盖的重力 (设为  $G_1$ ) 两部分组成,平台与底座由八副 M20 的螺栓联接,设每副螺栓的预紧力为  $F'_{01}$ ,通常规定<sup>[4]</sup>,拧紧后螺纹联接件的预紧力不得超过其材料的屈服极限  $\sigma_s$  的 80%。对于一般联接用的钢制螺栓联接的预紧力  $F_0$ ,按下列关系确定:

$$\begin{cases} \text{碳素钢螺栓} & F_0 \leq (0.6-0.7) \sigma_s A_1 \\ \text{合金钢螺栓} & F_0 \leq (0.5-0.6) \sigma_s A_1 \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $\sigma_s$ —螺栓材料的屈服极限;  $A_1$ —螺栓危险截面的面积,  $A_1 = 3.14 d_1^2 / 4$ ;  $d_1$  表示螺杆部分的最小直径。M20 的螺栓  $d_1$  取  $\varnothing 17.3$  mm,选择螺栓材质为碳素钢,性能等级为 5.6 级,查相关标准<sup>[4]</sup>  $\sigma_s = 300$  MPa 根据式 (1) 取:  $F_0 = 0.3 \sigma_s A_1$ 。

$$\text{得 } F_{01} = 8F'_{01} = 8 \times 0.3 \sigma_s A_1 = 1.7 \times 10^5 \text{ N}.$$

$$F_1 = F_{01} + G_1 = F_{01} + (m_1 + m_2)g = 171 \ 754 \text{ N}.$$

$$\text{平台与底座平均接触压力 } P_1 = \frac{F_1}{S_1} = 38 \times 10^5 \text{ MPa}$$

两组结合部的结合面均采用铣削加刮研的工艺,由图 3 及相关图表<sup>[3]</sup>得平均接触压力为  $38 \times 10^5$  MPa 的单位接触面积在垂直方向等效刚度  $k_1$  为  $125 \times 10^{10}$  N/m<sup>3</sup>,由图 4 及相关图表<sup>[3]</sup>得出平均接触压力为  $38 \times 10^5$  MPa 的单位接触面积的等效阻尼  $c_1$  为  $0.003 \ 13 \times 10^8$  N·s/m<sup>3</sup>。

得出平台与底座结合部垂直方向等效刚度和阻尼为

$$k_1 = k_{01} S_1 = 5.7 \times 10^8 \text{ N/m};$$

$$c_1 = c_{01} S_1 = 141.85 \text{ N} \cdot \text{s/m}.$$

同理,上盖与底座结合部表面的接触压力 (设为  $F_2$ ) 由其螺栓联接的预紧力 (设为  $F_{20}$ ) 与上盖的重力 (设为  $G_2$ ) 两部分组成,上盖与底座由八副 M16 的螺栓联接,用上述方法得出上盖与底座结合部垂直方向等效刚度和阻尼为

$$k_2 = 6.95 \times 10^9 \text{ N/m}; \quad c_2 = 173.93 \text{ N} \cdot \text{s/m}.$$

## 2 实验平台结合部动力学模型

建立结合部等效动力学模型是用一组弹簧和阻尼器来模拟结合部的动力特性,依据电主轴单元实验平台装置结构特征,可以用外激励模拟被测试电主轴产生的振动,设电主轴单元在测试过程中产生的激励为  $F_0 \sin \omega t$  方向相反分别作用于上盖和底座上。平台与地面的联接为刚性联接,采用集中质量法建立实验平台螺栓结合部铅垂方向的动力学模型<sup>[5]</sup>如图 5 所示。 $x_1$ 、 $x_2$  分别表示质块  $m_1$ 、 $m_2$  的位移, $k_1$ 、 $k_2$  及  $c_1$ 、 $c_2$  分别表示两组结合部铅垂方向的等效刚度和等效位移。

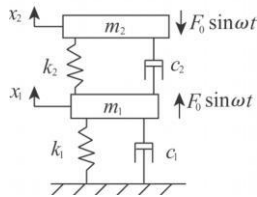


图 5 螺栓结合部铅垂方向的动力学模型

以静平衡位置为原点,振动微分方程为

$$X_1 = \frac{F_0 m_2 \omega^2}{k_1 k_2 - (k_2 m_1 + k_1 m_2 + c_1 c_2) \omega^2 + [k_2 c_1 + k_1 c_2 - (m_2 c_1 + m_1 c_2) \omega^2] \omega};$$

$$|X_1| = F_0 \frac{m_2 \omega^2}{\sqrt{[k_1 k_2 - (k_2 m_1 + k_1 m_2 + c_1 c_2) \omega^2]^2 + \omega^2 [k_2 c_1 + k_1 c_2 - (m_2 c_1 + m_1 c_2) \omega^2]^2}};$$

$$|X_2| = F_0 \frac{\sqrt{(k_1 - \omega^2 m_1)^2 + \omega^2 c_1^2}}{\sqrt{[k_1 k_2 - (k_2 m_1 + k_1 m_2 + c_1 c_2) \omega^2]^2 + \omega^2 [k_2 c_1 + k_1 c_2 - (m_2 c_1 + m_1 c_2) \omega^2]^2}};$$

将  $X_1$  和  $X_2$  代回到式 (2) 即得系统的稳态响应,把计算出的数据分别代入前式得到振幅  $|X_1|$ 、 $|X_2|$  是关于  $F_0$ 、 $\omega$  的关系式。

## 3 结束语

对电主轴单元实验平台螺栓结合部的动力模型理论解析可以看出,当外激励一定时,结合部件的振幅与结合部特性参数有关,可以通过增加螺栓

$$M \begin{bmatrix} \dots \\ x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dots \\ x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \dots \\ x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_0 \sin \omega t \\ F_0 \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{质量矩阵 } M = \begin{bmatrix} 111.76 & 0 \\ 0 & 63.68 \end{bmatrix};$$

$$\text{阻尼矩阵 } C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix};$$

$$\text{刚度矩阵 } K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}。$$

刚度矩阵  $K$  中  $k_1$ 、 $k_2$  元素及刚度矩阵  $C$  中  $c_1$ 、 $c_2$  元素分别代表等效刚度和等效阻尼。

$$\text{设 } F = F_0 e^{i\omega t}, X_1 = x_1 e^{i\omega t}, X_2 = x_2 e^{i\omega t} \quad (2)$$

代入方程 (1) 得

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K) \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_0 \\ F_0 \end{bmatrix}。$$

等式两边同时前乘  $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 得

$$\left\{ -\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_0 \end{bmatrix}$$

得  $X_2 = \frac{k_1 + k_2 + i\omega(c_1 + c_2) - \omega^2 m_1}{k_2 + i\omega c_2} X_1;$

预紧力,改善结合面的表面质量来提高螺栓结合部的刚度和阻尼,达到减小振幅的目的,保证电主轴测试结果的准确性。

## 参 考 文 献

- 1 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 2 廖伯瑜, 周新民, 尹志宏, 等. 现代机械动力学及其工程应用. 北京: 机械工业出版社, 2004

(下转第 5768 页)

## Design and Implementation of Camera Video Transmission System Based on FastNet

MA Chun-hua

(Computer Science and Technology Department, Suzhou University, Suzhou 152061, P.R.China)

[Abstract] In order to develop camera video transmission system, a new development program of camera video transmission system is given after doing deep research in FastNet file transmission technology. After developing the software test is done. The test results show that the software is effective and resolves remote video transmission by low cost.

[Key words] video image file transmission

(上接第 5743 页)

<sup>3</sup> Yoshimura M. Computer aided design improvement of machine tool structural incorporation joint dynamic data. Annals of CIRP, 1979; 28: 241-246

<sup>4</sup> 濮良贵 纪名刚. 机械设计. 北京: 高等教育出版社, 2001

<sup>5</sup> Singiresu S. 机械振动. 李欣业, 张明路, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009

## Theoretical Analysis on Dynamic Model of Motorized Spindles Cell Experiment Platform Bolt Joints\*

SHEN Hao<sup>1,2</sup>, WANG Ming-wei<sup>2</sup>, ZHAO Yue-chao<sup>2</sup>, XIE Liming<sup>1,2</sup>, JIN Lan<sup>1,2</sup>

(Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, The Ministry

Of Education<sup>1</sup>, School of Mechanical and Electrical Engineering Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, P.R.China)

[Abstract] Dynamics model was established in the vertical direction for motorized spindles cell experiment platform system. Parameters was calculated of joints in combined area of integration. Dynamic model of the bolt Joint is analyzed in theory. Methods are found to reduce the amplitude.

[Key words] motorized spindles joints dynamic model

(上接第 5765 页)

## Complexity Analysis of Sequence-based PAPR

### Reduction of OFDM Algorithm

ZHU Jia-ting HOU Jia

(School of Electronic Information, Suzhou University, Suzhou 215006, P.R.China)

[Abstract] Carrier intermetry (CI), selective mapping (SLM) and partial transmit sequence (PTS) are all sequence-based important schemes to reduce the peak to average power ratio (PAPR) of the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. The CI/OFDM system is presented first and then the computational complexity of CI, SLM, PTS schemes are analyzed. The computer simulations demonstrate that CI/OFDM scheme can reduce the PAPR of OFDM system efficiently with the lower computational complexity.

[Key words] CI/OFDM SLM PTS PAPR