

不同预紧力下栓接结合部切向等效特性^{*}

李 玲¹, 蔡力钢², 蔡安江¹, 郭铁能², 赵永胜²

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院 西安, 710055) (2. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京, 100124)

摘要 由于栓接结合部对整体结构的动态特性影响很大,因此如何建立准确的等效动力学模型是必须解决的首要问题。根据整体结构的边界条件和连接条件,利用结构的对称性,将设计的模型等效为栓接结合部和一端带集中质量的匀质 Timoshenko 梁,考虑端部转动惯量效应和第 2 阶模态振型的特征,建立整体结构的栓接结合部切向等效动力学模型。根据 Timoshenko 梁的振型特征,利用不同预紧力下的模态实验获得整体结构的第 2 阶固有频率和阻尼比,辨识出栓接结合部切向刚度与阻尼参数随预紧力的变化规律。将辨识结果耦合到整体结构中,用获得整体结构的第 2 阶固有频率与实验进行比较,最大误差仅为 1.05%,这说明辨识出的栓接结合部切向等效动力学参数是正确的。

关键词 栓接结合部; Timoshenko 梁; 模态实验; 有限元法

中图分类号 TH113; TB123

引 言

栓接结合部是机械结构中最常见的一种固定连接部形式,由螺栓和结合面两部分组成。当栓接结合部受到外加复杂载荷作用时,表现出复杂的动力特性,影响机械结构的整体动态性能^[1],导致这种复杂动态特性的参数主要是通过辨识理论获得^[2-12]。目前,对栓接结合参数辨识主要有两种方法^[2]。一种是基于模型的辨识方法^[3-10],这种方法主要是利用有限元法建立的理论模型和实验数据联合辨识结合部参数。Yuan 等^[3]利用缩减的有限元模型和不完整模态来辨识结合部的刚度和阻尼值。Ren 等^[4-5]采用由质量、刚度和阻尼作为物理参数,利用实验获得的频响函数对结合部进行建模和辨识。Yang 等^[6]提出一种配合整体结构的有限元模型,利用频响函数数据,使用迭代法辨识结合部等效刚度。Lee 等^[7]基于子结构方法和优化方法联合辨识栓接结合部等效参数。Čelič 等^[8]通过子结构与整体结构的频响函数建立结合部理论模型,并改进了辨识算法,将算法拓展到高维节点情况,辨识出栓接结合部处的平动和转动刚度。Li^[9]利用模型更新的方法辨识结合部刚度。蔡力钢等^[10-12]研究了在不同条件下利用频响函数与有限元联合辨识栓接结合部特性参

数。这种方法的主要优点是已有现成的有限元软件,且运用有限元理论进行结构分析已很成熟;缺点是运用有限元法建立的模型会带来建模误差,特别是结构的阻尼特性很难准确获得。另一种是纯实验的辨识方法^[2,13-15],该方法首先由 Tsai 等^[13]提出,通过测试各子结构和整体结构的频响函数去辨识结合部参数。Wang 等^[2]提出一种较为简单的栓接结合部分析模型,考虑了噪声和结合部等效参数的量级差异显著时两种情况的参数辨识。Hwang^[14]采用频响函数法对栓接结合部的频率采用统计的方法获取结合部特性。该方法的优点是全部使用实验数据,不受解析模型的影响;缺点是由于实验数值通常很小,容易受到噪声的干扰,实验过程中必须尽量减少噪声的污染。另外,由于该方法主要是利用实验获得的频响函数进行参数辨识,所以测量时需获得结合面处的频响函数,这样会为测量带来困难,实验设计的难度较高。

由于栓接结合部表现出的动力特性既与螺栓数量、排列位置、螺栓直径及长度、螺纹精度、材质有关,又与结合面的加工方式、加工质量、介质状况、材料、结构类型、尺寸大小及作用载荷有关^[15],建立一个通用的数学模型来真实反映结合部的特性显然不切实际。笔者主要研究在不同预紧力下栓接结合部的动态特性变化情况。首先,根据具体模型,依据边

* 国家自然科学基金资助项目(50905004);国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX04014-033)

收稿日期:2011-12-26;修改稿收到日期:2012-03-21

界条件和连接条件建立匀质的 Timoshenko 梁模型;然后,通过模态实验获取模型在不同预紧力下第2阶固有频率和阻尼比,根据理论模型辨识其等效动力学参数;最后,利用有限元法建立含有栓接结合部的整体结构模型,将仿真结果与实验数据比较来验证所辨识出的参数的准确性。

1 理论建模

为了便于研究栓接结合部的动态特性,设计如图1所示的结构。根据梁的第2阶模态振型为扭转,节点位于模型的中点处,可知模型的中心对称点为固定不动点。根据对称性将图1模型左侧简化为一根带有集中质量的匀质 Timoshenko 梁。设梁左半部分的长为 L ,横截面积为 A ,惯性矩为 I 的矩形截面梁,其弹性模量为 E ,剪切模量为 G ,密度为 ρ ,梁的一端 $x=L$ 处刚性连接质量为 m_i ,惯性距为 J_i 的集中质量块,偏心距为 e 。

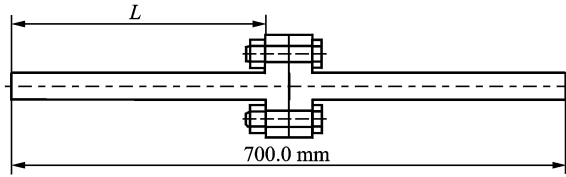


图1 栓接结合部整体结构模型

将栓接结合部动态特性利用等效刚度和阻尼器代替。由梁的第2阶模态振型可知,结构不受拉压影响,即栓接结合部法向等效刚度和阻尼为零,仅受其切向刚度和阻尼的影响,力学模型如图2所示。在自由振动下 Timoshenko 梁的动力学方程为

$$\begin{cases} EI \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \kappa GA \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \varphi \right) - \rho I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \\ \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \kappa GA \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: κ 为剪切修正系数,与泊松比 ν 有关^[16]; $w(x, t)$ 为梁的轴向位移; $\varphi(x, t)$ 为横截面的转角, $x \in [0, L]$ 。

对于谐波振动,式(1)的通解形式可假设为

$$\begin{cases} w(x, t) = W(x)e^{i\omega t} \\ \varphi(x, t) = \Psi(x)e^{i\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $W(x)$ 和 $\Psi(x)$ 分别为梁的轴向位移和弯曲斜率的幅值; ω 为固有频率。

将式(2)代入式(1)可得

$$\begin{cases} W''''(x) + PW''(x) + QW(x) = 0 \\ \Psi''''(x) + P\Psi''(x) + Q\Psi(x) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

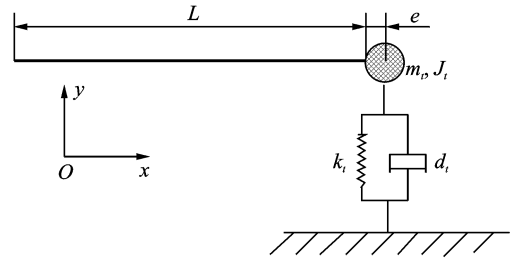


图2 整体结构等效模型

$$\text{其中: } a = \frac{\rho\omega^2}{\kappa G}; b = \frac{\rho I\omega^2}{EI}; c = \frac{\rho A\omega^2}{EI}.$$

设式(3)的一般解为

$$\begin{cases} W(\xi) = c_1 \sin(\alpha x) + c_2 \cos(\alpha x) + c_3 \sinh(\beta x) + c_4 \cosh(\beta x) \\ \Psi(\xi) = c_5 \sin(\alpha x) + c_6 \cos(\alpha x) + c_7 \sinh(\beta x) + c_8 \cosh(\beta x) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\alpha^2 = ((a+b) + \sqrt{(a-b)^2 + 4c})/2$; $\beta^2 = (-(a+b) + \sqrt{(a-b)^2 + 4c})/2$; $c_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 为未知系数。

为了减少式(4)中的未知参数,将系数 c_5, c_6, c_7, c_8 别用 c_1, c_2, c_3, c_4 表示,可得

$$\begin{cases} c_5 = -\delta_1 c_2 \\ c_6 = \delta_1 c_1 \\ c_7 = \delta_2 c_4 \\ c_8 = \delta_2 c_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中: } \delta_1 = \frac{\beta}{[1 - \rho I\omega^2/(\kappa AG)] - EI/(\kappa AG)\beta^2}; \delta_2 = \frac{\alpha}{[1 - \rho I\omega^2/(\kappa AG)] + EI/(\kappa AG)\alpha^2}.$$

对于角频率为 ω 的谐波激振,式(1)可表述为

$$\begin{cases} \rho A\omega^2 W(x) + \kappa GA \left(\frac{\partial W(x)}{\partial x} - \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \right) = 0 \\ EI \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + \kappa GA \left(\frac{\partial W(x)}{\partial x} - \Psi(x) \right) + \rho I\omega^2 \Psi(x) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其边界条件为在 $x=0$ 处

$$\begin{cases} \left[\kappa GA \left(\frac{dW(x)}{dx} - \Psi(x) \right) \right] \Big|_{x=0} = 0 \\ EI \frac{d\Psi(x)}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

在 $x=l$ 处

$$\begin{cases} \left[\kappa GA \frac{dW(x)}{dx} - (m_i e \omega^2 + \kappa GA) \Psi(x) \right] \Big|_{x=l} = 0 \\ \left[EI \frac{d\Psi(x)}{dx} - m_i e \omega^2 W(x) \right] \Big|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(4)和式(5)代入到式(7)和式(8),得到线性方程组为

\overline{B}_{11}

\overline{B}_{12}

\overline{B}_{13}

\overline{B}_{14}

\overline{B}_{21}

\overline{B}_{22}

\overline{B}_{23}

\overline{B}_{24}

\overline{B}_{31}

\overline{B}_{32}

\overline{B}_{33}

\overline{B}_{34}

\overline{B}_{41}

\overline{B}_{42}

\overline{B}_{43}

\overline{B}_{44}

$\left\{ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{matrix} \right\} = 0$

(9)

其中: $c_i(i=1,2,3,4)$ 为待定系数组成的未知向量; $\overline{B}_{ij}(i,j=1,\cdots,4)$ 为含未知栓接结合部等效刚度和阻尼参数项的向量。

将式(9)简化写为

$BC=0$

(10)

其中: B 为仅仅关于固有频率 ω 和阻尼比的 4×4 方阵; $C=\{c_1\ c_2\ c_3\ c_4\}^T$ 是通解式(9)的列向量系数。

式(9)与式(10)代表一联立方程组,若使常数有非零解,根据克拉默法则,式(10)联立方程的系数行列式必须等于零。即

$\det(B)=0$

(11)

其中: $\det(B)$ 表示方阵 B 的行列式,含有栓接结合部的等效动力学参数。

根据模态实验获得整体结构的第2阶固有频率和阻尼比作为已知参数,通过式(11)可辨识出栓接结合部切向等效刚度与阻尼值。

2 实验研究

2.1 模型修正

在进行参数辨识之前需确定结构的材料属性,使实验数据与仿真结果相同。材料属性的确定主要是通过修正有限元模型,比较单件结构的频响函数,从而确定试件的基本材料属性。遵循原则如下:

1) 结构尺寸及测量点位置都按实际尺寸为准;

2) 结构密度以实际重量除以实际体积获得;

3) 弹性模量为在1~1 600 Hz的频宽中,无约束下结构通过实验以及Matlab仿真所得的固有频率,利用最小二乘法修正得到;

4) 将试件阻尼采用比例阻尼模拟。

将试件划分为12个单元,13个节点,共有26个自由度,如图3所示。通过上述4个步骤获得试件的材料特性如表1所示。根据修正后的基本结构尺寸和材料属性,比较实验获取与有限元仿真的频响函数 $H(1,1)$ 的比较结果如图4所示。

图3 试件有限元网格划分

表1 试件基本几何尺寸和材料属性

属性	参数
长度 l/mm	320
宽度 b/mm	30
厚度 h/mm	40
偏心距 e/mm	15
泊松比 ν	0.3
材料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800
弹性模量 E/GPa	206

图4 实验与更新模型的频响函数 $H(1,1)$ 比较

2.2 参数辨识

针对图1所示的结构件,采用钢结构高强度螺栓M16(10.9S)将两试件连接起来,两端用尼龙绳悬挂起来模拟自由状态。预紧力的测试是在螺杆中心处内嵌应变片,通过动态应变仪BZ2688调整预紧力的大小,螺栓预紧力大小与应变关系如图5所示。利用LMS模态测试系统,采用锤击法进行模态实验,激振信号通过B&K系列加速度传感器获取,加速度传感器应尽可能放置在梁的中心线上,使其振动为单纯的一维梁振动。通过模态实验获得该模型在不同预紧力下第2阶固有频率和阻尼比。本实验数据的采集次数是以10次平均为准,实验原理如图6所示,锤击方式如图7所示。实验选取的频率范围为0~1 600 Hz,采样频率为2 Hz。

实验获得在不同预紧力下第2阶固有频率与阻尼比参数如表2所示。将这些参数代入式(11),可辨识出栓接结合部等效刚度和阻尼。不同预紧力下栓接结合部等效刚度与阻尼关系如图8所示。

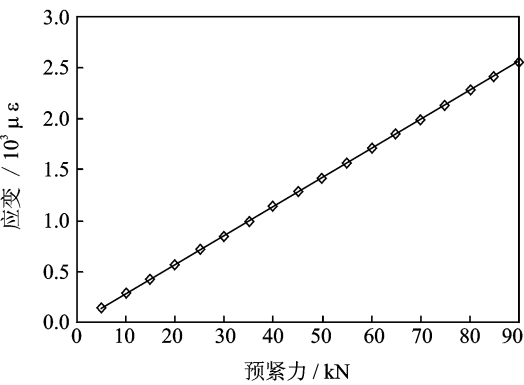


图 5 高强度螺栓预紧力与应变关系

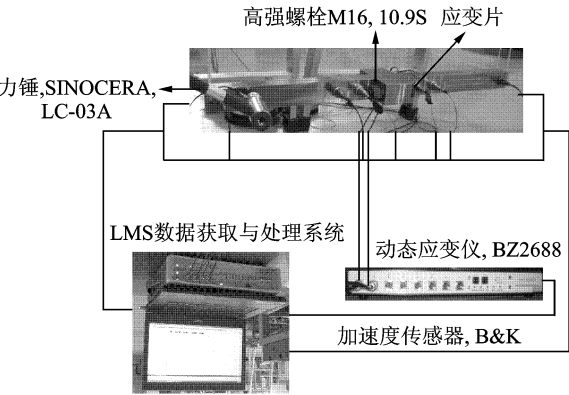


图 6 实验测试原理

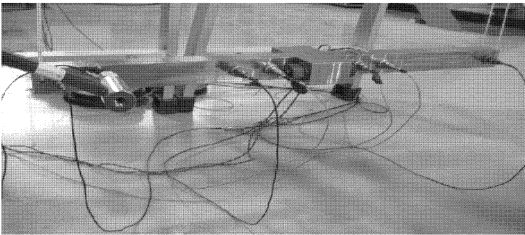
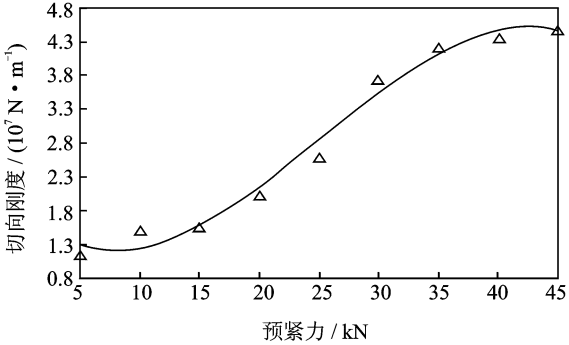
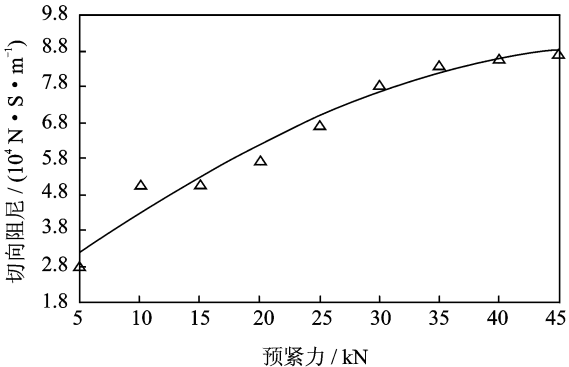


图 7 模态实验锤击方式



(a) 不同预紧力与切向刚度的关系



(b) 不同预紧力与切向阻尼的关系

图 8 不同预紧力下栓接结合部切向等效刚度与阻尼关系

3 验 证

利用Hypermesh11.0 和Ansys12.0 有限元分析软件分别进行网格划分和模态分析。将辨识出来的栓接结合部等效刚度和阻尼耦合到整体结构中,获得整体结构动态特性,用以验证辨识参数的正确性。具体过程如图 9 所示。通常建立有限元模型的节点

表 2 不同预紧力下采用本研究方法计算得到的第 2 阶固有频率与实验比较

预紧力/kN		5	10	15	20	25	30	35	40	45
实验	第2阶固有频率/Hz	814.42	815.64	815.67	816.40	816.71	817.74	818.37	818.38	818.39
	第2阶阻尼比/%	0.043	0.090	0.080	0.090	0.078	0.040	0.052	0.050	0.047
仿真第2阶固有频率/Hz		805.87	808.31	809.92	812.02	813.37	817.91	823.31	824.60	825.78
二阶固有频率误差/%		1.05	0.90	0.71	0.54	0.41	0.02	0.60	0.76	0.90

数目很多,且面面之间的节点不可能一一对应,若采用手工方式连接显然是不现实的。笔者利用 Ansys12.0 中的 APDL 语言编制一套自动化程序实现以上流程,其中,Matrix27 单元用以模拟栓接结合部的等效特性。

采用有限元法建立整体结构模型时,用单个试件进行模态实验,利用实验参数进行修正材料的基

本属性,根据修正的基本属性再进行整体分析。将整体结构进行网格划分,接触面的节点处通过 755 根线连接起来,用Matrix27 单元定义结合部刚度和阻尼参数,建立有限元模型如图 10 所示。整套过程利用 Ansys 中的 APDL 语言编制一套自动化程序完成。不同预紧力下整体结构的二阶固有频率和振型如图 11 所示。

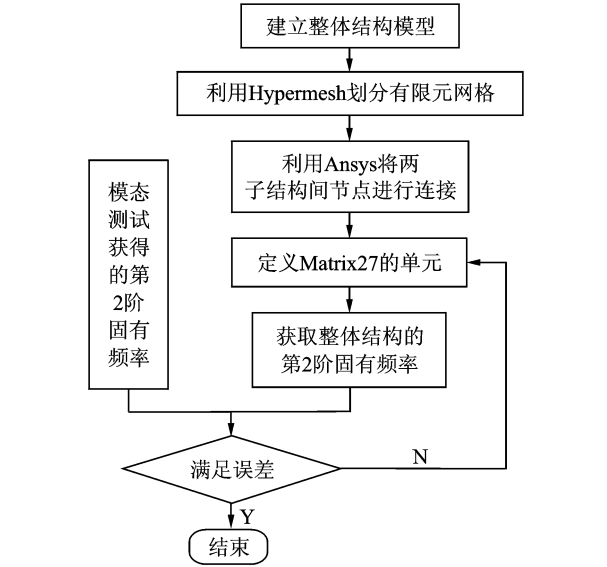


图9 有限元法分析流程

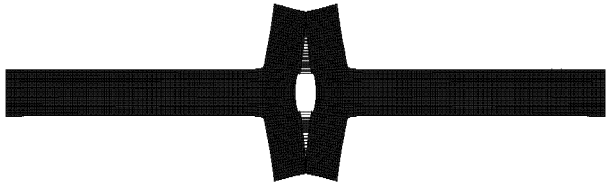


图10 有限元模型

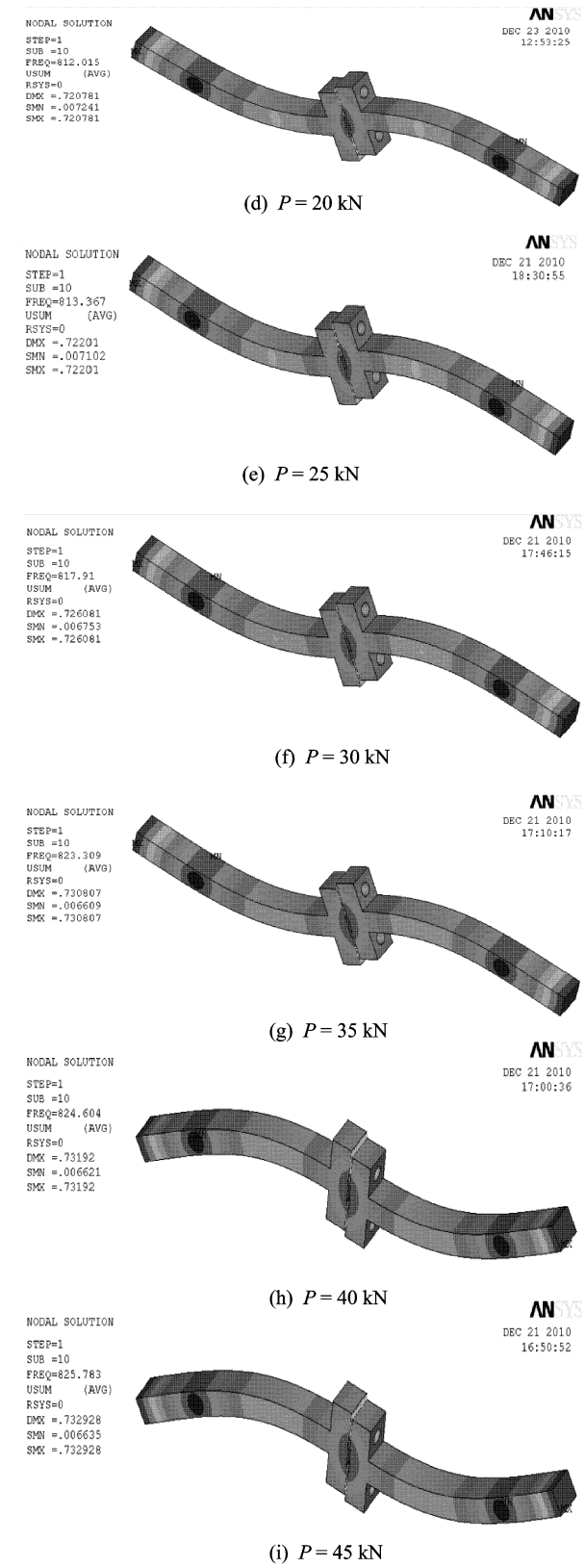
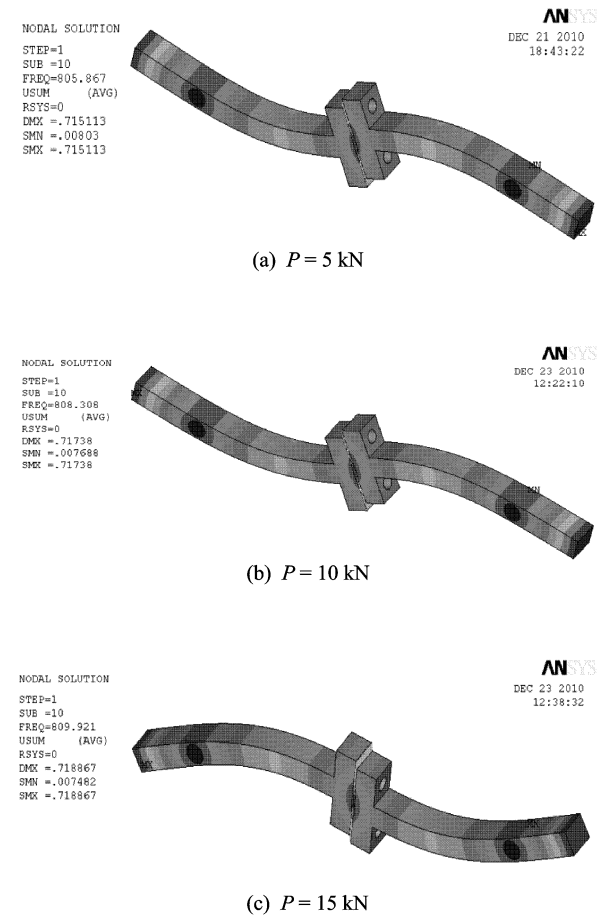


图11 不同预紧力下第2阶固有频率和模态振型图

通过以上方法获得的整体结构第2阶固有频率与实验相比,在预紧力为5 kN时的误差最大为1.05%(如表2所示),这主要是因为预紧力较低

的情况下,结合面处没有完全接触,从而出现仿真误差较大的现象。

4 结 论

1) 考虑到模型的对称性和梁的第2阶振型特性,将模型简化为Timoshenko梁单元,根据边界条件和连接条件,将梁的一端考虑成自由状态,一端带集中质量的均匀梁,且考虑其转动惯量效应,建立栓接结合部等效特性数学模型。

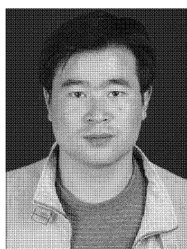
2) 通过Hypermesh软件将试件进行均匀网格划分,然后导入到Ansys12.0中,利用APDL语言将两接触面间的节点连接起来,用Matrix27单元进行定义栓接结合部的刚度和阻尼参数,所得的固有频率与实验测得的结果非常接近,最大误差出现在预紧力为5 kN处,仅为1.05%。这表明本方法获得的等效刚度与阻尼参数是正确的。

3) 根据梁的振型特征,建立栓接结合部切向等效模型,只需模态实验获得的第2阶固有频率和阻尼比,辨识参数的正确性主要依赖于建立的模型和实验数据的准确度;因此,结合部等效力学模型的准确建立和实验台的搭建非常重要。

4) 对于栓接结合部法向刚度与阻尼参数的辨识可利用杆的第1阶固有频率和阻尼比进行建模,辨识思路相同。

参 考 文 献

- [1] Gaul L, Nitsche R. The role of friction in mechanical joints[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54: 93-106.
- [2] Wang J H, Chuang S C. Reducing errors in the identification of structural joint parameters using error functions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 185(5): 295-316.
- [3] Yuan J X, Wu S M. Identification of the joint structural parameters of machine tool by DDS and FEM[J]. Journal of Engineering of Industry, 1985, 107: 64-69.
- [4] Ren Y, Beards C F. Identification of 'Effective' linear joints using coupling and joint identification techniques[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120: 331-338.
- [5] Ren Y, Beards C F. On substructure synthesis with FRF data[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185: 845-866.
- [6] Yang T, Fan S H, Lin C S. Joint stiffness identification using FRF measurements[J]. Computers and Structures, 2003, 81: 2549-2556.
- [7] Lee D H, Hwang W S. An identification method for joint structural parameters using an FRF based substructuring method and an optimization technique[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21: 2011-2022.
- [8] Čelič D, Boltežar M. Identification of the dynamic properties of joints using frequency-response functions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317: 158-174.
- [9] Li W L. A new method for structural model updating and joint stiffness identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(1): 155-167.
- [10] 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): 69-72. Guo Tieneng, Li Ling, Cai Ligang, et al. Identifying mechanical joint dynamic parameters based on measured frequency response functions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 69-72. (in Chinese)
- [11] 蔡力钢, 李玲, 郭铁能, 等. 基于不完备频响函数辨识结合部参数的研究[J]. 振动工程学报, 2011, 24(4): 345-350. Cai Ligang, Li Ling, Guo Tieneng, et al. Identifying mechanical joint dynamic parameters based on incomplete frequency response functions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(4): 345-350. (in Chinese)
- [12] 李玲, 蔡力钢, 郭铁能, 等. 子结构综合法辨识结合部的特征参数[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 399-444. Li Ling, Cai Ligang, Guo Tieneng, et al. Identification of characteristic parameters of joints by substructures synthesis method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 399-444. (in Chinese)
- [13] Tsai J S, Chou Y F. The identification of dynamic characteristics of a single bolt joint[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 125: 487-502.
- [14] Hwang H Y. Identification techniques of structure connection parameters using frequency response functions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 212: 469-479.
- [15] 伊东谊. 现代机床技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 27-50.
- [16] Antes H. Fundamental solution and integral equations for Timoshenko beams[J]. Computers and Structures, 2003, 81: 383-396.



第一作者简介: 李玲, 男, 1981年7月生, 讲师。主要研究方向为机床动力学、振动信号的处理与物理参数辨识。曾发表《子结构综合法辨识结合部的特征参数》(《振动、测试与诊断》2011年第31卷第4期)等论文。

E-mail: lee_liling@163.com