

结合部法向载荷解析解修正与定量实验验证^{*}

田红亮 朱大林 秦红玲 林卫共

(三峡大学机械与材料学院, 宜昌 443002)

【摘要】 给出了识别结合部的2个重要表征参数(分形维数和分形粗糙度)的方法,修正了结合部法向总载荷公式。以XHK5140型自动换刀计算机数控立式镗铣床上的结合部为研究对象,以测试试件的实验结果为基准,按照振型相似定性比较、固有频率定量比较的原则,对结合部法向与切向接触刚度的理论解进行了验证。理论模型的振型与实验的振型皆一致,理论与实验固有频率的相对误差在-9%~9%之间。

关键词: 结合部 特性参数 解析解 实验

中图分类号: TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0213-06

Modification of Normal Load's Analytic Solutions for Joint Interface and Quantitative Experimental Verification

Tian Hongliang Zhu Dalin Qin Hongling Lin Weigong

(College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract

A method to identify such two important characteristic parameters of joint interfaces as fractal dimension and fractal roughness was given. The expression of normal total load in joint interface was modified. A joint interface was selected as an example in XHK5140 automatic tool-changing CNC vertical boring and milling machine tool on the basis of the experimental results about test specimen, the theoretical solutions for normal and tangential contact stiffness were verified in terms of qualitative comparison principle of resembling mode shape and quantitative comparison principle of natural frequencies. The theoretical mode shapes agreed well with the experimental results. The relative errors between the theoretical natural frequencies and the experimental ones are between -9% and 9%.

Key words Joint interface, Characteristic parameters, Analytic solutions, Experiment

引言

结合部的动态特性参数是影响机床整机动力学性能的关键因素。机床中出现的振动问题有60%以上源自结合部^[1]。温淑花等^[2~3]提出了结合部法向、切向接触刚度模型,但存在以下2个缺陷:①没有给出识别结合部的2个重要表征参数(分形维数和分形粗糙度)的方法。②计算原理存在先天性不足^[4]。

在外载荷的作用下,结合部位移的数量级一般为微米,分析前期大量实验数据,发现通过传统力学实验,得到结合部的力-位移迟滞曲线,可直接识别结合部刚度,但实验本身会导致无法接受的误差,实

验的结果也没有可再现性。而由实验得到实验频率,将解析频率与实验频率对比,间接验证结合部刚度解析解是否正确,这种方法实验本身的误差小,实验的结果也有可再现性。本文给出识别结合部的2个重要表征参数的方法,修正文献^[2~3]的结合部法向总载荷公式,以测试试件的实验结果为基准,按照振型相似定性比较、固有频率定量比较的原则,对文献^[2~3]中的结合部法向与切向接触刚度的理论解进行有效性验证。

1 2个表征参数的识别方法和法向总载荷的修正公式

一个粗糙表面的表面高度标准差、斜率标准

收稿日期: 2010-10-15 修回日期: 2011-01-27

^{*} 三峡大学青年科学基金资助项目(ZJX200605)

作者简介: 田红亮,讲师,博士生,主要从事界面力学研究, E-mail: thl19732003@yahoo.com.cn

差^[4-5]分别为

$$\sigma = \frac{G^{D-1}}{2 \sqrt{(2-D) \ln \gamma}} \sqrt{\omega_L^{2D-4} - \omega_h^{2D-4}} \tag{1}$$

$$\sigma' = \frac{G^{D-1}}{2 \sqrt{(D-1) \ln \gamma}} \sqrt{\omega_h^{2D-2} - \omega_L^{2D-2}} \tag{2}$$

式中 G ——分形粗糙度 D ——分形维数
 γ ——谱密度的尺度参数
 ω_L ——由采样长度决定的最低频率
 ω_h ——由仪器分辨率和滤波决定的最高频率

WM 函数的连续功率谱密度函数^[5]为

$$P(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \omega^{2D-5} \tag{3}$$

由式(3)可得粗糙表面 1、2 的连续功率谱密度函数分别为

$$P_1(\omega) = \frac{G_1^{2(D_1-1)}}{2 \ln \gamma_1} \omega^{2D_1-5} \tag{4}$$

$$P_2(\omega) = \frac{G_2^{2(D_2-1)}}{2 \ln \gamma_2} \omega^{2D_2-5} \tag{5}$$

不失一般性,设 $D_1 < D_2$ 。当 $G_1 = G_2 = 3 \times 10^{-10}$ m、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.5$ 时,粗糙表面 1、2 的连续功率谱密度函数如图 1 所示。

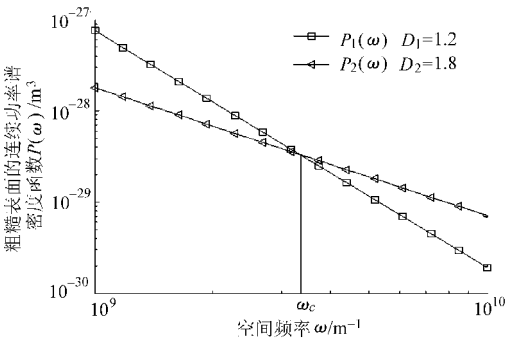


图 1 粗糙表面 1、2 的连续功率谱密度函数
Fig. 1 Continuous power spectrum density functions of rough surfaces 1 and 2

令 $P_1(\omega) = P_2(\omega)$ (6)

由图 1 和式(6),可解得唯一解即临界空间频率为

$$\omega = \omega_c \tag{7}$$

由式(7)可得两个粗糙表面 1、2 组成一个结合部的分形维数、分形粗糙度分别为

$$P(\omega) \approx P_1(\omega) > P_2(\omega) \quad (D = D_1; G = G_1; \omega < \omega_c) \tag{8}$$

$$P(\omega) \approx P_2(\omega) > P_1(\omega) \quad (D = D_2; G = G_2; \omega > \omega_c) \tag{9}$$

根据文献[4]的求解思路,省略具体推导过程,文献[2~3]中的结合部法向总载荷、无量纲法向总载荷应分别为

$$P = \frac{EG^{\frac{1}{2}}\psi^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{2\pi}} a_l'^{\frac{3}{4}} \ln \frac{a_l'}{a_c'} + \frac{3}{2} k \sigma_y \psi^{\frac{1}{4}} a_l'^{\frac{3}{4}} a_c'^{\frac{1}{4}} = \frac{2^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{\pi}} EG^{\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{4}} a_l'^{\frac{3}{4}} \ln \frac{a_l'}{a_c'} + 3k \sigma_y \psi^{\frac{1}{4}} a_l'^{\frac{3}{4}} a_c'^{\frac{1}{4}} \tag{10}$$

$$P^* = \frac{2}{3 \sqrt{\pi}} G^{*(D-1)} g_2(D) \psi^{(\frac{2-D}{2})^2} A_r^{*\frac{D}{2}} \cdot \left[\psi^{\frac{-2D^2+7D-6}{4}} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{\frac{3-2D}{2}} A_r^{*\frac{3-2D}{2}} - a_c^{*\frac{3-2D}{2}} \right] + k \phi g_3(D) \psi^{(\frac{2-D}{2})^2} A_r^{*\frac{D}{2}} a_c^{*\frac{2-D}{2}} \quad (D \neq 1.5) \tag{11}$$

$$P^* = \frac{2^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{\pi}} G^{*\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{16}} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{\frac{3}{4}} \ln \left(\frac{A_r^*}{3 \psi^{1/4} a_c^*} \right) + 3k \phi \psi^{\frac{1}{16}} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{\frac{3}{4}} a_c^{*\frac{1}{4}} \quad (D = 1.5) \tag{12}$$

其中 $g_2 = 2^{\frac{4-D}{2}} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{\frac{D}{2}} \frac{D}{3-2D}$
 $g_3 = \left(\frac{D}{2-D} \right)^{\frac{2-D}{2}}$

式中 ψ ——域扩展系数
 a_l ——一个最大弹性微接触点的面积
 a_c ——划分弹塑区域的临界面积
 A_r^* ——实际接触面积(无量纲)

2 法向与切向接触刚度理论解的验证

2.1 测试试件的设计

为了充分反映结合部的特性且使结构尽量简化,以 XHK5140 型自动换刀计算机数控立式镗铣床为研究对象,设计了如图 2 所示含结合部的结构,两个 M12 内六角头螺栓将测试试件 1、2 连接。通过

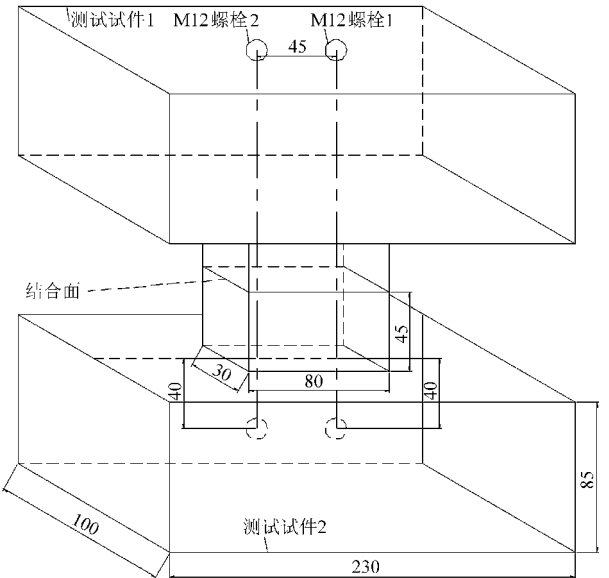


图 2 哑铃状测试试件

Fig. 2 Dumbbell test specimen

增加哑铃状试件两端的结构刚性,即弱化结合部的刚性和增加结合部的相对运动,可容易地激振出表征结合部相对运动的模态振型。

2.2 动力学实验装置

实验原理如图 3 所示,该设备包括比利时的 LMS Test. Lab 9B 型振动测试和分析系统。在模态测试的过程中,所用冲击力锤是美国 PCB 公司的 086D05 型压电式冲击力锤,冲击力锤的冲击头是尼龙材料,KAWASIMA 型川岛除湿机测得室内空气温度 27℃,室内空气相对湿度 67%。

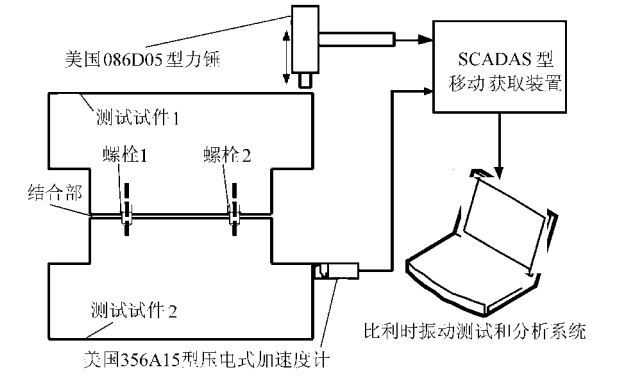


图 3 实验原理
Fig.3 Experimental principle

2.3 法向、切向接触刚度的计算

机床固定结合部多数为干接触,本文的结合部之间不存在介质,铣削加工、丙酮清洗两接触表面。试件的参数见表 1。

表 1 两配对表面的参数

Tab.1 Parameters of two mating surfaces

参数	HT250 表面 1	HT250 表面 2
E/GPa	115	117
μ	0.26	0.28
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 338	7 342
$\sigma/\mu\text{m}$	3.18	3.22
σ_y/MPa	238	242
H/MPa	703	697
σ'	$1.295\,7\times10^{-3}$	$1.296\,1\times10^{-3}$
γ	1.5	1.5
ω_L/m^{-1}	129.1	129.1
ω_h/m^{-1}	1 302.8	1 302.8

根据表 1 和式(1)、(2)并考虑式(8)、(9),可得结合部的 2 个重要表征参数为

$$D=1.46 \tag{13}$$

$$G=2.95\times10^{-10}\text{ m} \tag{14}$$

在每个螺栓均承受拧紧力矩 $T=90\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,将表 1 和式(13)、(14)的数据代入文献[2~3]的有关公式,可得结合部的法向与切向接触刚度,分别为

$$K_n=4.36\times10^9=4\times1.09\times10^9\text{ N/m} \tag{15}$$

$$K_t=1.124\times10^9=4\times2.81\times10^8\text{ N/m} \tag{16}$$

在每个螺栓均承受拧紧力矩 $60\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,同理得

$$K_n=1.304\times10^9=4\times3.26\times10^8\text{ N/m} \tag{17}$$

$$K_t=1.136\times10^9=4\times2.84\times10^8\text{ N/m} \tag{18}$$

在每个螺栓均承受拧紧力矩 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,同理得

$$K_n=1.096\times10^9=4\times2.74\times10^8\text{ N/m} \tag{19}$$

$$K_t=8.52\times10^8=4\times2.13\times10^8\text{ N/m} \tag{20}$$

结合部采用的模型是弹簧-阻尼模型,如图 4 所示,采用 4 组 x 方向的等效刚度 k_{1x} 、 k_{2x} 、 k_{3x} 、 k_{4x} 和阻尼 c_{1x} 、 c_{2x} 、 c_{3x} 、 c_{4x} , 4 组 y 方向的等效刚度 k_{1y} 、 k_{2y} 、 k_{3y} 、 k_{4y} 和阻尼 c_{1y} 、 c_{2y} 、 c_{3y} 、 c_{4y} , 4 组 z 方向的等效刚度 k_{1z} 、 k_{2z} 、 k_{3z} 、 k_{4z} 和阻尼 c_{1z} 、 c_{2z} 、 c_{3z} 、 c_{4z} 。这 4 组弹簧-阻尼器分别在结合部上的 4 个极限节点上,例如弹簧 k_{1x} 位于测试试件 1 的节点 1 与测试试件 2 的节点 5 之间,沿 x 轴方向;弹簧 k_{1y} 位于测试试件 1 的节点 1 与测试试件 2 的节点 5 之间,沿 y 轴方向;弹簧 k_{1z} 位于测试试件 1 的节点 1 与测试试件 2 的节点 5 之间,沿 z 轴方向。在图 2 中,有 3 种结合面,第 1 种结合面是试件 1、2 间的平面结合面,第 2 种结合面是螺栓与试件 2 的螺纹结合面,第 3 种结合面是螺栓头与试件 1 阶梯光孔的平面结合面。影响两个 M12 内六角头螺栓将测试试件 1、2 连接后的组件图 2 的特性的影响因素包括试件 1、2,上述 3 种结合面,以及螺栓。其中后 2 种结合面与螺栓的共同作用是将拧紧力矩 T 转化为施加在结合面上的法向总载荷 $P=T/(0.2d)$ (式(10)),式中, d 为螺栓的公称直径。

由式(15)、(16)可知,在 $90\text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下,切向

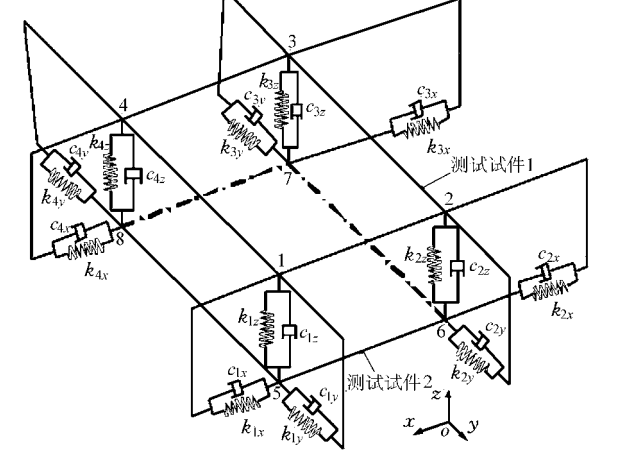


图 4 结合部的 3 自由度弹簧-阻尼模型
Fig.4 Three DOFs spring-damping model of joint interfaces

刚度为 $k_{1x} = k_{1y} = K_l/4 = 2.81 \times 10^8 \text{ N/m}$, 法向刚度为 $k_{1z} = K_n/4 = 1.09 \times 10^9 \text{ N/m}$; 文献[2~3]均没有给出结合部阻尼解析解, 事实上, 结合部阻尼解析解是一个至今没有解决的难题, 故采用 Yoshimura 的经典阻尼经验解^[6], 切向阻尼为 $c_{1x} = c_{1y} = 3.73 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, 法向阻尼为 $c_{1z} = 2.16 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。由式(17)、(18)可知, 在 $60 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, $k_{1x} = k_{1y} = K_l/4 = 2.84 \times 10^8 \text{ N/m}$, $k_{1z} = K_n/4 = 3.26 \times 10^8 \text{ N/m}$; $c_{1x} = c_{1y} = 3.75 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, $c_{1z} = 4.38 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。由式(19)、(20)可知, 在 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, $k_{1x} = k_{1y} = K_l/4 = 2.13 \times 10^8 \text{ N/m}$, $k_{1z} = K_n/4 = 2.74 \times 10^8 \text{ N/m}$; $c_{1x} = c_{1y} = 2.56 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, $c_{1z} = 2.85 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。

2.4 理论模态与实验模态的比较

采用 MSC. Nastran 有限元软件, 有限元模型如图 5 所示。图 5a 为不考虑结合部时的刚性连接模型, 这是固有频率最大值对应的一种理想结合极限情况。

在每个螺栓均承受 $90 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, 两种模型识别振型与实验识别振型的比较见表 2, 其中实验、

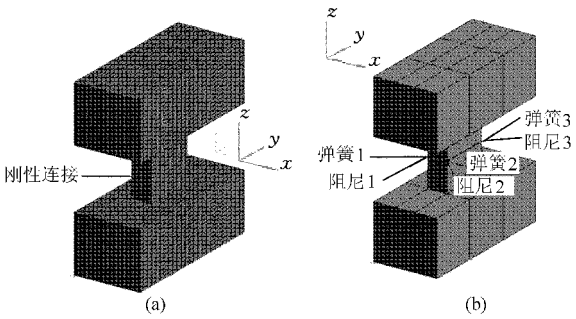


图 5 试件的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of test specimen

(a) 37 555 个节点, 34 848 个单元的刚性连接模型

(b) 72 个节点, 32 个单元的结合部模型

刚性连接模型、本文模型的前 6 阶振型均分别为绕 z 轴旋转、绕 y 轴旋转、绕 x 轴旋转、沿 x 轴平动、沿 y 轴平动、沿 z 轴平动。在每个螺栓均分别承受 30 、 60 、 $90 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, 两种模型识别固有频率与实验固有频率的比较见表 3。在 $90 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, 试件的实验频率响应函数如图 6 所示。在 $90 \text{ N}\cdot\text{m}$ 工况下, 刚性连接模型的前 6 阶固有频率皆大于实验前 6 阶固有频率。本文模型的相对误差在 $-9\% \sim 9\%$ 之间。

表 2 两种模型振型与实验振型的比较

Tab. 2 Comparison of two models' mode shapes with the experimental ones

阶数	实验振型	刚性连接模型振型	本文模型振型
1			
2			

续表 2

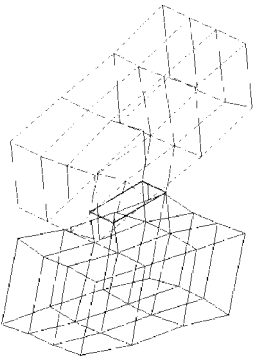
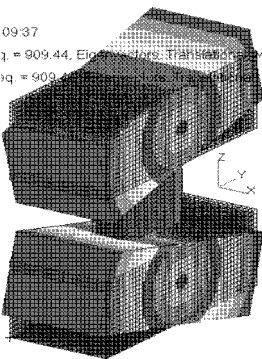
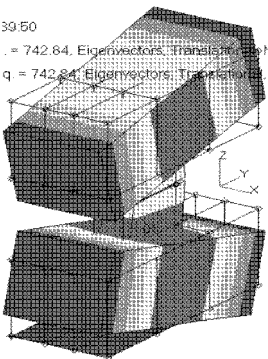
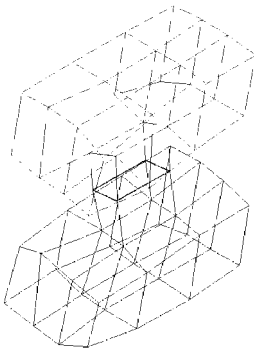
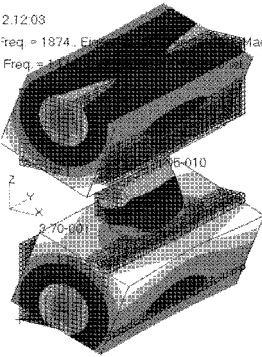
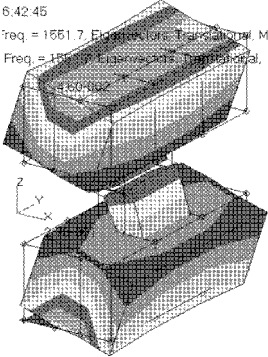
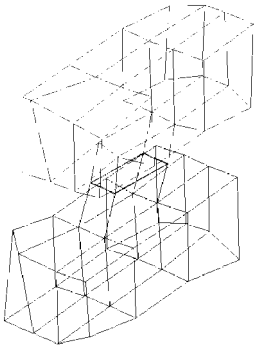
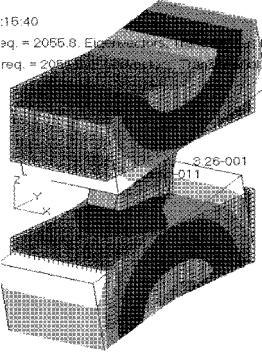
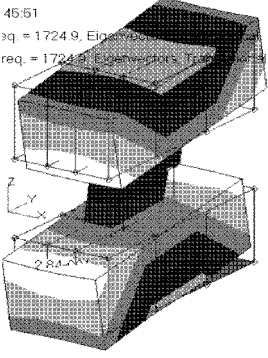
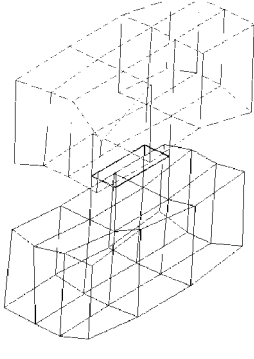
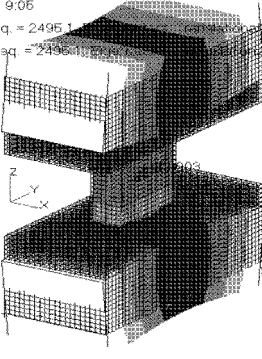
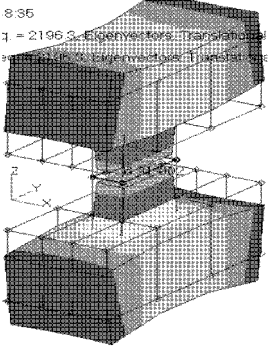
阶数	实验振型	刚性连接模型振型	本文模型振型
3		09.37 $\lambda_1 = 909.44$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 909.44$, Eigenvectors: Translational 	39.50 $\lambda_1 = 742.64$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 742.64$, Eigenvectors: Translational 
4		2.1203 freq. = 1874.1, Eigenvectors: Translational, M Freq. = 1874.1, Eigenvectors: Translational, M 	6.4245 freq. = 1551.7, Eigenvectors: Translational, M Freq. = 1551.7, Eigenvectors: Translational, M 
5		15.40 $\lambda_1 = 2055.8$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 2055.8$, Eigenvectors: Translational 	45.51 $\lambda_1 = 1724.9$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 1724.9$, Eigenvectors: Translational 
6		9.05 $\lambda_1 = 2495.1$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 2495.1$, Eigenvectors: Translational 	8.35 $\lambda_1 = 2195.3$, Eigenvectors: Translational $\lambda_2 = 2195.3$, Eigenvectors: Translational 

表 3 两种模型固有频率与实验固有频率的比较

Tab.3 Comparison of two models' first six-order natural frequencies with the experimental ones							
拧紧力矩 $T/N\cdot m$	各种模型结果	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
30	实验固有频率/Hz	354.539 7	377.889 6	620.307 4	1 600.526 9	1 610.657 8	1 760.116 9
	本文固有频率/Hz	362.28	406.46	606.47	1 509.8	1 574.2	1 627.4
	本文相对误差/%	2.183 2	7.560 5	-2.230 7	-5.668 6	-2.263 5	-7.540 2
60	实验固有频率/Hz	363.035 9	400.746 4	649.046 2	1 611.490 7	1 626.970 2	1 801.200 5
	本文固有频率/Hz	376.5	416.96	629.26	1 553.2	1 664.7	1 728.4
	本文相对误差/%	3.708 8	4.045 9	-3.048 5	-3.617 2	2.319 0	-4.041 8
90	实验固有频率/Hz	390.443 5	489.490 9	733.716 4	1 662.741 1	1 705.486 4	2 026.802 4
	刚性固有频率/Hz	454.92	657.47	909.44	1 874	2 055.8	2 495.1
	本文固有频率/Hz	416.61	448.46	742.84	1 551.7	1 724.9	2 196.3
	刚性连接误差/%	16.513 7	34.317 1	23.949 8	12.705 5	20.540 4	23.105 2
	本文相对误差/%	6.701 7	-8.382 4	1.243 5	-6.678 2	1.138 3	8.362 8

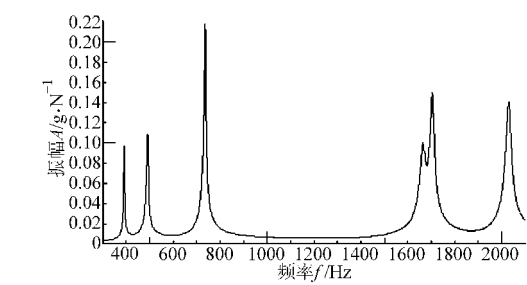


图 6 试件的实验频率响应函数

Fig.6 Experimental frequency response function of test specimen

3 结论

(1)给出了识别结合部的 2 个重要表征参数的方法,给出了结合部法向总载荷的修正公式。
(2)以测试试件的实验结果为基准,对结合部法向与切向接触刚度的理论解进行了验证。理论模型的振型与实验的振型皆一致,理论与实验固有频率的相对误差在 -9% ~ 9% 之间,能满足实际工程的需要。

参 考 文 献

1 蒋书运,祝书龙. 带滚珠丝杠副的直线导轨结合部动态刚度特性[J]. 机械工程学报,2010,46(1):92~99.
Jiang Shuyun, Zhu Shulong. Dynamic characteristic parameters of linear guideway joint with ball screw[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1):92~99. (in Chinese)

2 温淑花,张学良,武美先,等. 结合面法向接触刚度分形模型建立与仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(11):197~202.
Wen Shuhua, Zhang Xueliang, Wu Meixian, et al. Fractal model and simulation of normal contact stiffness of joint interfaces and its simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 197~202. (in Chinese)

3 温淑花,张学良,文晓光,等. 结合面切向接触刚度分形模型建立与仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(12):223~227.
Wen Shuhua, Zhang Xueliang, Wen Xiaoguang, et al. Fractal model of tangential contact stiffness of joint interfaces and its simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 223~227. (in Chinese)

4 田红亮,朱大林,秦红玲. MB 模型计算原理的修正[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2011,33(3):68~73.
Tian Hongliang, Zhu Dalin, Qin Hongling. Modification of MB model's algorithm principle[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2011, 33(3):68~73. (in Chinese)

5 Majumdar A, Bhushan Bharat. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 1991, 113(1):1~11.

6 Yoshimura M. Computer-aided design improvement of machine tool structure incorporating joint dynamics data[J]. Annals of the CIRP, 1979, 28(1):241~246.