

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.125

非均匀预紧力作用下螺栓连接框架结构频响函数计算

陈彦成^{a,b}, 孙伟^{a,b}, 刘晓峰^{a,b}

(东北大学 a. 机械工程与自动化学院; b. 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要:机械装备中的框架结构大多通过螺栓连接在一起,各螺栓之间出现非均匀预紧会对框架结构的振动特性参数(如频响函数)产生明显的影响。基于有限元法提出了一种考虑螺栓非均匀预紧的框架结构频响函数计算方法。按照频响函数的定义,根据模态叠加原理推导出适用于螺栓连接框架结构频响函数的计算公式;从服务于频响函数计算的需求出发,基于 ANSYS 软件阐述了螺栓非均匀预紧的模拟及提取包含非均匀预紧的框架结构刚度及质量矩阵的方法;给出了基于 ANSYS 和 Matlab 两种软件平台对螺栓连接框架结构频响函数进行计算的分析流程;以一个包含 4 个连接螺栓的框架结构为对象进行了实例研究,用试验证明了所提频响函数计算方法的合理性,在此基础上从试验及仿真两个角度分析了螺栓预紧力对框架结构频响函数的影响。结果表明,随着螺栓预紧力的增加,框架结构固有频率及频响函数峰值均变大。

关键词:螺栓连接;框架结构;非均匀预紧;频响函数计算;有限元建模

中图分类号:TH131.3;O327

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)07-032-11

Calculation of frequency response function of bolted frame structures under non-uniform preload

CHEN Yancheng^{a,b}, SUN Wei^{a,b}, LIU Xiaofeng^{a,b}

(a. School of Mechanical Engineering & Automation; b. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems Under the Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China)

Abstract: Many frame structures in mechanical equipment are assembled using bolts, and variations in bolt preload can significantly affect the vibration characteristics of these structures, such as the frequency response function (FRF). This paper presents a method for calculating FRF of frame structures considering non-uniform bolt preload, based on the finite element method. A calculation formula suitable for FRF of bolted frame structures is derived based on the definition of FRF and the principle of modal superposition. By using the ANSYS platform, the simulation of bolt non-uniform preload and the extraction method of stiffness and mass matrices for frame structures with non-uniform preload are elaborated, catering to the FRF calculation requirements. The calculation procedure of FRF of bolted frame structure using ANSYS and Matlab is presented. A case study involving a frame structure with four connecting bolts is carried out to validate the proposed FRF calculation method. On this basis, the influence of bolt preload on the FRF of the frame structure is also analyzed through experiments and simulations. Results show that natural frequency and peak values of FRF increase with higher bolt preload.

收稿日期:2022-06-06 网络出版日期:2022-10-13

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N180312012)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N180312012).

作者简介:陈彦成(1995—),男,硕士研究生,主要从事机械系统动力学研究,(E-mail)1071308434@qq.com。

通信作者:孙伟,男,教授,博士生导师,(E-mail)weisun@mail.neu.edu.cn。

Keywords: bolt joint; frame structure; non-uniform preload; FRF (requeency response function) calculation; finite element modeling

框架结构被广泛应用于各种机械装备中,诸如门式起重机、塔式起重机、架桥机和电力机车转向架等。框架的各构件之间通常用螺栓连接在一起,螺栓连接框架结构在强迫振动、冲击载荷作用下,个别螺栓可能会因为预紧力不足而发生松动,即出现非均匀预紧的情况。研究并获得非均匀预紧状态下螺栓连接框架结构的动力学特性对框架结构设计及螺栓松动故障监测都具有重要的意义。

为了获得非均匀预紧状态下螺栓连接框架结构的振动行为,需要对其进行动力学建模。当前已有大量研究人员致力于此领域研究,常见的方法有回传射线矩阵法、半解析法和有限元法。在采用回传射线矩阵法建模研究方面,Chen等^[1]利用回传射线矩阵法分析了受冲击后的平面框架结构的振动行为,并将结果与ANSYS的计算结果进行比较以证明合理性;Guo等^[2]面向平面框架结构,推导了回传射线矩阵动力学分析的公式;Miao等^[3]基于一阶剪切变形理论并结合回转射线矩阵法,提出了一种计算复合材料框架在脉冲力作用下瞬态响应的方法。在半解析建模研究方面,Colombo等^[4]利用Rayleigh-Ritz-Meirovitch子结构综合方法面向框架结构建立了动力学模型;Lee等^[5]采用Rayleigh-Ritz法针对复杂平面框架结构进行动力学建模,提出了计算结构的固有频率和模态振型的公式;Morales^[6]研究了基于Rayleigh-Ritz的子结构综合方法在N层框架结构动力分析中的应用。有限元法作为一种适用面广的建模与分析工具,在框架结构动力学建模中也得到了广泛应用。张根辈等^[7]分别采用实体单元、板-梁单元以及集中质量-弹簧-阻尼单元对螺栓连接框架结构进行有限元建模,分析其固有频率和模态振型;刘佩等^[8]分别利用框架单元、壳单元对框架结构建立有限元模型,计算整体结构的自振频率及振型;Izham等^[9]以螺栓连接门式刚架结构为研究对象,采用MSC Nastran/Patran软件进行有限元分析,确定了框架结构的固有频率、振型和阻尼比等模态参数;Bozyigit等^[10]采用Timoshenko梁单元对框架结构建立动力学模型,分析其固有频率和模态振型;Mazanoglu等^[11]采用Euler-Bernoulli梁单元对含裂缝框架结构进行动力学有限元建模,获得了框架结构的固有频率和振型;Rezaiee-Pajand等^[12]基于Euler-Bernoulli梁单元和Timoshenko梁单元提出了一种计算参数化质量和刚度矩阵的有限元方法,对平面框架结构进行了振动分析,计算了结构的固有频率;Yang等^[13]利用ANSYS软件采用三维实体单元对飞机导弹弹架建立有限元模型,分析了其随机振动特性;Shao等^[14]针对机场牵引车车架,利用ANSYS软件对其进行了模态分析,获得了固有频率和模态振型。

实际上,常见的框架结构各构件之间由螺栓连接,而上述对框架结构的动力学分析通常将框架视为一体,并未考虑框架各构件之间的连接特性对框架振动特性的影响,因此相关建模方法并不满足非均匀预紧力作用下螺栓连接框架结构动力学建模的需要,但可作为本研究的重要参考。当框架结构中的螺栓出现非均匀预紧的情况时,框架结构的振动特性会发生改变。一些研究^[15-17]已经表明,框架结构的低阶固有频率对螺栓预紧力的变化并不敏感,而频响函数会随着预紧力的大小发生明显变化。

由此可见,研究非均匀预紧力作用下螺栓连接框架结构频响函数计算对框架结构螺栓松动故障的监测及预防都有重要的意义。当前已有学者对结构频响函数的计算开展了研究,如胡波等^[18]将多层框架结构简化为具有多个自由度的阻尼剪切结构,建立了整体结构的运动方程,计算出了框架结构的频响函数;Li等^[19]分别考虑各个耦合子结构的频响函数,利用响应耦合方法对各部分频响进行耦合,得到整个系统的频响函数;Lima等^[20]针对含黏弹性阻尼器的框架结构,通过独立考虑各部件的频响函数,计算出了整体框架系统的频响函数。

上述对耦合结构的频响函数求解通常先计算各个子结构的频响函数,然后通过耦合方法计算出总体结构的频响函数。然而,对于实际的螺栓连接框架结构,其螺栓预紧力通常是非均匀预紧力,普通耦合方法难以精确地计算出含有非均匀预紧力的螺栓连接框架结构频响函数。因此,笔者首先采用有限元法创建了含螺栓非均匀预紧框架结构有限元模型,实现了非均匀预紧力的模拟。在此基础上,提出了一种计算频响函数的方法,提取含非均匀预紧力框架结构的刚度和质量矩阵,进一步按照频响函数的定义来获得框架结构的频

响函数。最后进行了实例研究,用试验证明了所提出的频响函数计算方法的合理性,并分析了螺栓非均匀预紧力对框架结构频响函数的影响。

1 螺栓连接框架结构频响函数计算的基本原理

所研究的框架由横板、竖板和角钢组成,角钢与板由若干个螺栓连接在一起,见图1。该框架结构的有阻尼受迫振动频域运动方程为

$$(\mathbf{K}^F - \omega^2 \mathbf{M}^F + i\omega \mathbf{C}^F) \mathbf{X}^F = \mathbf{F}^F. \quad (1)$$

式中: \mathbf{M}^F 、 \mathbf{C}^F 和 \mathbf{K}^F 分别表示框架结构的质量、阻尼和刚度矩阵; ω 为激励频率; \mathbf{X}^F 和 \mathbf{F}^F 分别为响应和外激励向量。

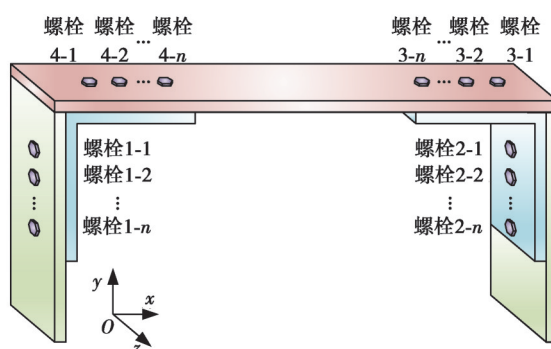


图1 螺栓连接框架结构

Fig. 1 Frame structure with bolted connections

由式(1)得到框架结构的位移频响函数矩阵 \mathbf{H}^F :

$$\mathbf{H}^F = \frac{\mathbf{X}^F}{\mathbf{F}^F} = (\mathbf{K}^F - \omega^2 \mathbf{M}^F + i\omega \mathbf{C}^F)^{-1}. \quad (2)$$

同样基于式(1),获得用于求解框架结构模态振型和固有频率的特征方程:

$$[\mathbf{K}^F - (\omega_r^F)^2 \mathbf{M}^F] \boldsymbol{\varphi}_r^F = 0 \quad (r=1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

式中: ω_r^F 和 $\boldsymbol{\varphi}_r^F$ 分别为框架结构的第 r 阶固有频率和模态振型; n 为总模态数。

式(3)求得的振型 $\boldsymbol{\varphi}_r^F$ 可变换为正则振型 $\boldsymbol{\varphi}^{FN}$,利用正则振型对式(2)做正交变换得到

$$\mathbf{H}^F = \frac{(\boldsymbol{\varphi}^{FN})^T \boldsymbol{\varphi}^{FN}}{\mathbf{K}^{FN} - \omega^2 \mathbf{M}^{FN} + i\omega \mathbf{C}^{FN}}. \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}^{FN} 、 \mathbf{C}^{FN} 分别为刚度和阻尼对角矩阵,其对角线元素分别为 $(\omega_r^F)^2$ 、 $2\zeta_r^F \omega_r^F$ (ζ_r^F 为第 r 阶模态阻尼比); \mathbf{M}^{FN} 为单位质量矩阵。

在实际测试频响函数时,通常在结构上选择某一点 i 作为激励点,选择某一点 j 作为拾振点。所以在进行频响函数的计算时,只需求出频响函数矩阵 \mathbf{H}^F 中与实际激励点 i 和拾振点 j 相对应的频响函数元素即可,求解式为

$$H_{ij}^F = \sum_{r=1}^{n_0} \frac{\varphi_{r,i}^F \varphi_{r,j}^F}{(\omega_r^F)^2 + 2i\zeta_r^F \omega \omega_r^F - \omega^2}. \quad (5)$$

式中: $\varphi_{r,i}^F$ 和 $\varphi_{r,j}^F$ 分别为第 r 阶模态在节点 i 和节点 j 的振型幅值; H_{ij}^F 为频响矩阵 \mathbf{H}^F 的第 (i,j) 个元素; n_0 表示考虑的模态数目。

利用式(5)计算框架结构的频响函数,需要准确找出与实际测试相对应的激励点和拾振点,具体包括确定激励点和拾振点在有限元模型中的节点编号和对应的激励和响应拾取的方向,另外,还需要获得非均匀预紧力作用下框架结构的总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 、总质量矩阵 \mathbf{M}^F 和各阶模态阻尼比 ζ_r^F 。

2 非均匀预紧框架结构有限元建模方法

这里描述的非均匀预紧框架结构有限元建模方法主要服务于频响函数计算。以下从非均匀预紧的模拟以及预应力模态分析、矩阵的提取以及节点编号的确定等方面进行阐述。

2.1 非均匀预紧的模拟以及预应力模态求解

在ANSYS软件中,提取框架结构总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 和总质量矩阵 \mathbf{M}^F 之前,需先执行模态分析,而且为了包含螺栓预紧力的影响,需执行预应力模态分析。

为了建立精确的螺栓连接框架结构动力学有限元模型,螺栓结合部的建模是非常重要的前提。如图2(a)所示,在划分网格时可对螺栓连接结合部周围切分相应的正方形应力集中区域,并采用较密集的扫掠网格划分,同时选择扩展拉格朗日接触算法作为变形协调算法来解决2个接触面内部的变形协调问题。如图2(b)所示,这里对每个螺栓结合部设置3组接触对,各接触对分别设置3个接触参数,即动摩擦系数、法向刚度系数和切向刚度系数,具体参数值为0.2、1.1、0.3。

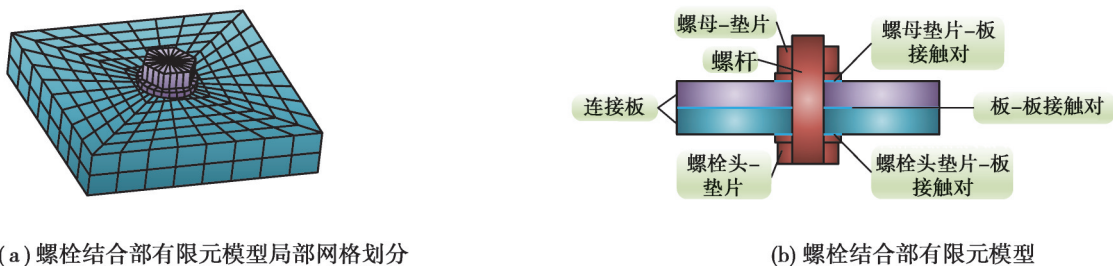


图2 螺栓结合部有限元模型以及局部网格划分

Fig. 2 Finite element model and local mesh of bolt joint

为了模拟螺栓产生的预紧力,可在螺栓杆中某一轴向截面定义一层PRETS179预紧单元,如图3所示。该单元覆盖在原有单元上形成一个预紧截面,在该截面上施加的载荷即为螺栓预紧力,其方向仅有轴向拉伸方向,通过操作命令SLOAD对每个螺栓施加不同预紧力来实现非均匀预紧力的模拟。在框架结构实际装配中,通常通过定力矩扳手对螺栓施加不同预紧力矩来实现拧紧。因此,需要实现预紧力矩和预紧力的换算,具体表示为^[21]

$$T = KFD. \quad (6)$$

式中: T 为螺栓预紧力矩; F 为螺栓预紧力; K 为螺栓扭矩系数,近似为0.2; D 为螺栓螺纹的公称直径。

对框架结构的螺栓施加非均匀预紧力后,可进行预应力模态分析,进而可提取框架结构的总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 。对于不同的非均匀螺栓预紧方案,可分别对框架结构执行预应力模态分析,然后提取对应的总刚度矩阵 \mathbf{K}^F ,这样各非均匀螺栓预紧方案就体现在所提取的各总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 中。

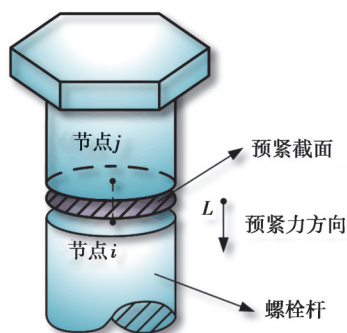


图3 预紧单元示意图

Fig. 3 Pretension element

2.2 矩阵的提取以及节点编号的确定

在 ANSYS 软件中对框架结构进行预应力模态分析之后,建立将要读入的数据文件,便可以用命令 HBMAT 提取结构的总刚度矩阵 K^F 和总质量矩阵 M^F ,如图 4(a)所示。通常将结构的刚度矩阵和质量矩阵输出为 TXT 文件格式,供 Matlab 编制的频响函数计算程序调用。将提取出的刚度矩阵对应的“.mapping”文件输入 Excel 表格文件中,在如图 4(b)所示的表格中呈现 3 列数据,第 1 列对应为计算频响函数时频响函数矩阵中某一元素的第 i 行和第 j 列,第 2 列对应 ANSYS 有限元模型中结构的激励点和拾振点节点的编号 p, q ,第 3 列对应 ANSYS 有限元中的节点作用方向 u, v (u, v 分别代表坐标系方向)。

节点编号的具体确定方法描述如下:首先在框架结构上指定激励点和拾振点位置;然后在对应的有限元模型上找到对应的激励点编号 p 和拾振点编号 q 以及相应的激励方向 u 和拾振方向 v ,如图 4(a)所示;最后在对应的 Excel 表格文件中根据有限元节点编号及相关作用方向确定所计算的频响函数元素在频响函数矩阵中的位置(i, j)。

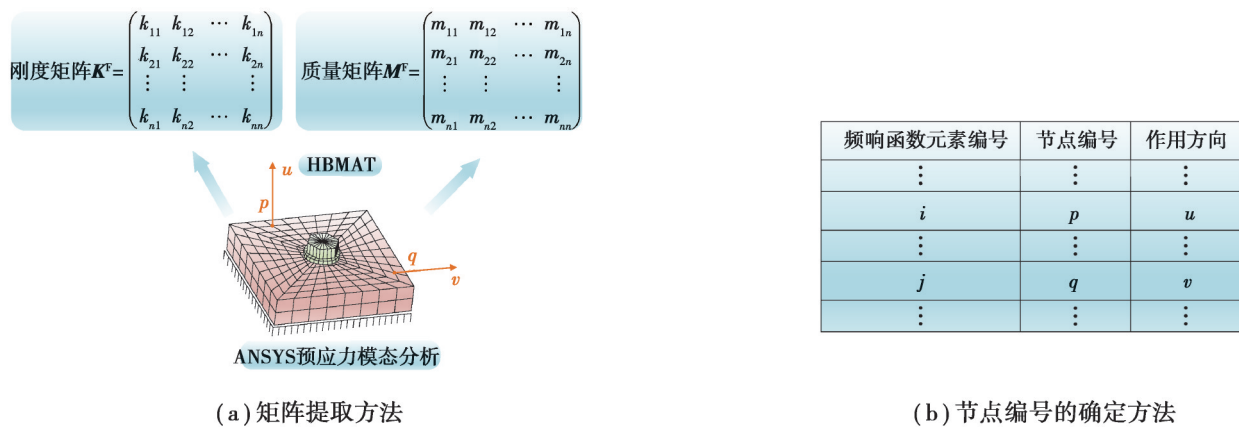


图 4 矩阵提取方法以及节点编号的确定方法

Fig. 4 Methods of matrix extraction and node number determination

3 螺栓连接框架结构频响函数计算的流程

为了实现螺栓连接框架结构频响函数计算,首先采用 ANSYS 软件对框架结构进行模态分析,进而提取结构的总刚度及总质量矩阵,最后利用 Matlab 软件编制的频响函数计算程序调用提取的刚度及质量矩阵完成频响函数计算。相应计算流程见图 5,一些关键步骤描述如下。

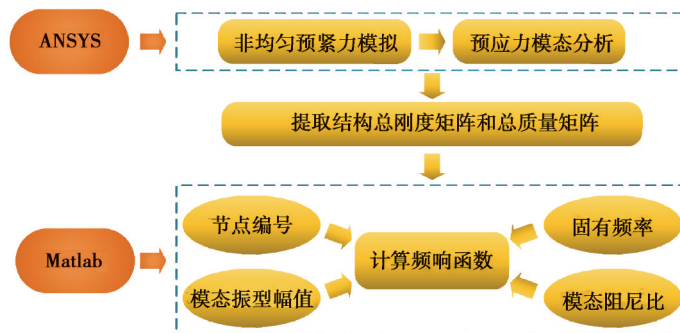


图 5 非均匀预紧框架结构频响函数计算流程

Fig. 5 FRF calculation flowchart of non-uniform preload frame structures

步骤 1:对螺栓连接框架结构执行预应力模态分析。对结构的预应力模态分析在 ANSYS 软件中进行。首先,根据实际框架结构建立几何模型,切分出螺栓结合部局部接触区,划分网格并定义接触;然后,分别在

每个螺栓杆中建立预紧截面,并对结构施加约束条件;最后,在每个螺栓预紧截面上施加指定的预紧力,进而实现结构预应力模态分析。

步骤2:提取刚度及质量矩阵。刚度及质量矩阵的提取在ANSYS软件中进行。对不同非均匀预紧工况的框架结构进行预应力模态分析后,使用操作命令HBMAT分别以TXT格式提取总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 和总质量矩阵 \mathbf{M}^F 。

步骤3:确定节点编号。根据2.2部分对框架结构节点编号的描述,在框架结构上指定激励点和拾振点,然后在有限元模型上分别确定相应的激励点和拾振点编号 p, q 及相应的节点作用方向 u, v ,最后基于此在对应的Excel表格文件中对应找到所计算的频响函数元素在频响函数矩阵中的位置 (i, j) 。

步骤4:计算各阶固有频率及模态振型幅值。首先将步骤2提取的刚度矩阵 \mathbf{K}^F 和质量矩阵 \mathbf{M}^F 输入到Matlab软件编制的程序中,利用式(3)计算结构各阶模态振型 φ_r^F 及各阶固有频率 ω_r^F ,然后通过对质量矩阵的正则化处理计算获得各阶对应的正则振型矩阵 φ_r^{FN} ,最后根据步骤3中获得的频响函数元素在频响函数矩阵中的位置 (i, j) ,提取各阶正则振型向量的幅值 $\varphi_{r,i}^F$ 和 $\varphi_{r,j}^F$ 。

步骤5:获得各阶模态阻尼比。可通过对实际框架结构进行频响函数测试,采用半功率带宽法获得各阶模态阻尼比。需要说明的是该阻尼比直接用于后续频响函数计算,并不需要在框架结构有限元模型中进行相关阻尼比的设置。

步骤6:计算频响函数。将得到的各阶模态振型幅值、各阶固有频率、各阶模态阻尼比以及所考虑的激励频率范围输入式(5),计算获得螺栓连接框架结构的频响函数。

4 实例研究

4.1 问题描述

以图6所示的框架结构为例来校验所提出的非均匀预紧力作用下螺栓连接框架结构频响函数计算方法。该螺栓连接框架结构中的横板与角钢、竖板与角钢分别通过4个M6的连接螺栓连接,竖板、底板和筋板通过焊接连接,框架结构由安装在2个底板上的8个M12的固定螺栓固定在操作台上。螺栓连接框架结构的尺寸如图7所示(这里对连接横板与角钢、竖板与角钢的4个螺栓进行了编号),其中横板、竖板、筋板和角钢的厚度均为5 mm。整个框架结构包括连接的螺栓材料均为Q235普通碳素结构钢,其弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,密度为7 850 kg·m⁻³。用定力矩扳手将框架结构安装固定在操作台上(扭紧力矩为20 N·m),使用模态力锤对框架结构进行非均匀螺栓预紧力下的频响函数测试。

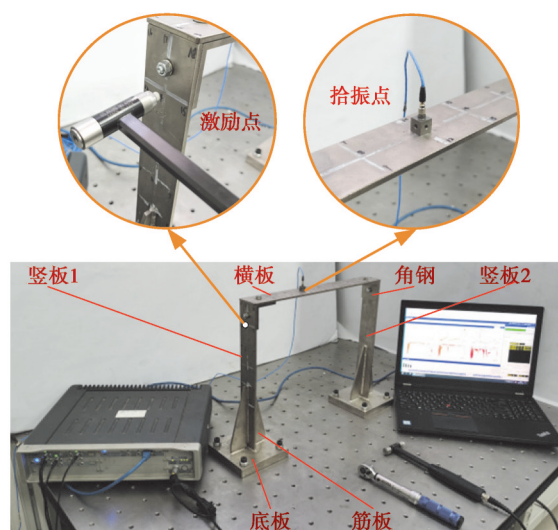


图6 螺栓连接框架结构及相关测试系统

Fig. 6 Bolted frame structure and related test system

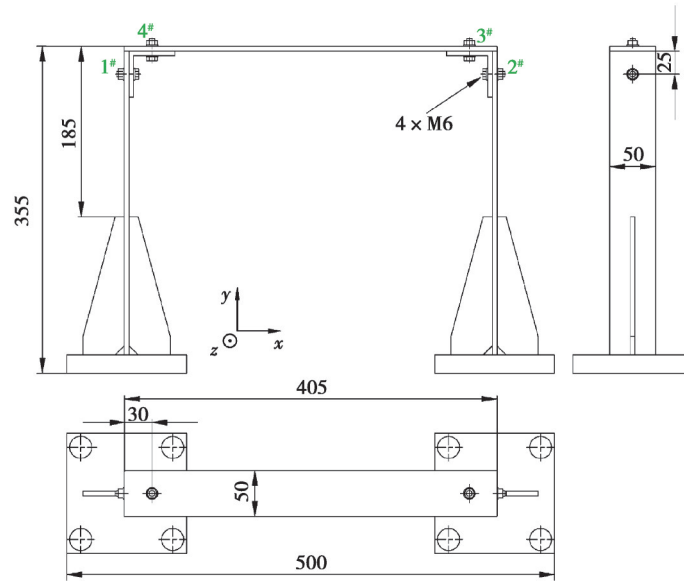


图7 框架结构总体尺寸(单位:mm)

Fig. 7 Overall dimensions of frame structure (unit: mm)

测试过程中设置了一个非均匀预紧力工况,即将1号螺栓拧紧至 $3\text{ N}\cdot\text{m}$,2、3、4号螺栓拧紧至 $5\text{ N}\cdot\text{m}$,用于校验频响函数计算模型的合理性。通过PCB SN 30272力锤对图6中标记的激励点施加宽频激励,将PCB SN LW246108三向加速度传感器布置在拾振点处拾取信号,获得非均匀螺栓预紧力下框架结构在 y 方向的频响函数,相关结果见5.2部分仿真与试验结果的比较。这里针对框架结构前5阶振动特性进行分析,由于框架结构第3、4阶模态振型方向为 z 方向,因此获取的 y 方向频响函数曲线只显示出第1、2、5阶固有频率峰值,因而后续分析也仅对应所测频响函数能显现的阶次。

4.2 频响函数计算模型合理性校验

在ANSYS软件中选用实体单元SOLID186创建螺栓连接框架结构有限元模型,需要说明的是结合部螺栓的建模忽略螺纹,保留螺栓头、螺母和垫片。参照3.1部分对非均匀预紧的模拟的描述方法,根据式(6)计算出螺栓扭紧力矩为 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 时对应的预紧力分别为 $2\ 500.00\text{ N}$ 和 $4\ 166.67\text{ N}$,与前面试验相对应,在ANSYS中对1号螺栓施加 $2\ 500.00\text{ N}$ 预紧力,其他螺栓施加 $4\ 166.67\text{ N}$ 预紧力。在框架结构2底板底面施加固定约束作为边界条件(即3个平动方向的位移 $U_x = U_y = U_z = 0$)。至此,完成了有限元模型的创建,参见图8。该模型中共有10 038个单元,38 708个节点。

利用所创建的有限元模型执行预应力模态分析,按照2.2部分描述的方法提取该框架结构的总刚度矩阵 \mathbf{K}^F 和总质量矩阵 \mathbf{M}^F ,输入到用Matlab软件编制的程序中,通过式(3)计算框架结构前5阶固有频率以及激励点和拾振点的模态振型幅值。根据图6中所指定的框架结构激励点和拾振点位置,在图8所示的有限元模型上确定相应的激励点编号为4497,方向为 x 方向;拾振点编号为12687,方向为 y 方向。如图4(b)所示,在总刚度矩阵对应的Excel表格文件中找到所计算的频响函数元素在频响函数矩阵中的位置为(16 625,53 350)。

这里,试验测试的 y 方向频响函数图像在0~640 Hz的频率范围内一共呈现出5个波峰,分别对应框架结构第1、2、5、7、8阶固有频率。将仿真计算得到的框架结构固有频率与试验测试值进行对比如表1所示,可以看出固有频率偏差最大值小于4%。采用半功率带宽法计算出该工况下框架结构第1、2、5、7、8阶模态阻尼比为0.004 738、0.002 132、0.003 297、0.008 323和0.013 049。将计算得到的固有频率、模态阻尼比、节点对应的模态振型幅值等代入公式(5)获得一条包含1、2、5、7、8阶的频响函数曲线,将包含1、2、5阶的频响函数曲线与试验测试获得的频响函数曲线对比如图9所示,可以看出仿真与实测的频响函数接近程度较好。

该非均匀螺栓预紧力工况下框架结构的固有频率和频响函数结果表明所采用的非均匀螺栓预紧力下框架结构的动力学有限元建模方法具有较高的精确性。

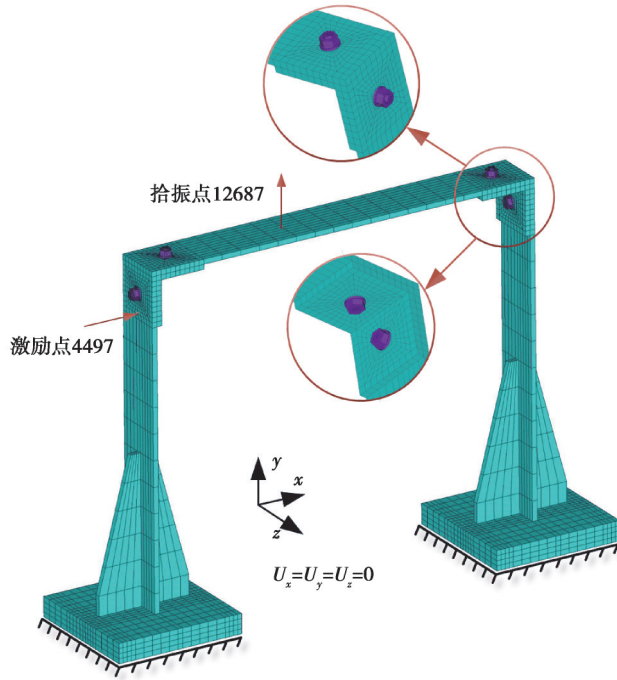


图 8 螺栓连接框架结构有限元模型

Fig. 8 FEM of bolted frame structure

表 1 非均匀预紧力工况下试验与仿真第 1、2、5、7、8 阶固有频率对比

Table 1 Comparison of the first, second, fifth, seventh and eighth order natural frequencies between experiments and simulations under non-uniform preload condition

阶次	仿真频率 f_{FS}/Hz	试验频率 f_{FE}/Hz	偏差 $\frac{f_{FS} - f_{FE}}{f_{FE}} / \%$
1	65.945	65.47	0.725 5
2	131.730	136.09	-3.203 8
5	332.210	326.41	1.776 9
7	507.760	500.00	1.552 0
8	625.050	609.38	2.571 5

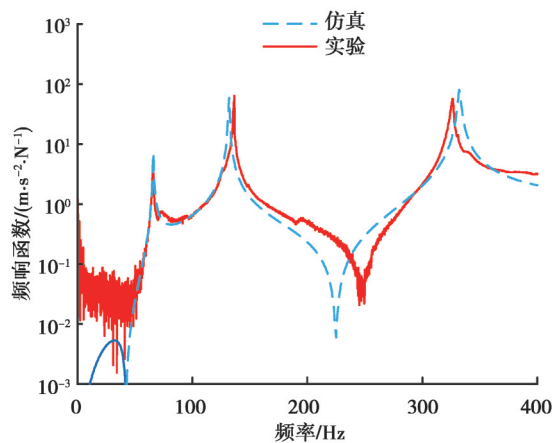


图 9 非均匀预紧力工况下试验与仿真 y 方向频响函数对比

Fig. 9 Comparison of experimental and simulated FRF in y-direction under non-uniform preload conditions

4.3 非均匀预紧力对频响函数的影响分析

本节从仿真及试验2个角度进一步分析预紧力的变化对螺栓连接框架结构频响函数的影响。针对框架结构定义了2种非均匀螺栓预紧力工况,如表2所示。由于螺栓处于松脱状态时扭紧力矩为 $0\text{ N}\cdot\text{m}$,试验过程中无法准确测试出结构固有特性,因此,定义了一种手紧状态(即螺栓处于即将松脱的临界状态,扭紧力矩无限接近于 $0\text{ N}\cdot\text{m}$)来代替螺栓松脱状态,同时将螺栓扭紧力矩为 $1,3\text{ N}\cdot\text{m}$ 定义为松动状态,如表3所示。需要说明的是,试验过程中发现当框架结构螺栓从手紧状态变化到 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,第5阶固有频率值和频响函数峰值有规律地增大并且变化较明显,因此仅以第5阶为例来说明非均匀预紧对频响函数的影响。针对所描述的2种工况,分析了不同螺栓预紧力对框架结构 y 方向第5阶共振区频响函数的影响。

表2 框架结构2种非均匀螺栓预紧力工况

Table 2 Two non-uniform bolt preload conditions of frame structure

工况	非拧紧状态的螺栓编号	拧紧状态的螺栓编号
1	1	2、3、4
2	1、4	2、3

表3 螺栓3种预紧状态

Table 3 Three preload states for bolts

状态	螺栓状态	扭紧力矩
状态1	手紧状态	接近 $0\text{ N}\cdot\text{m}$
状态2	松动状态	$1,3\text{ N}\cdot\text{m}$
状态3	拧紧状态	$5\text{ N}\cdot\text{m}$

工况1和工况2中 y 方向第5阶频响函数计算及试验结果分别如图10和图11所示。

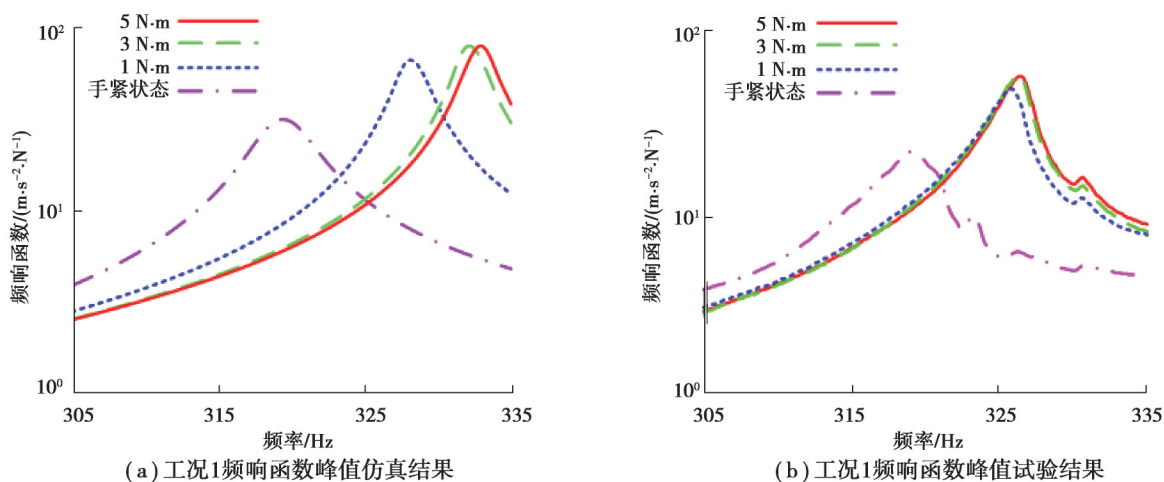


图10 工况1下框架结构 y 方向第5阶频响函数仿真与实测结果

Fig. 10 Simulation and measured results of the 5th order FRF of frame structure in y direction under working condition 1

从仿真和试验的比对可得出如下结论:每种工况下,随着螺栓预紧力增大,框架结构的第5阶固有频率增大,同时其对应的 y 方向第5阶频响函数峰值增大。另外,从试验结果可以看出,螺栓扭紧力矩在 $1\sim 5\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内,固有频率增加不明显,说明实际结构中螺栓预紧力增大到一定值时,结合部刚度和阻尼变化微小。而在仿真过程中,由于结合部参数设置为定值,随着螺栓扭紧力矩增大,螺栓结合部连接刚度增大,结构固有频率会持续增大。但总体上,仿真与实测频响函数变化趋势相同。

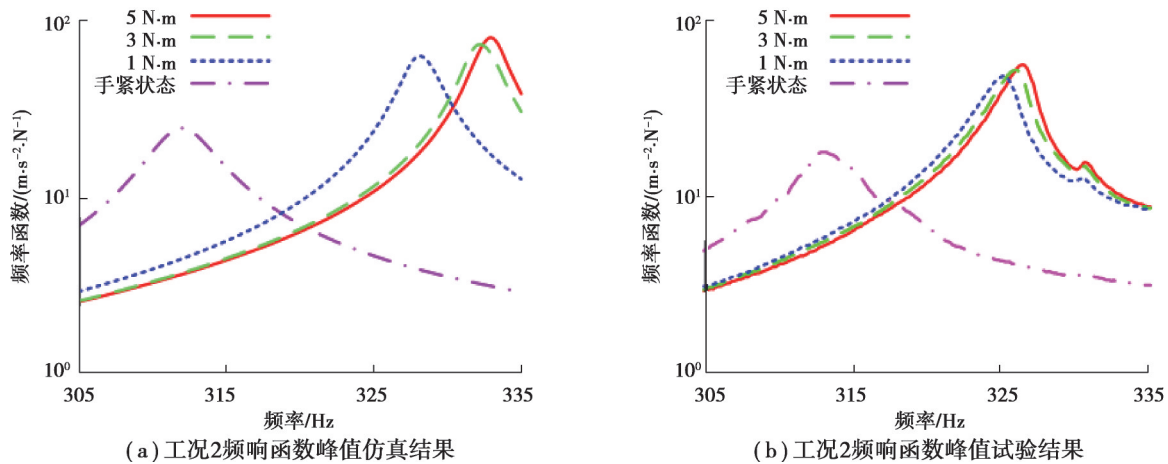


图11 工况2下框架结构y方向第5阶频响函数仿真与实测结果

Fig. 11 Simulation and measured results of the 5th order FRF of frame structure in y direction under working condition 2

5 结论

提出了一种通过提取包含螺栓非均匀预紧框架刚度和质量矩阵,进一步按照频响函数的定义来获得该框架结构频响函数的方法,得出以下结论。

1)描述了考虑螺非均匀预紧的框架结构有限元建模方法,具体为:在不同螺栓杆上建立预紧单元、施加不同螺栓预紧力来实现非均匀预紧力的模拟,进而执行预应力模态分析;提取包含螺栓非均匀预紧的框架结构刚度及质量矩阵,为频响函数计算提供基础数据。

2)给出了基于ANSYS和Matlab两种软件平台对螺栓连接框架结构频响函数进行计算的分析流程。具体包括螺栓连接框架结构的预应力模态分析、提取刚度和质量矩阵、确定用于计算频响函数的激励点及拾振点节点编号、计算固有频率及模态振型幅值、获得各阶模态阻尼比和将相关数值代入频响函数求解式等步骤。将上述频响函数计算流程应用到包含4个连接螺栓的框架结构,结果表明仿真与试验获得固有频率和频响函数曲线均具有较好的一致性,从而证明了上述频响函数计算方法的合理性。

3)基于所创建的频响函数计算模型和搭建的试验系统进一步分析了螺栓预紧力的变化对频响函数的影响。预紧力的大小包括手紧、松动以及拧紧3种状态,进而针对2种非均匀预紧力工况进行了分析。结果表明随着螺栓预紧力增大,框架结构的固有频率以及对应的y方向第5阶频响函数峰值均变大,仿真与试验获得的频响函数变化趋势相同。

参考文献

- [1] Chen J F, Pao Y H. Effects of causality and joint conditions on method of reverberation-ray matrix[J]. AIAA Journal, 2003, 41(6): 1138-1142.
- [2] Guo Y Q, Chen W Q, Pao Y H. Dynamic analysis of space frames: the method of reverberation-ray matrix and the orthogonality of normal modes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(3/4/5): 716-738.
- [3] Miao F X, Sun G J, Zhu P P. Developed reverberation-ray matrix analysis on transient responses of laminated composite frame based on the first-order shear deformation theory[J]. Composite Structures, 2016, 143: 255-271.
- [4] Colombo J I, Morales C A. Quasicomparison functions and substructure synthesis for framed structures stability analysis[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2015, 12: 2618-2630.
- [5] Lee H P, Ng T Y. In-plane vibration of planar frame structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(3): 420-427.
- [6] Morales C A. Dynamic analysis of frames by a Rayleigh-Ritz based substructure synthesis method[J]. Engineering Structures, 2000, 22(12): 1632-1640.
- [7] 张根辈, 臧朝平, 王晓伟, 等. 螺栓连接框架结构的有限元模型修正[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 26-33.
Zhang G B, Zang C P, Wang X W, et al. Finite element model updating of a framed structure with bolted joints[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 26-33. (in Chinese)

- [8] 刘佩, 连鹏宇. 基于环境振动测试的框架结构主裙楼动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 174-179, 184.
Liu P, Lian P Y. Dynamic characteristics analysis of a frame structure with the main building and podium based on ambient vibration test data[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 174-179, 184. (in Chinese)
- [9] Izham M H N, Abdullah N A Z, Zahari S N, et al. Structural dynamic investigation of frame structure with bolted joints[J]// MATEC Web of Conferences, 2017, 90: 01043.
- [10] Bozyigit B. Seismic response of pile supported frames using the combination of dynamic stiffness approach and Galerkin's method[J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112822.
- [11] Mazanoglu K, Kandemir-Mazanoglu E C. A new simplified method for anti-symmetric mode in-plane vibrations of frame structures with column cracks[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(24): 5794-5810.
- [12] Rezaiee-Pajand M, Khajavi R. Vibration analysis of plane frames by customized stiffness and diagonal mass matrices[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(12): 2848-2863.
- [13] Yang Y F, Zheng Q Y, Wang J J, et al. Dynamics response analysis of airborne external storage system with clearance between missile-frame[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3278-3287.
- [14] Shao K L, Wang F, Wu Y H. Modal and vibration analysis of a trator frame based on FEM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 373-375: 16-19.
- [15] Anginthaya K, Kuchibhatla S A R, Gangadharan K V, et al. A comparative study on the effectiveness of system parameters in monitoring pre-load loss in bolted joints[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(8): 1-15.
- [16] He X L, She T L. A new identification method for bolt looseness in wind turbine towers[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 6056181.
- [17] Zhao Y, Xiao Y, Wang H M, et al. Effect of bolt tightening force on the transmission tower modal parameters and a method for looseness identification[J]. Energy Reports, 2021, 7: 842-849.
- [18] 胡波, 柳炳康, 王静峰. 基于结构频响函数的再生混凝土框架地震作用损伤评估[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 57-65.
Hu B, Liu B K, Wang J F. Seismic damage assessment for recycled concrete frame based on structure frequency response function[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(9): 57-65. (in Chinese)
- [19] Li X R, Zhu J M, Tian F Q, et al. An improved rapid prediction method of the milling tool point frequency response function[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3/4): 841-852.
- [20] de Lima A M G, Rade D A, Léopore Neto F P. An efficient modeling methodology of structural systems containing viscoelastic dampers based on frequency response function substructuring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1272-1281.
- [21] Zhang Y X, Zhu D C, Zhang S, et al. Research on vibration transfer characteristics of the bolt connection structure[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017, 17(1): 68-78.

(编辑 罗 敏)