

整个螺栓结合部的法向连接动刚度及试验验证

田红亮, 赵春华, 朱大林, 秦红玲, 刘芙蓉, 刘先名

(三峡大学机械与材料学院, 443002, 湖北宜昌)

摘要: 根据一种修正双变量 Weierstrass-Mandelbrot 函数, 获得了整个螺栓结合部法向连接动刚度的解析解. 采用等效表面的结构函数, 给出了识别结合部分形维数、分形粗糙度的理论与试验方法. 以风电机组五面体加工中心上的横梁-导轨结合部为对象, 以测试试件的试验模态为基准, 按照相似振型相关分析和固有频率定量比较的原则, 对整个螺栓结合部法向连接动刚度的理论解进行了验证, 结果表明, 理论模型的振型与试验振型相吻合, 理论的固有频率与试验的相对误差在 $-4.3\% \sim 5.1\%$ 之间.

关键词: 螺栓结合部; 法向连接动刚度; 振型相关分析; 频率响应函数

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0031-06

Analysis and Validation on Normal Connection Dynamic Stiffness of Bolted Joint Interface Ensemble

TIAN Hongliang, ZHAO Chunhua, ZHU Dalin, QIN Hongling, LIU Furong, LIU Xianming

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

Abstract: The analytic expression for the normal connection dynamic stiffness of whole bolted joint interface was deduced using a modified two-variable Weierstrass-Mandelbrot function. Theoretical and experimental methods to identify the fractal dimension and fractal roughness of the joint interface were presented with the structure function for the equivalent surface. A beam-rail joint interface was selected as a research object at the pentahedral machining center of a wind turbine, and experimental modes of test specimen were viewed as reference. The theoretical solution to the normal connection dynamic stiffness of the bolted joint interface ensemble was validated by the correlative analysis of analogous vibration shape and the quantitative comparison of natural frequencies. The theoretical vibration shapes agree with the experimental ones. The relative deviation of the theoretical natural frequencies from the experimental results is from -4.3% to 5.1% .

Keywords: bolted joint interface; normal connection dynamic stiffness; correlative analysis of vibration shape; frequency response function

相邻两零件之间的连接部位称为结合部^[1]. 螺栓结合部由螺栓和两接触平面组成. 螺栓结合部问题是结构分析由单件走向整机的一个关键问题. 尤晋闽等^[2]建立了结合面法向刚度的理论分形模型, 但该模型存在 2 个缺陷: ①没有给出识别结合部分

形维数、分形粗糙度的方法; ②没有对结合面法向刚度的理论解进行试验验证. 兰国生等^[3]在文献[4]的基础上提出了结合面法向接触刚度的理论模型, 但文献[4]将传统结合部的 Chang-Etsion-Bogy 统计模型^[5]参数 $b = (\pi q/2)^2$ 、硬度系数 $q = 0.454 +$

收稿日期: 2012-03-20. 作者简介: 田红亮(1973—), 男, 博士, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075234); 三峡大学博士科研启动基金资助项目(KJ2012B013).

网络出版时间: 2012-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120710.1758.003.html>

$0.41\nu_1$ 引入到了分形理论中的临界微接触点面积 a'_c 之中。

本文推导了整个螺栓结合部法向连接动刚度的解析解,给出了识别结合部分形维数、分形粗糙度的理论和试验方法,以测试试件的试验模态为比较基准,按照相似振型相关性分析和固有频率定量比较的原则,对整个结合部法向连接动刚度的理论解进行了有效性验证。

1 整个螺栓结合部的法向连接动刚度

多个螺栓将两粗糙表面 1、2 连接。在法、切向载荷作用下,粗糙表面 1、2 组成一个结合部。Weierstrass-Mandelbrot 函数^[6]为

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-1} \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{1/2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-2)n} \cdot \left\{ \cos \phi_{m,n} - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \cdot \cos \left(\arctan \frac{y}{x} - \frac{\pi m}{M} \right) + \phi_{m,n} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: L 为采样长度; G 为分形粗糙度; D 为分形维数, $1 < D < 2$; M 为构造表面重叠隆起部的个数; γ 为决定轮廓空间频率密度的参数, $\gamma > 1$; n 为频率指数; $n_{\max}$ 为与六晶格距离截止长度有关的频率指数上限; $\phi_{m,n}$ 为均匀分布的随机相位。

当 $M=1, m=1$ 时, 式(1)变为

$$z(x) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-1} (\ln \gamma)^{1/2} \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-2)n} \cdot \left[\cos \phi_{1,n} - \cos \left(\frac{2\pi \gamma^n x}{L} - \phi_{1,n} \right) \right] \quad (2)$$

基波频率指数 $n_0 = \log_{\gamma} \frac{L}{2r'}$ 在式(2)中对应的一个余弦项

$$z_0(x) = (\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1} (2r')^{2-D} \cdot \left[\cos \phi_{1,n_0} - \cos \left(\frac{\pi x}{r'} - \phi_{1,n_0} \right) \right] \quad (3)$$

当 $\phi_{1,n_0} = 0, x = r'$ 时, 由式(3)可得单峰干涉量

$$\delta = z_0(x)_{\max} = 2(\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1} (2r')^{2-D} \quad (4)$$

由式(4)可得单峰的曲率半径

$$R \approx \frac{r'^2}{2\delta} = \frac{r'^D}{2^{4-D} (\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1}} \quad (5)$$

$$R = \frac{a'^{0.5D}}{2^{4-D} \pi^{0.5D} (\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1}} \quad (6)$$

微接触点真实接触面积的半径

$$r = \frac{a^{0.5}}{\pi^{0.5}} = \frac{a'^{0.5}}{2^{0.5} \pi^{0.5}} \quad (7)$$

由式(7)可得施加在一个微接触点上的弹性力

$$\bar{P}_e = \frac{4E'r^3}{3R} = \frac{2^{1/2}}{3\pi^{1.5}} E' a'^{1.5} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)得

$$\bar{P}_e = \frac{2^{4.5-D} (\ln \gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D}} E' G^{D-1} a'^{1.5-0.5D} \quad (9)$$

Greenwood-Williamson 模型临界变形量^[7]

$$\delta_c = bR \frac{H^2}{E'^2} \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)得

$$\delta_c = b \frac{a'^{0.5D}}{2^{4-D} \pi^{0.5D} (\ln \gamma)^{1/2} G^{D-1}} \frac{H^2}{E'^2} \quad (11)$$

由此, 式(4)可改写为

$$\delta = \frac{2^{3-D} (\ln \gamma)^{1/2}}{\pi^{1-0.5D}} G^{D-1} a'^{1-0.5D} \quad (12)$$

式(11)除以式(12)得

$$\frac{\delta_c}{\delta} = \frac{a'^{D-1}}{2^{7-2D} \pi^{D-1} b^{-1} (E'/H)^2 G^{2D-2} \ln \gamma} = \left(\frac{a'}{a'_c} \right)^{D-1} \quad (13)$$

$$a'_c = \left(2^{7-2D} \pi^{D-1} b^{-1} \frac{E'^2}{H^2} G^{2D-2} \ln \gamma \right)^{\frac{1}{D-1}} \quad (14)$$

施加在一个完全塑性微接触点上的力^[6]

$$\bar{P}_p = Ha' \quad (15)$$

由式(9)可得 a'_c 对应的弹性力

$$\bar{P}_e(a'_c) = \frac{2^{4.5-D} (\ln \gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D}} E' G^{D-1} a_c'^{1.5-0.5D} \quad (16)$$

由式(15)可得 a'_c 对应的塑性力

$$\bar{P}_p(a'_c) = Ha'_c \quad (17)$$

两表面接近时, 假定施加在一个微接触点上的法向力连续变化, 即令 $\bar{P}_e(a'_c) = \bar{P}_p(a'_c)$ 得

$$2^{9-2D} E'^2 G^{2D-2} \ln \gamma = 9\pi^{3-D} H^2 a_c'^{D-1} \quad (18)$$

将式(14)代入式(18)得

$$b = \frac{9\pi^2}{4} \quad (19)$$

值得注意的是: 式(19)不同于文献[3-4]。文献[4]不合理的原因在于, 其根据文献[5]提供的 $q = 0.454 + 0.41\nu_1, \delta_c = \left(\frac{\pi q H}{2E'} \right)^2 R$, 应等于本文中的式(10), 因此文献[4]的 $b = (\pi q / 2)^2$ 。

将式(19)代入式(14)得

$$a'_c = \left(\frac{2^{9-2D} E'^2}{9\pi^{3-D} H^2} G^{2D-2} \ln \gamma \right)^{\frac{1}{D-1}} \quad (20)$$

由式(9)得

$$\frac{d\bar{P}_e}{da'} = \frac{2^{4.5-D} (1.5 - 0.5D) (\ln \gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D}} E' G^{D-1} a'^{0.5-0.5D} \quad (21)$$

由式(12)得

$$\frac{d\delta}{da'} = \frac{2^{3-D}(1-0.5D)(\ln\gamma)^{1/2}}{\pi^{1-0.5D}} G^{D-1} a'^{-0.5D} \quad (22)$$

式(21)除以式(22),可得两微凸体之间互相作用的法向连接动刚度^[8]

$$k_n = \frac{d\bar{P}_e}{da'} / \frac{d\delta}{da'} = \frac{4(3-D)}{3(2\pi)^{1/2}(2-D)} E' a'^{1/2} \quad (23)$$

在一个微接触点的截断面积^[9]上

$$n(a') = 0.5D\Psi^{1-0.5D} a_L'^{0.5D} a'^{-1-0.5D}, \quad 0 < a' \leq a_L' \quad (24)$$

整个螺栓结合部的法向连接动刚度、总法向载荷分别为

$$K_n(a_L' > a_c') = \int_{a_c'}^{a_L'} k_n n(a') da' \quad (25)$$

$$\bar{P}(a_L' > a_c') = \int_{a_c'}^{a_L'} \bar{P}_e n(a') da' + \int_0^{a_c'} \bar{P}_p n(a') da' \quad (26)$$

将式(23)、式(24)代入式(25),式(9)、式(15)、式(24)代入式(26),分别得

$$K_n(A_r > A_{rc}) = \begin{cases} \frac{4D(3-D)\Psi^{1-0.5D}}{3(2\pi)^{1/2}(2-D)(1-D)} E' a_L'^{0.5D} \cdot \\ (a_L'^{0.5-0.5D} - a_c'^{0.5-0.5D}), & D \neq 1 \\ \frac{2(1+5^{1/2})}{3(2\pi)^{1/2}} E' a_L'^{1/2} \ln \frac{a_L'}{a_c'}, & D = 1 \end{cases} \quad (27)$$

$$\bar{P}(A_r > A_{rc}) = \begin{cases} \frac{2^{4.5-D} D \Psi^{1-0.5D} (\ln\gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D} (3-2D)} E' G^{D-1} a_L'^{0.5D} (a_L'^{1.5-D} - \\ a_c'^{1.5-D}) + \frac{D\Psi^{1-0.5D}}{2-D} H a_L'^{0.5D} a_c'^{1-0.5D}, & D \neq 1.5 \\ 2(2.000\ 7)^{0.25} E' (G \ln\gamma)^{1/2} \left(\frac{a_L'}{\pi}\right)^{0.75} \ln \frac{a_L'}{a_c'} + \\ 3H a_L'^{0.75} (2.000\ 7 a_c')^{0.25}, & D = 1.5 \end{cases} \quad (28)$$

值得一提的是,式(28)不同于文献[3].

根据式(24),可得总的真实接触面积^[9]

$$A_r = \int_0^{a_L'} \frac{a'}{2} n(a') da' = \frac{D\Psi^{1-0.5D}}{4-2D} a_L' \quad (29)$$

由此,式(27)~式(29)可变为

$$K_n(A_r > A_{rc}) = \begin{cases} \frac{4D(3-D)\Psi^{1-0.5D}}{3\pi^{1/2}(2-D)(1-D)} \cdot \\ E' a_L'^{0.5D} (a_L'^{0.5-0.5D} - a_c'^{0.5-0.5D}), & D \neq 1 \\ \frac{2(1+5^{1/2})}{3\pi^{1/2}} E' a_L'^{1/2} \ln \frac{a_L'}{a_c'}, & D = 1 \end{cases} \quad (30)$$

$$\bar{P}(A_r > A_{rc}) =$$

$$\begin{cases} \frac{2^{6-1.5D} D \Psi^{1-0.5D} (\ln\gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D} (3-2D)} E' G^{D-1} a_L'^{0.5D} (a_L'^{1.5-D} - \\ a_c'^{1.5-D}) + \frac{2D\Psi^{1-0.5D}}{2-D} H a_L'^{0.5D} a_c'^{1-0.5D}, & D \neq 1.5 \\ 2(2.000\ 7)^{0.25} E' (G \ln\gamma)^{1/2} \left(\frac{2a_L'}{\pi}\right)^{0.75} \ln \frac{a_L'}{a_c'} + \\ 6H a_L'^{0.75} (2.000\ 7 a_c')^{0.25}, & D = 1.5 \end{cases} \quad (31)$$

$$A_r = \frac{D\Psi^{1-0.5D}}{2-D} a_L' \quad (32)$$

假设弹性、完全塑性微接触点均存在,此时 $a_L' > a_c'$,可得真实临界接触面积为

$$A_{rc} = \frac{D\Psi^{1-0.5D}}{2-D} a_c' \quad (33)$$

根据式(32),将式(30)、式(31)无量纲化得

$$K_n^*(A_r^* > A_{rc}^*) = \begin{cases} \frac{4D(3-D)\Psi^{1+0.25D^2-D}}{3\pi^{1/2}(2-D)(1-D)} \left(\frac{2-D}{D} A_r^*\right)^{0.5D} \cdot \\ \left[\left(\frac{2-D}{D} \Psi^{0.5D-1} A_r^*\right)^{0.5-0.5D} - a_c^{*0.5-0.5D}\right], & D \neq 1 \\ \frac{2(2+2(5)^{1/2})^{1/2}}{3\pi^{1/2}} A_r^{*1/2} \ln \frac{(5^{1/2}-1)A_r^*}{2a_c^*}, & D = 1 \end{cases} \quad (34)$$

$$P^*(A_r^* > A_{rc}^*) =$$

$$\begin{cases} \frac{2^{6-1.5D} D \Psi^{1+0.25D^2-D} (\ln\gamma)^{1/2}}{3\pi^{1.5-0.5D} (3-2D)} \cdot \\ G^{*D-1} \left(\frac{2-D}{D} A_r^*\right)^{0.5D} \cdot \\ \left[\left(\frac{2-D}{D} \Psi^{0.5D-1} A_r^*\right)^{1.5-D} - a_c^{*1.5-D}\right] + \\ 2\Psi^{1+0.25D^2-D} K\phi A_r^{*0.5D} \left(\frac{D}{2-D} a_c^*\right)^{1-0.5D}, & D \neq 1.5 \\ 2(2.000\ 7)^{0.062\ 5} (G^* \ln\gamma)^{1/2} \left(\frac{A_r^*}{1.5\pi}\right)^{0.75} \cdot \\ \ln \frac{A_r^*}{3(2.000\ 7)^{0.25} a_c^*} + \\ 2(2.000\ 7)^{0.062\ 5} K\phi A_r^{*0.75} (3a_c^*)^{0.25}, & D = 1.5 \end{cases} \quad (35)$$

式中

$$a_c^* = \frac{a_c}{A_a} = \frac{1}{2} \left(\frac{2^{9-2D}}{9\pi^{3-D} K^2 \phi^2} G^{*2D-2} \ln\gamma \right)^{\frac{1}{D-1}} \quad (36)$$

为无量纲划分弹塑性区域的临界面积; $K_n^* =$

$$\frac{K_n}{E'(A_a)^{1/2}}; A_{rc}^* = \frac{A_{rc}}{A_a} = \frac{D\Psi^{1-0.5D}}{2-D} a_c^*; P^* = \frac{\bar{P}}{E'A_a};$$

$G^* = \frac{G}{(A_a)^{1/2}}$; A_a 为表观接触面积; $A_r^* = \frac{A_r}{A_a}$ 为接触

率^[10]; $K = \frac{H}{\sigma_y}$, σ_y 为较软材料的屈服强度; $\phi = \frac{\sigma_y}{E}$.

值得说明的是,式(35)不同于文献[3].

2 识别分形参数的理论方法

式(2)对应的近似连续功率谱^[4]

$$P(\omega) = \frac{1}{2\ln\gamma} G^{2D-2} |\omega|^{2D-5} \quad (37)$$

由定积分的换元法得

$$\int_0^{+\infty} t^{m-1} e^{-xt} dt = \int_0^{+\infty} \frac{y^{m-1}}{x^m} e^{-y} dy = \frac{1}{x^m} \Gamma(m) \quad (38)$$

$$\frac{1}{x^m} = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^{+\infty} t^{m-1} e^{-xt} dt \quad (39)$$

以下定积分^[11]为

$$\int_0^{+\infty} e^{-tx} \cos x dx = \frac{t}{t^2 + 1} \quad (40)$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{t^{m-2}}{t^2 + 1} dt = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{x^{0.5m-1.5}}{x+1} dx \quad (41)$$

式(41)可改写^[11]为

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{t^{m-2}}{t^2 + 1} dt &= \\ \frac{1}{2} \int_0^1 u^{0.5m-1.5} (1-u)^{0.5-0.5m} du &= \\ \frac{1}{2} B(0.5m-0.5, 1.5-0.5m) &= \\ \frac{\pi}{2\sin[\pi(0.5m-0.5)]} \end{aligned} \quad (42)$$

式中: $u = \frac{x}{x+1}$ 为积分变量.

式(39)的定积分为

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} (1 - \cos x) x^{2D-5} dx &= \int_0^{+\infty} \frac{1}{x^m} (1 - \cos x) dx = \\ \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^{+\infty} t^{m-1} \left(\int_0^{+\infty} e^{-tx} dx - \int_0^{+\infty} e^{-tx} \cos x dx \right) dt \end{aligned} \quad (43)$$

将式(40)代入式(43)得

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} (1 - \cos x) x^{2D-5} dx &= \\ \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^{+\infty} t^{m-1} \left(\frac{1}{t} - \frac{t}{t^2 + 1} \right) dt &= \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^{+\infty} \frac{t^{m-2}}{t^2 + 1} dt \end{aligned} \quad (44)$$

将式(42)代入式(44)得

$$\int_0^{+\infty} (1 - \cos x) x^{2D-5} dx = \frac{\pi}{2\Gamma(5-2D)\sin[\pi(2-D)]} \quad (45)$$

需要指出的是,式(45)不同于文献[12].

式(45)可改写为

$$\int_0^{+\infty} (1 - \cos x) x^{2D-5} dx = \frac{\Gamma(2D-3)\sin[(D-1.5)\pi]}{4-2D} \quad (46)$$

根据式(2),函数 $z(x_1)$ 与 $z(x_2)$ 之间的结构函数为

$$\langle [z(x_1) - z(x_2)]^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\omega) [1 - e^{i\omega(x_1-x_2)}] d\omega \quad (47)$$

将式(37)代入式(47)得

$$\begin{aligned} \langle [z(x_1) - z(x_2)]^2 \rangle &= \\ \frac{1}{\ln\gamma} G^{2D-2} \left[\int_0^{+\infty} (1 - \cos x) x^{2D-5} dx \right] |x_1 - x_2|^{4-2D} \end{aligned} \quad (48)$$

将式(46)代入式(48)得

$$\begin{aligned} \langle [z(x_1) - z(x_2)]^2 \rangle &= \\ \frac{\Gamma(2D-3)\sin[(D-1.5)\pi]}{(4-2D)\ln\gamma} G^{2D-2} |x_1 - x_2|^{4-2D} \end{aligned} \quad (49)$$

令 $x_1 = x, x_2 = x - \tau$, 整个结合部的结构函数为

$$\begin{aligned} S(\tau) &= \langle [z(x) - z(x-\tau)]^2 \rangle = \\ \begin{cases} \frac{\Gamma(0^+)}{2\ln\gamma} \tau^2 \rightarrow +\infty, & D \rightarrow 1^+ \\ \frac{\Gamma(2D-2)\sin[(D-1.5)\pi]}{(4-2D)(2D-3)\ln\gamma} G^{2D-2} \tau^{4-2D}, & D \neq 1.5 \\ \frac{\pi}{2\ln\gamma} G\tau, & D = 1.5 \\ \frac{1}{0^+ \ln\gamma} G^2 \rightarrow +\infty, & D \rightarrow 2^- \end{cases} \end{aligned} \quad (50)$$

整个结合部的结构函数与粗糙表面 1、2 的结构函数之间的关系为

$$S(\tau) = S_1(\tau) + S_2(\tau) \quad (51)$$

令

$$S_1(\tau) = S_2(\tau) \quad (52)$$

可解得唯一解,即临界尺度滞后为

$$\tau = \tau_c \quad (53)$$

由式(53)可得整个结合部的分形维数、分形粗糙度分别为

$$S(\omega) \approx S_2(\omega) \geq S_1(\omega) \quad (D = D_2; G = G_2; \tau \leq \tau_c) \quad (54)$$

$$S(\omega) \approx S_1(\omega) > S_2(\omega) \quad (D = D_1; G = G_1; \tau > \tau_c) \quad (55)$$

不失一般性,由式(50)可得一个直线方程

$$\lg S(\tau) = (4-2D)\lg\tau + (2D-2)\lg G +$$

$$\lg \frac{\Gamma(2D-2)\sin[(D-1.5)\pi]}{(4-2D)(2D-3)\ln\gamma} \quad (56)$$

令

$$4-2D=c \quad (57)$$

$$\lg G=-g \quad (58)$$

并代入式(56)得

$$\lg S(\tau)=c\lg\tau-(2D-2)g+\lg \frac{\Gamma(2D-2)\sin[(D-1.5)\pi]}{(4-2D)(2D-3)\ln\gamma} \quad (59)$$

再令

$$-(2D-2)g+\lg \frac{\Gamma(2D-2)\sin[(D-1.5)\pi]}{(4-2D)(2D-3)\ln\gamma}=b \quad (60)$$

并代入式(59)得

$$\lg S(\tau)=c\lg\tau+b \quad (61)$$

3 整个螺栓结合部法向连接动刚度的试验验证

3.1 测试试件

以风电机组五面体加工中心为例,制造了如图1所示的龙门横梁-导轨,该横梁-导轨由两根尺寸均为1 505 mm×63 mm×58 mm的长梁通过20个M16螺栓联接而成。

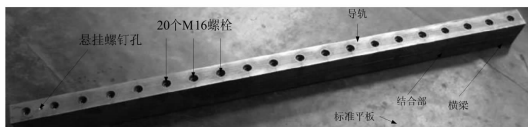


图1 横梁-导轨测试试件

3.2 动力学试验装置

动力学测试设备如图2所示。该设备包括:Belgium的LMS Test. Lab Rev 10B机械振动测试分析仪;美国PCB公司的086D05压电式冲击力锤;尼龙材料冲击头;356A16 Serial Number 95396内置集成电路压电式三轴方向加速度传感器。试验的目的是,在自由-自由条件下将有限元结果与试验进行比较,要求支承柔软,连接点的运动幅度小,并选运动幅度最小的点作为支承点。唯一激振点选择如图2所示,用力锤在试件左上角沿两螺栓孔中心连线的方向(y轴)激振,或沿x轴激振,有效激振为5次激振的平均值。

3.3 分形参数试验识别及法向连接动刚度

横梁-导轨由三峡大学机械与材料学院的VMC



图2 试验装置

-850型数控铣床铣削加工,用 CH_3COCH_3 清洗两接触表面并吹干。横梁-导轨配对,材料为45#钢,表面的参数为:弹性模量205 GPa,泊松比0.3,密度7 833 kg/m^3 ,表面粗糙度3.077 μm ,软材料的屈服强度353 MPa,软材料的硬度500 MPa。

设采样长度 $T=15\text{ mm}$,频率间隔或频率步长 $\Delta f=1/T$,是频率信号中的谱线间隔。频率步长越小,频率的分辨率越高,如果测量的平均次数保持不变,则测量时间更长。采样表面的轮廓高度离散点数, $l=15\ 000$;采样空间间隔, $\Delta x=1\ \mu\text{m}$;空间采样点数(谱线点数) $N_s=T/\Delta x=15\ 000$;采样频率 $f_s=1/\Delta x$,最大频率 $f_{\max}=f_s/2$;频率范围 $f=f_{\max}(0\sim(N_s/2)-1)/N_s$;角频率 $\Omega=2\pi f$ 。

对式(2)的 $z(x)$ 进行补零的Fourier变换,将 $z(x)$ 的尾部补零使 $z(x)$ 的长度达到 N_s ,再对补零后的数据进行快速Fourier变换,得到补零的Fourier变换 $Y=\text{fft}(z, N_s)$;根据 Y 得到 $P(\omega)=|Y|^2/N_s$,根据式(47)得到整个结合部的结构函数 $S(\tau)$,然后对实测数据($\lg\tau, \lg S(\tau)$)进行最小二乘法的1次多项式拟合;识别整个结合部的特征参数 $D=1.263\ 9, G=2.058\ 8\times 10^{-12}\text{ m}$ 。

域扩展系数 Ψ 与分形维数 D 之间的非线性超越方程为

$$\Psi^{1-0.5D}-(1+\Psi^{-0.5D})^{\frac{D-2}{D}}=\frac{2-D}{D} \quad (62)$$

此时 $D=1.263\ 9$ 对应的 $\Psi=2.223\ 765\ 256\ 667\ 338$ 。用20个M16螺栓将图1的横梁-导轨连接,每个螺栓皆承受拧紧力矩90 $\text{N}\cdot\text{m}$,再将该横梁-导轨表面参数与识别的相关数据代入式(34)、式(35)进行联立求解,可得整个结合部的法向连接动刚度 $K_n=1.537\times 10^{10}\text{ N/m}$ 。

3.4 理论模态与试验模态比较

将法向连接动刚度嵌入到MSC.AFEA2005r2软件中,建立横梁-导轨有限元分析模型。在每个螺栓均承受90 $\text{N}\cdot\text{m}$ 的工况下,本文识别振型与试验识别振型的相关性比较见表1.2种方法识别固有频率的比较见表2。

表 1 本文振型与试验振型的相关性比较

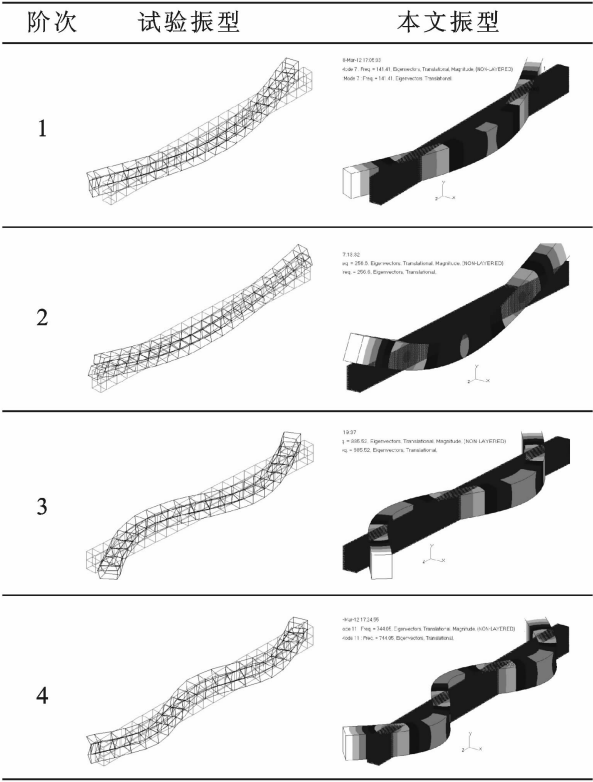


表 2 本文固有频率与试验固有频率的比较

方法	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	f_4/Hz
试验	147.743 4	244.252 8	401.504 5	772.692 0
本文	141.41	256.60	385.52	744.05
相对误差/%	-4.286 8	5.055 1	-3.981 2	-3.706 8

4 结 论

通过推导整个螺栓结合部法向连接动刚度的解析解,利用整个结合部的结构函数给出了识别结合部分形维数、分形粗糙度的理论与试验方法.对整个结合部法向连接动刚度的理论解进行了验证,理论模型的振型与试验的振型十分吻合,理论与试验固有频率的相对误差在-4.3%~5.1%之间.

参考文献:

[1] 黄玉美,张广鹏,高峰. 虚拟样机整机结构特性边界元仿真 [M]. 北京:机械工业出版社,2004:152,156.
[2] 尤晋闽,陈天宁. 结合面法向动态参数的分形模型 [J]. 西安交通大学学报,2009,43(9):91-94.
YOU Jinmin, CHEN Tianning. Fractal model for normal dynamic parameters of joint surfaces [J]. Journal

of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9):91-94.
[3] 兰国生,张学良,丁红钦,等. 基于分形理论的结合面改进接触模型 [J]. 农业机械学报,2011,42(10):217-223,229.
LAN Guosheng, ZHANG Xueliang, DING Hongqin, et al. Modified contact model of joint interfaces based on fractal theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):217-223,229.
[4] JIANG Shuyun, ZHENG Yunjian, ZHU Hua. A contact stiffness model of machined plane joint based on fractal theory [J]. ASME Journal of Tribology, 2010, 132(1):1-7.
[5] CHANG W R, ETSION I, BOGY D B. Adhesion model for metallic rough surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 1988, 110(1):50-56.
[6] YAN W, KOMVOPOULOS K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7):3617-3624.
[7] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical and Physical Sciences, 1996, 295(1442):300-319.
[8] 田红亮,朱大林,方子帆,等. 赫兹接触 129 年 [J]. 三峡大学学报:自然科学版,2011,33(6):61-71.
TIAN Hongliang, ZHU Dalin, FANG Zifan, et al. 129 years of Hertz contact [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2011, 33(6):61-71.
[9] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: part I Elastic contact and heat transfer analysis [J]. ASME Journal of Tribology, 1994, 116(4):812-823.
[10] 田红亮,赵春华,朱大林,等. 弹塑性三维各向异性分形表面的接触分析 [J]. 三峡大学学报:自然科学版,2012,34(1):69-73.
TIAN Hongliang, ZHAO Chunhua, ZHU Dalin, et al. Contact analysis of elastoplastic three-dimensional anisotropic fractal surfaces [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2012, 34(1):69-73.
[11] 《数学手册》编写组. 数学手册 [M]. 北京:高等教育出版社,2008:282,590.
[12] WANG S, KOMVOPOULOS K. A fractal theory of the temperature distribution at elastic contacts of fast sliding surfaces [J]. ASME Journal of Tribology, 1995, 117(2):203-215.

(编辑 苗凌)