

文章编号: 1000-4750(2015)04-0220-08

基于薄层单元的螺栓连接结构接触面 不确定性参数识别

姜 东^{1,2}, 吴邵庆^{1,2}, 史勤丰^{1,2}, 费庆国^{1,2}

(1. 江苏省工程力学分析重点实验室, 南京 210096; 2. 东南大学土木工程学院工程力学系, 南京 210096)

摘 要: 提出了一种螺栓连接接触面不确定性参数识别方法, 首先采用薄层单元对接触面进行参数化, 然后根据不确定性识别方法识别薄层单元参数。以四螺栓搭接结构试验模型为研究对象, 开展接触面不确定性参数识别方法仿真研究。采用 Monte-Carlo 方法构造待识别参数真实值样本, 代入基准有限元模型中计算获得具有统计意义的仿真试验数据; 采用不确定性参数识别方法预测薄层单元参数均值与标准差, 仿真结果表明: 该方法能够较为准确的模拟接触面法向和切向接触刚度, 并显著提高连接结构的建模效率, 建立反映真实结构动态性能统计特征的有限元模型。

关键词: 螺栓连接; 接触面; 薄层单元; 不确定性; 参数识别

中图分类号: TB122; O327 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0920

CONTACT INTERFACE PARAMETER IDENTIFICATION OF BOLTED JOINT STRUCTURE WITH UNCERTAINTY USING THIN LAYER ELEMENT METHOD

JIANG Dong^{1,2}, WU Shao-qing^{1,2}, SHI Qin-feng^{1,2}, FEI Qing-guo^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Nanjing 210096, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An approach to identifying the contact interface parameters of bolted joint structure with uncertainty is proposed in this paper. Thin layer element theory is firstly adopted to parameterize the contact interface, and then the parameters of thin layer element are identified using the uncertain parameter identification approach. Simulation is conducted to verify the proposed method based on an experimental model, which is an assembled structure with four bolted joints. Adopting the Monte-Carlo sampling method to construct test samples, numerical simulation results show that when considering the uncertainty in contact interface parameters of bolted joint structure, the proposed uncertain parameter identification method can be used to accurately identify the mean value and the standard deviation of the elastic modulus, the normal and tangential stiffness of the contact interface are simulated with satisfactory. The dynamical finite element model with statistical significance can be constructed at the same time.

Key words: bolted joint; contact interface; thin layer element; uncertainty; parameter identification

收稿日期: 2013-10-09; 修改日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(10902024); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0086); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(1105007001)

通讯作者: 费庆国(1977—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 从事结构动力学与控制研究(E-mail: qgFei@seu.edu.cn).

作者简介: 姜 东(1985—), 男, 湖北人, 讲师, 博士, 从事结构动力学研究(E-mail: jiangdonal@gmail.com);

吴邵庆(1982—), 男, 浙江人, 讲师, 博士, 从事结构动力学研究(E-mail: cesqwu@seu.edu.cn);

史勤丰(1987—), 男, 江苏人, 工程师, 硕士, 从事结构动力学模拟研究(E-mail: sqf1021@qq.com).

螺栓连接在机械结构中应用广泛,其接触面力学性能关系到结构局部刚度和整体动力学性能。连接结构在安装、运行过程中,接触刚度的非线性以及螺栓预紧力的变化导致结构存在不确定性。

螺栓连接的有限元模拟方法主要分为两类:非线性接触算法和界面单元法^[1-2]。前者需要不断通过接触算法判别接触状态,迭代计算结构响应,计算量较大;后者能够在保证计算精度的前提下降低计算量。弹簧单元、一般单元(Generic element)、Iwan模型、虚拟材料方法、零厚度单元(Zero thickness element)和薄层单元(Thin layer element)较常用于接触界面力学性能参数化。Ren 和 Beards^[3]仅考虑了接触界面的平动自由度,转动自由度通过平动自由度来实现;Ahmadian 和 Jalali^[4]采用一般单元方法模拟螺栓连接的搭接情况,通过试验频响函数来识别单元的参数;Segalman^[5]研究表明,Iwan 模型能够描述接触面复杂的干摩擦现象,张相盟和王本利等^[6]进一步对修正的 Iwan 模型进行研究;杨红平和傅卫平等^[7]基于分形几何和接触力学理论,提出机械接触面法向接触刚度计算模型。Tian 等^[8]采用虚拟各向同性材料模拟固定连接界面,有限元分析频率与试验值误差小于 9%。黄开放等^[9]基于虚拟材料方法研究了预紧力变化的连接结构动力学仿真,其结果与试验值误差在±6%以内。Mayer 和 Gaul^[10]利用零厚度单元和薄层单元提出能够有效模拟接触面的方法。薄层单元理论最早来自于模拟岩石接触的力学分析^[11-12],近年来已成功应用于螺栓连接等形式的机械结构模拟^[13-14]。

针对连接不确定性方面,Ibrahim 等^[15]较系统的评述了螺栓等连接结构的不确定性与动力学问题;Fukuoka 等^[16]指出连接刚度的离散性主要反映在法向接触刚度的不确定性,并提出了一种预测接触刚度的数值方法;Guo 和 Zhang^[17]提出将连接结构的接触刚度及接触阻尼作为随机分布参数处理,使用基于响应面法的模型修正方法识别接触参数;Hanss 等^[18]采用模糊数学描述连接结构刚度与阻尼的不确定性,根据试验数据对其进行识别。本文基于薄层单元理论,提出一种螺栓连接接触面不确定性参数识别方法。

1 薄层单元基本理论

采用薄层单元模型螺栓连接接触面。考虑尺寸为 $l_1 \times l_2 \times d$ 的薄层单元,根据虚位移原理得到如下

的虚功方程:

$$\delta W = \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^d \{\sigma\}^T \{\delta \varepsilon\} dx dy dz = \delta \{u\}_n^T \mathbf{K} \{u\}_n \quad (1)$$

其中: l_1 和 l_2 是薄层单元在单元局部坐标系下平面内两个方向的长度; d 为单位厚度。通过等参变换计算薄层单元刚度矩阵 $\mathbf{K}$:

$$\mathbf{K} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \det(\mathbf{J}) d\xi d\eta d\zeta \quad (2)$$

如图 1 为薄层单元等参变换,其中 ξ 、 η 、 ζ 是自然坐标符号, $\mathbf{J}$ 为雅克比矩阵,当自然坐标与局部坐标的坐标轴方向一致, $\mathbf{J}$ 有如下形式:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \partial x / \partial \xi & \partial y / \partial \xi & \partial z / \partial \xi \\ \partial x / \partial \eta & \partial y / \partial \eta & \partial z / \partial \eta \\ \partial x / \partial \zeta & \partial y / \partial \zeta & \partial z / \partial \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1/2 & 0 & 0 \\ 0 & l_2/2 & 0 \\ 0 & 0 & d/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

采用二节点高斯积分方法计算式(2),可得到薄层单元刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 的数值计算表达式:

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 [B(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)]^T \mathbf{C} [B(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)] \cdot \det[\mathbf{J}(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)] w_{\xi,i} w_{\eta,j} w_{\zeta,k} \quad (4)$$

其中 w_ξ 、 w_η 、 w_ζ 为高斯积分权函数。

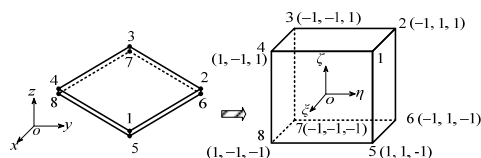


图1 薄层单元等参变换

Fig.1 Isoparametric transformation of thin-layer element

对于薄层单元,假设厚度 d 远远小于另两个方向的特征尺寸 l_1 和 l_2 , Desai 等^[11]的研究表明,当采用泊松比为零($\nu=0$)的材料本构关系时,单元的面内应变分量(ε_x , ε_y , γ_{xy})和应力分量(σ_x , σ_y , τ_{xy})将被忽略。采用单元形函数进行分析,则有 $\partial N_i / \partial z$ 远大于 $\partial N_i / \partial x$ 和 $\partial N_i / \partial y$ (其中 N_i 为单元形函数),进而可以认为 $\partial N_i / \partial x = \partial N_i / \partial y \approx 0$,从而得出应变分量 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \gamma_{xy} \approx 0$,因此薄层单元在高斯点上的应变分量只有 3 个不为 0,应变分量简化为 $\varepsilon = [\varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T$ 。若接触面的法向 $\{e\}_n$ 和两个切向 $\{e\}_t$ 分别定义为薄层单元局部坐标系的 z 、 x 、 y 方向。按照前面的分析,假设连接界面法向和切向接触性能相互独立,两个切向的接触性能具有一致性,表征界面接触性能的薄层单元本构方程为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_{tx} \\ \tau_{ty} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n & 0 & 0 \\ 0 & G_t & 0 \\ 0 & 0 & G_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \gamma_{tx} \\ \gamma_{ty} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中 E_n 、 G_t 分别是薄层单元的法向弹性常数和切向剪切模量, 由连接结构接触面性能决定。

在有限元计算中, 若采用各向同性材料模拟薄层单元, 其本构方程为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda+2G & \lambda & \lambda & & & \\ & \lambda+2G & \lambda & & & \\ & & \lambda+2G & & & \\ & & & G & & \\ & & & & G & \\ \text{对称} & & & & & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\lambda = \frac{G(E-2G)}{E-3G} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (7)$$

其中: λ 为拉梅常数; $G=E/2(1+\nu)$ 为材料剪切模量。各向同性材料仅有 2 个独立的材料参数, 弹性模量 E 和剪切模量 G 。根据薄层单元的基本理论, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{xy} \approx 0$, 材料本构方程将退化为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda+2G & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

2 不确定性参数识别方法

不确定性的有限元模型修正方法在确定性的方法基础上发展起来。采用基于摄动法的不确定性有限元模型修正理论来识别接触面参数。

确定性的有限元模型修正可归结为:

$$\begin{cases} \min & J(p) = \varepsilon^T W \varepsilon = \|W^{1/2}(\mathbf{z}^m - \mathbf{z}^a(p))\|_2^2 \\ \text{s. t.} & p_1 \leq p \leq p_2 \end{cases} \quad (9)$$

即运用优化的思想对参数进行识别, 目标函数 $J(p)$ 为试验与计算模态参数的加权残差取极小值。 ε 为模态参数的残差, $\mathbf{z}^m$ 、 $\mathbf{z}^a(p) \in R^n$ 分别为试验与计算的模态参数, 加权矩阵 W 为反映各模态参数残差相对权重的对角阵。设定待识别参数的初值, 采用灵敏度分析的方法迭代求解优化问题式(9), 第 j 个迭代步的问题描述为:

$$W^{1/2}(\mathbf{z}^m - \mathbf{z}_j^a) = \mathbf{S}_j(\mathbf{p}_{j+1} - \mathbf{p}_j) \quad (10)$$

其中 $\mathbf{S}_j = W^{1/2} \partial \mathbf{z}_j / \partial \mathbf{p}_j$ 表示模态参数对待识别参数

的加权灵敏度矩阵。

考虑试验模态参数以及结构参数的不确定性, 式(10)中参数应考虑为随机参数:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_j = \bar{\mathbf{p}}_j + \delta \mathbf{p}_j \\ \mathbf{z}^m = \bar{\mathbf{z}}^m + \delta \mathbf{z}^m \\ \mathbf{z}_j^a = \bar{\mathbf{z}}_j^a + \delta \mathbf{z}_j^a \\ \mathbf{S}_j = \bar{\mathbf{S}}_j + \delta \mathbf{S}_j \end{cases} \quad (11)$$

即将式(10)中的每一项都表示为一个均值和随机变量之和, 分别用 $\bar{\cdot}$ 和 $\delta \cdot$ 表示。其中 $\delta \cdot$ 为一均值为 0 的随机变量, $\bar{\mathbf{z}}_j^a = \mathbf{z}^a(\bar{\mathbf{p}}_j)$ 、 $\bar{\mathbf{S}}_j = \mathbf{S}(\bar{\mathbf{p}}_j)$ 分别为待识别参数取均值的模态参数计算值与灵敏度矩阵。可将灵敏度矩阵的不确定项表示为:

$$\delta \mathbf{S}_j = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \mathbf{z}^m(k)} \delta \mathbf{z}^m(k) \quad (12)$$

其中:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \mathbf{z}^m(k)} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \bar{\mathbf{p}}_j(i)} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}_j(i)}{\partial \mathbf{z}^m(k)} \bigg|_{\mathbf{z}^m(k)=\bar{\mathbf{z}}^m(k)} \quad (13)$$

将式(11)代入式(10)可得不确定性结构参数识别问题的迭代方程:

$$W^{1/2}[\bar{\mathbf{z}}^m + \delta \mathbf{z}^m - (\bar{\mathbf{z}}_j^a + \delta \mathbf{z}_j^a)] = (\bar{\mathbf{S}}_j + \delta \mathbf{S}_j)[\bar{\mathbf{p}}_{j+1} + \delta \mathbf{p}_{j+1} - (\bar{\mathbf{p}}_j + \delta \mathbf{p}_j)] \quad (14)$$

采用摄动法, 将式(14)中的关于 δ 的零阶项和一阶项分离, 可得:

$$O(\delta^0): W^{1/2}(\bar{\mathbf{z}}^m - \bar{\mathbf{z}}_j^a) = \bar{\mathbf{S}}_j(\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) \quad (15)$$

$$O(\delta^1): W^{1/2}(\delta \mathbf{z}^m - \delta \mathbf{z}_j^a) - \delta \mathbf{S}_j(\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) = \bar{\mathbf{S}}_j(\delta \mathbf{p}_{j+1} - \delta \mathbf{p}_j) \quad (16)$$

求解式(15), 得到待识别参数均值的迭代格式:

$$\bar{\mathbf{p}}_{j+1} = \bar{\mathbf{p}}_j + (\bar{\mathbf{S}}_j^T \bar{\mathbf{S}}_j)^{-1} \bar{\mathbf{S}}_j^T W^{1/2}(\bar{\mathbf{z}}^m - \bar{\mathbf{z}}_j^a) \quad (17)$$

或

$$\bar{\mathbf{p}}_{j+1} = \bar{\mathbf{p}}_j + \bar{\mathbf{G}}_j(\bar{\mathbf{z}}^m - \bar{\mathbf{z}}_j^a) \quad (18)$$

其中 $\bar{\mathbf{G}}_j = (\bar{\mathbf{S}}_j^T \bar{\mathbf{S}}_j)^{-1} \bar{\mathbf{S}}_j^T W^{1/2}$ 为转换矩阵。若计算模态参数对待识别参数的加权灵敏度矩阵病态, 采用求解不适定问题的正则化方法求解式(15), 转换矩阵变为:

$$\bar{\mathbf{G}}_j = (\bar{\mathbf{S}}_j^T \bar{\mathbf{S}}_j + \lambda \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{S}}_j^T W^{1/2} \quad (19)$$

其中, λ 为正则化参数, 通过以 $\|\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j\|$ 为横坐标, $\|\bar{\mathbf{S}}_j(\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) - W^{1/2}(\bar{\mathbf{z}}^m - \bar{\mathbf{z}}_j^a)\|$ 为纵坐标作 L-curve 图求得 λ 的值^[19]。

高斯分布随机变量的统计特性可以由参数的

均值和协方差矩阵完整描述。若考虑试验模态参数的不确定性对灵敏度矩阵的影响,由式(16)得到待识别参数不确定性项的迭代格式:

$$\delta \mathbf{p}_{j+1} = \delta \mathbf{p}_j + \bar{\mathbf{G}}_j (\delta \mathbf{z}^m - \delta \mathbf{z}_j^a) - (\bar{\mathbf{S}}_j^T \bar{\mathbf{S}}_j + \lambda \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{S}}_j^T \delta \bar{\mathbf{S}}_j (\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) \quad (20)$$

令,

$$\mathbf{A}_j = (\bar{\mathbf{S}}_j^T \bar{\mathbf{S}}_j + \lambda \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{S}}_j^T \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \mathbf{z}^m(1)} (\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) \right. \\ \left. \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \mathbf{z}^m(2)} (\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) \cdots \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_j}{\partial \mathbf{z}^m(n)} (\bar{\mathbf{p}}_{j+1} - \bar{\mathbf{p}}_j) \right] \quad (21)$$

式中, $\partial \bar{\mathbf{S}}_j / \partial \mathbf{z}^m(n)$ 在试验模态参数的均值点 $\mathbf{z}^m(n) = \bar{\mathbf{z}}^m(n)$ 计算得到, 因此 $\mathbf{A}_j$ 为一确定性的矩阵。则式(20)改写为:

$$\delta \mathbf{p}_{j+1} = \delta \mathbf{p}_j + \bar{\mathbf{G}}_j (\delta \mathbf{z}^m - \delta \mathbf{z}_j^a) - \mathbf{A}_j \delta \mathbf{z}^m \quad (22)$$

根据式(11)的描述, 用 δv 表示参数 v 的不确定性, 由协方差的定义可得:

$$\text{Cov}(v, v) = \text{Cov}(\bar{v} + \delta v, \bar{v} + \delta v) = \text{Cov}(\delta v, \delta v) \quad (23)$$

若不考虑试验模态参数的不确定性对待识别参数不确定性的影响, 即假定试验与结构参数之间不相关, 则 $\text{Cov}(\delta \mathbf{z}^m, \delta \mathbf{p}_j) = 0$, $\text{Cov}(\delta \mathbf{z}^m, \delta \mathbf{z}_j^a) = 0$; 从 $\mathbf{A}_j$ 的表达式(21)中可以看出, 在此假定下式(22)中的 $\mathbf{A}_j$ 也可忽略不计。则得到待识别参数协方差矩阵的迭代格式:

$$\text{Cov}(\delta \mathbf{p}_{j+1}, \delta \mathbf{p}_{j+1}) = \text{Cov}(\delta \mathbf{p}_j, \delta \mathbf{p}_j) + \bar{\mathbf{G}}_j \text{Cov}(\delta \mathbf{z}^m, \delta \mathbf{z}^m) \bar{\mathbf{G}}_j^T + \bar{\mathbf{G}}_j \text{Cov}(\delta \mathbf{z}_j^a, \delta \mathbf{z}_j^a) \bar{\mathbf{G}}_j^T - \text{Cov}(\delta \mathbf{p}_j, \delta \mathbf{z}_j^a) \bar{\mathbf{G}}_j^T - \bar{\mathbf{G}}_j \text{Cov}(\delta \mathbf{z}_j^a, \delta \mathbf{p}_j) \quad (24)$$

采用式(24)计算待识别参数的协方差矩阵将避免计算模态参数对待识别参数的二阶灵敏度矩阵 $\partial \bar{\mathbf{S}}_j / \partial \bar{\mathbf{p}}_j$ 而降低计算量。

3 算例研究

研究对象为两块铝板通过四个螺栓搭接而成, 螺栓型号均为 M10。结构几何尺寸和搭接情况如图 2 所示, 搭接板的材料参数如表 1 所示。进行模态试验, 测定了前 4 阶弯曲模态。如图 3 为螺栓搭接结构前四阶振型及固有频率。基于模态试验结果,

表 1 搭接板的材料参数

Table 1 Material properties of the plate

材料名称	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/GPa	ν
铝合金	2800	68.7	0.33

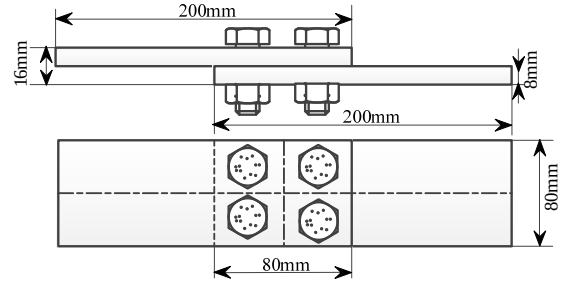


图 2 螺栓搭接结构

Fig.2 Assembled structure with bolted-joints

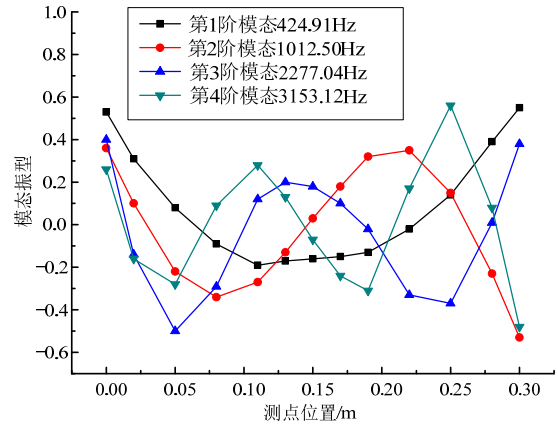


图 3 螺栓搭接结构前四阶试验振型

Fig.3 The first four experimental modal shapes of bolted structure

识别连接接触面薄层单元的各向同性本构关系材料参数, 作为不确定性参数识别方法仿真研究的基准模型。

3.1 确定性参数识别

建立螺栓连接结构的有限元模型, 忽略螺栓质量和螺孔, 搭接板用实体单元模拟, 界面采用各向同性的薄层单元模拟。

3.1.1 薄层单元参数确定

1) 单元厚度

选择适当的薄层单元厚度对计算结果有较大的影响。对于薄层单元建模单元厚度的选择, 定义一个比例系数^[1,11-12]:

$$\text{Ratio} = \frac{\max(l_1, l_2)}{d} \quad (25)$$

对于比例系数 Ratio 取值的研究, Desai 等^[11]的研究基于线性本构薄层单元的静力接触问题, 认为 Ratio 取值在 10~100 时, 即使弹性模量不够准确, 能够得到较为满意的结果。Sharma 等^[12]认为 Ratio 取值 5, 结果仍可以满足精度。

2) 接触刚度

能够反映界面接触性能的薄层材料参数取值

是基于薄层单元螺栓连接结构有限元分析关键问题之一。若接触面保持线性粘合状态,该情况下弹性矩阵中的 G 和 E 都是常数^[1];若发生微观滑移或者宏观滑移现象,则采用弹塑性本构关系等效。常数 E 和 G 一般需要通过试验得出。如 Sharma 和 Desai^[12] 通过测试接触界面的应力与位移之间的关系得到法向接触刚度和切向接触刚度和切向位移,该方法虽然 是基于混凝土的接触试验中,对于机械连接结构界面接触问题具有一定的参考意义。Schmidt 等^[20]通过螺栓连接结构的切向受力试验,得到出接触面等效剪切模量和切向刚度的关系。

3.1.2 识别结果

采用确定性的识别方法,将薄层单元的材料参

数识别转化为优化问题。待识别参数为接触面薄层单元材料弹性模量 E 。目标函数 $J(p)$ 定义为在待识别参数合理取值范围 $p_1 \leq p \leq p_2$ 内,前四阶弯曲振型的计算和试验结果残差加权平方和最小。采用数值方法求解可得 p_{j+1} ,迭代直到待识别参数 p 收敛,且计算模态参数精度满足要求,则得到准确的接触面材料参数。

在接触界面定义两种材料模拟接触关系。如图 4 为螺栓搭接结构有限元网格与接触面薄层单元示意图。在约两倍螺杆直径的矩形区域内定义各向同性材料 1,弹性模量为 E_1 ,其他区域定义各向同性材料 2,弹性模量为 E_2 。比例系数 $Ratio=10$,材料的密度取 0,泊松比取 0。

表 2 参数识别前后计算模态参数误差比较

Table 2 Error comparison of computational modal data between the initial and the identified model					
模态阶数	试验值/Hz	初始值/Hz	初始误差/(%)	识别后/Hz	识别误差/(%)
1	424.91	437.55	2.97	423.5	-0.33
2	1012.50	1044.80	3.19	1035.7	2.29
3	2277.04	2314.00	1.62	2244.3	-1.44
4	3153.12	3209.10	1.78	3126.0	-0.86

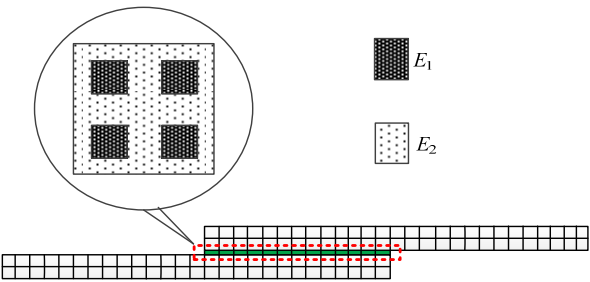


图 4 接触面薄层单元有限元网格划分
Fig.4 Thin-layer element mesh of the contact surface

如图 5 为接触面薄层单元参数迭代收敛曲线,表 2 为参数识别前后计算模态参数误差比较,表 3 为接触面薄层单元材料参数初始值和识别值。从识别结果可以看出,计算模态频率误差均在 2.5%以内,识别精度较高。从表 3 可以看出,薄层单元材料的弹性参数在螺栓附近明显高于其他区域,这与实际的搭接结构的接触关系一致。因此基于各向同性材料的薄层单元能够较好的模拟多个螺栓搭接结构的连接性能。识别得到的模型将作为下一步进行不确定性螺栓连接参数识别方法研究的基准模型。

表 3 薄层单元材料参数初始值和识别值

Table 3 Material parameter values of initial and identified thin-layer element		
待识别参数/(N/m ²)	E_1 /GPa	E_2 /MPa
初始值	3.0×10^9	3.0×10^6
识别值	8.63×10^8	9.33×10^5

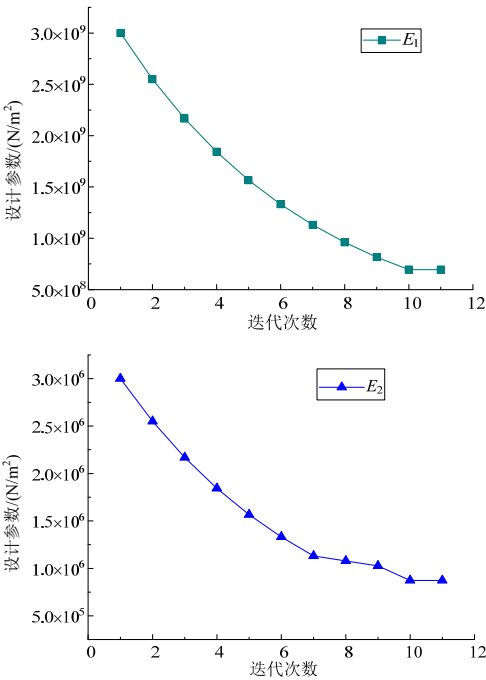


图 5 接触面薄层单元参数迭代收敛曲线
Fig.5 Parameter convergence of thin-layer element of the contact surface

3.2 不确定性参数识别

在基准模型基础上开展螺栓连接不确定性参数识别方法仿真研究。假设接触面薄层单元参数中 E_1 、 E_2 存在不确定性。通过仿真构造试验样本,以此验证弹性参数不确定性识别算法。根据确定性参

数的识别结果, 假设 E_1 、 E_2 真实统计特性为:

$$\mu(E_1) = 8.63 \times 10^8 \text{ N/m}^2, \mu(E_2) = 9.33 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma(E_1) = 8.63 \times 10^7 \text{ N/m}^2, \sigma(E_2) = 9.33 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

其中 μ 和 σ 分别表示均值和标准差, 即假设复合材料弹性参数标准差为均值的 10%。仿真的试验模态参数样本采用正态分布的 Mento-Carlo 采样, 根据不确定参数 E_1 、 E_2 的真实统计特性构造 1000 个随机样本, 代入有限元模型中计算得到仿真的试验模态参数样本, 由此可得试验模态参数的均值和协方差矩阵。如图 6 为仿真试验模态参数散点图。

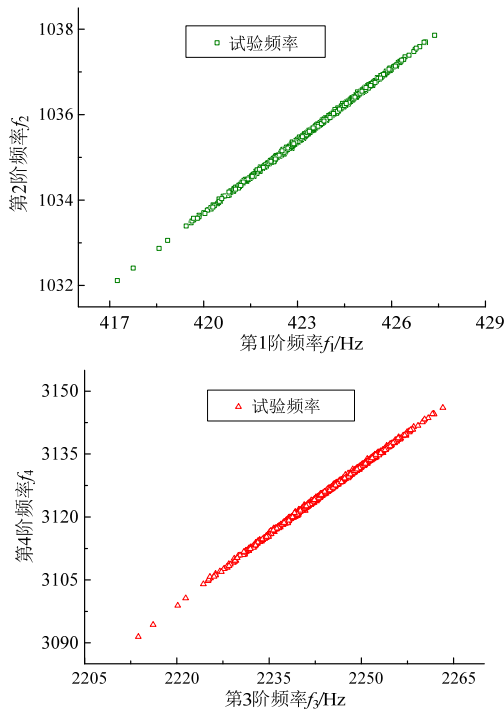


图 6 仿真试验模态参数散点图

Fig.6 Scatter plot of simulated test modal data

在开展连接结构接触面参数不确定性识别方法仿真研究时, 首先估计待识别参数的初始均值和标准差:

$$\mu_0(E_1) = 6.904 \times 10^8 \text{ N/m}^2, \mu_0(E_2) = 7.464 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_0(E_1) = 0, \sigma_0(E_2) = 0$$

即假设薄层单元的弹性模量 E_1 、 E_2 均值被低估了 20%; 假设参数的均方差初始值均为 0。

不考虑试验模态参数与待识别参数之间的相关性, 针对螺栓连接接触面不确定性参数识别开展仿真研究。试验的模态参数通过仿真得到, 试验数据不受其他因素影响, 取加权矩阵 $W=I$; 由于迭代过程中识别问题的方程组并未出现病态, 正则化参数 $\lambda=0$ 。

如图 7 为薄层单元参数均值迭代收敛曲线, 图

8 为薄层单元参数标准差迭代收敛曲线。从图中可以看出, 薄层单元参数均值和标准差能够快速收敛。表 4 为识别前后接触面薄层单元参数比较, 识别后参数均值的误差绝对值由 20% 下降到 3% 以下; 表 5 为识别前后模态频率统计特性比较, 识别后模态参数均值与方差的精度明显提高, 与试验结果相比, 前四阶模态频率均值不存在误差, 均方差误差

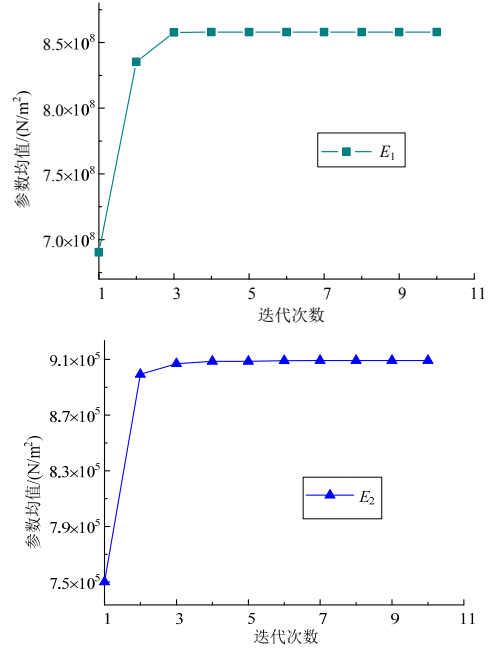


图 7 薄层单元参数均值迭代收敛曲线

Fig.7 Convergence of the mean-value of thin-layer element parameters

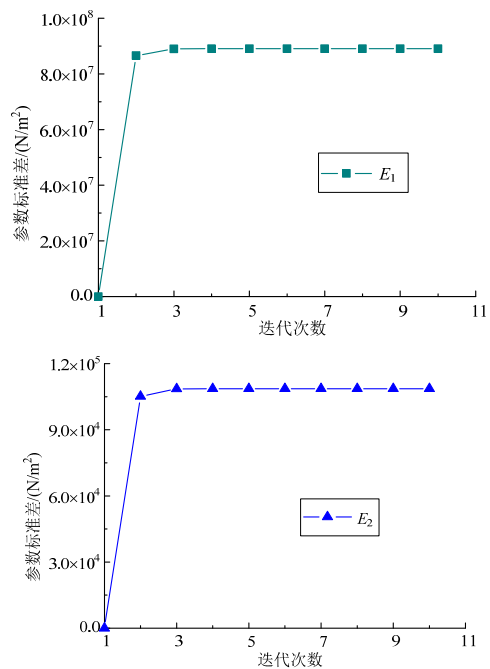


图 8 薄层单元参数标准差迭代收敛曲线

Fig.8 Convergence of the standard deviation of thin-layer element parameters

绝对值不超过 4.5%。表明当螺栓连接结构存在不确定性时,采用本文的方法能够准确识别接触面参数的统计特征,建立具有统计意义的精确动力学模

型。考察参数初值对识别结果的影响,3 种情况下的识别误差如表 6 所示,参数均值和标准差识别结果精度均较高,表明方法具有较好的稳定性。

表 4 识别前后接触面薄层单元参数比较

Table 4 Comparison between the initial and identified parameters of the thin-layer element

薄层单元参数	真实值/(N/m ²)	初始值/(N/m ²)	初始误差/(%)	识别值/(N/m ²)	识别后误差/(%)
$\mu(E_1)$	8.63×10^8	6.904×10^8	-20	8.578×10^8	-0.59
$\mu(E_2)$	9.33×10^5	7.464×10^5	-20	9.056×10^5	-2.94
$\sigma(E_1)$	8.63×10^7	0	-100	8.904×10^7	3.17
$\sigma(E_2)$	9.33×10^4	0	-100	1.086×10^5	16.4

表 5 识别前后模态频率统计特性比较

Table 5 Comparison between the initial and the identified computational modal data

模态频率	试验值/(Hz)	初始值/(Hz)	初始误差/(%)	识别后/(Hz)	识别后误差/(%)
$\mu(\text{Mode } 1)$	423.5	420.4	0.73	423.5	0
$\mu(\text{Mode } 2)$	1035.7	1033.9	0.17	1035.7	0
$\mu(\text{Mode } 3)$	2244.3	2229.0	0.68	2244.3	0
$\mu(\text{Mode } 4)$	3126.0	3108.7	0.55	3126.0	0
$\sigma(\text{Mode } 1)$	1.427	0	-100	1.368	-4.13
$\sigma(\text{Mode } 2)$	0.804	0	-100	0.770	-4.23
$\sigma(\text{Mode } 3)$	6.999	0	-100	6.707	-4.17
$\sigma(\text{Mode } 4)$	7.583	0	-100	7.267	-4.17

表 6 参数初值不同情况的识别误差

Table 6 Errors of the identified parameters with different initial values

薄层单元参数	工况 I		工况 II		工况 III	
	初始误差/(%)	识别后误差/(%)	初始误差/(%)	识别后误差/(%)	初始误差/(%)	识别后误差/(%)
$\mu(E_1)$	-20	-0.59	20	-0.59	-20	-0.59
$\mu(E_2)$	-20	-2.94	20	-2.97	20	-2.95
$\sigma(E_1)$	-100	3.17	-100	2.63	-100	2.62
$\sigma(E_2)$	-100	16.4	-100	2.89	-100	2.89

4 结论

基于薄层单元理论,提出了一种螺栓连接接触面不确定性参数识别方法。将识别得到的模型作为不确定性螺栓连接参数识别方法研究的基准模型。采用不确定性有限元模型修正理论作为识别不确定性参数的基本方法,在基准模型基础上开展螺栓连接不确定性参数识别方法仿真研究。仿真结果表明,薄层单元能够较为准确的模拟接触法向和切向接触刚度,并显著提高连接结构的建模效率;当螺栓连接结构不确定性较小时,提出的方法能够准确识别接触面参数的统计特征,建立能反映实际结构动态特性统计意义的精确动力学模型。

参考文献:

[1] Bograd S, Reuss P, Schmidt A, Gaul L, Mayer M. Modeling the dynamics of mechanical joints [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(8): 2801—2826.
[2] Mackerle J. Finite element analysis of fastening and

joining: A bibliography (1990—2002) [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(4): 253—271.
[3] Ren Y, Beards C F. Identification of effective linear joints using coupling and joint identification techniques [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120(2): 331—338.
[4] Ahmadian H, Jalali H. Generic element formulation for modelling bolted lap joints [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(5): 2318—2334.
[5] Segalman D J. Observations on simulation of joint friction [R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US), 1999.
[6] 张相盟, 王本利, 卫红桃. Iwan 模型非线性恢复力及能量耗散计算研究[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 33—39.
Zhang Xiangmeng, Wang Benli, Wei Hongtao. Calculation of nonlinear restoring forces and energy dissipation of Iwan model [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 33—39. (in Chinese)
[7] 杨红平, 傅卫平, 王雯, 等. 基于分形几何与接触力学理论的结合面法向接触刚度计算模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 102—107.
Yang Hongping, Fu Weiping, Wang Wen. Calculation

- model of the normal contact stiffness of joints based on the fractal geometry and contact theory [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 102—107. (in Chinese)
- [8] Tian H, Li B, Liu H, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 239—249.
- [9] 黄开放, 金建新. 基于虚拟材料方法的螺栓预紧力的研究[J]. 机械设计与制造, 2012, 33(8): 148—150.
Huang Kaifang, Jin Jianxin. Research on bolt preload simulation based on virtual material method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, 33(8): 148—150. (in Chinese)
- [10] Mayer M, Gaul L. Segment-to-segment contact elements for modeling joint interfaces in finite element analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 724—734.
- [11] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, Siriwardane H J. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19—43.
- [12] Sharma K, Desai C. Analysis and Implementation of Thin-Layer Element for Interfaces and Joints [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(12): 2442—2462.
- [13] Ahmadian H, Jalali H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 1041—1050.
- [14] Jalali H, Hedayati A, Ahmadian H. Modeling mechanical interfaces experiencing micro-slip/slap [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2011, 19(6): 751—764.
- [15] Ibrahim R A, Pettit C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(3): 857—936.
- [16] Fukuoka T. Analysis of the tightening process of bolted joint with a tensioner: Effects of interface stiffness [C]. ASME Proceedings of Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention Issues, 2000: 119—125.
- [17] Guo Q T, Zhang L M. Identification of the mechanical joint parameters with model uncertainty [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(1): 47—52.
- [18] Hanss M, Oexl S, Gaul L. Identification of a bolted-joint model with fuzzy parameters loaded normal to the contact interface [J]. Mechanics Research Communications, 2002, 29(2): 177—187.
- [19] Ahmadian H, Mottershead J E, Friswell M I. Regularization methods for finite element model updating [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1998, 12(1): 47—64.
- [20] Schmidt A, Bograd S, Gaul L. Measurement of joint patch properties and their integration into finite-element calculations of assembled structures [J]. Shock and Vibration, 2012, 19(5): 1125—1133.