

考虑结合面接触的螺栓连接结构动态特性研究*

李玉奇^{1,2}, 朱志敏¹, 罗忠², 温传美³, 龙天亮¹

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院 柳州, 545006)

(2. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳, 110819)

(3. 广西科技大学电子工程学院 柳州, 545006)

摘要 针对横向载荷作用下螺栓连接结构结合面接触状态的动态变化引起的非线性刚度及摩擦耗能问题, 首先, 基于有限元接触理论分析连接结合面接触状态演化机理, 并结合 Iwan 模型结构提出一种连接结构简化模型及其参数辨识方法; 其次, 研究了预紧力、结合面摩擦因数和激励频率对连接结构响应特征和能耗的影响机制; 最后, 通过搭建螺栓连接结构激振实验台开展了实验验证。结果表明: 预紧力主要通过改变界面滑移触发条件来影响螺栓连接结构滞回特性, 而摩擦因数对连接结构黏滞阶段刚度及滑移触发条件均产生影响; 增大预紧力及摩擦因数可提高连接结构的等效平均刚度, 减小摩擦耗散, 并抑制其时域响应及频谱幅值, 对其振动频率分量未产生明显影响; 实验与理论分析结果趋势具有良好的一致性, 验证了本研究模型及理论分析的有效性和正确性。

关键词 结合面接触状态; 螺栓连接; 动态特性; 力学性能

中图分类号 TH16; TH161; TH117

引言

螺栓连接广泛用于航空发动机、燃气轮机等大型旋转机械中多级零部件的紧固^[1-2]。在复杂振动冲击环境下连接结合面长期处于微动状态, 导致结合面发生黏滑行为, 造成连接结构刚度呈非线性特征, 严重影响转子系统运行的稳定性、可靠性及其动力学特征预测准确性^[3]。因此, 开展考虑结合面接触状态的螺栓连接结构动态特性研究, 对含螺栓连接的大型旋转机械转子系统设计、装配工艺优化及健康监测具有重要意义^[4]。

目前, 考虑螺栓连接结构结合面接触状态的动力学研究主要关注其建模方法及滞回特性。文献[5-8]分别使用了 Iwan 模型、LuGre 模型和 Valanis 模型模拟螺栓连接结构结合面接触行为, 并分析了螺栓连接结构的滞回特性。相比于 LuGre 模型和 Valanis 模型, Iwan 模型由于其结构简单、模型参数具有明确物理意义、所需辨识参数少等优点被广泛应用于考虑界面接触的连接结构非线性建模中。文献[9]提出一种基于 Jenkins 单元的螺栓连接结构等效模型构建方法, 并分析其接触界面非线性力学行为演

化机理。文献[10]使用 Iwan 模型模拟带有螺栓连接的悬臂梁接触面非线性力学行为, 并通过实测数据验证了模型的准确性。文献[11]将预紧力提供的法向压力转化为切向密度函数, 建立了螺栓连接结构力学模型, 并分析了初始刚度和残余刚度对其滞回特性的影响。文献[12]以航空发动螺栓法兰连接结构为对象, 分析了滞回行为机理及预紧力、止口过盈配合对结合面能耗的影响。文献[13]结合格林伍德和威廉姆森 (Greenwood and Williamson, 简称 GW) 模型、数理统计方法与传统 Iwan 模型, 建立了螺栓连接结构结合面跨尺度力学模型。

以上研究重点在于螺栓连接结构结合面的静态滞回特性及力学建模方法。针对螺栓连接结构动态特性, 文献[14]基于实测滞回曲线与 Jenkins 单元, 提出一种考虑螺纹轮廓的螺栓连接结构滞回模型, 并分析连接结构在扭转激励下的动力学特性。文献[15-16]通过对连接结合面黏滑状态演化机理分析, 建立了螺栓连接结构简化模型, 并分析滞回特性对结构振动特性的影响。文献[17-18]结合分型表征法及梁模型建立了螺栓法兰连接结构本构模型, 在此基础上研究了峰值振幅衰减和“频漂”等非线性现

* 国家自然科学基金资助项目(52305098); 广西自然科学基金资助项目(2022GXNSFBA035488); 广西科技计划资助项目(桂科 AD23026064); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升资助项目(2023KY0362); 广西科技大学研究生教育创新计划资助项目(GKYC202313); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2023475)

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2024-04-19

象。文献[19]通过建立 Iwan 密度函数与接触面压力分布关系,进一步提高了模型精度,并通过与实测数据的对比验证其对连接结构动力学行为预测的可靠性。文献[20]采用实验结合有限元法,分析螺栓自松对螺栓搭接结构固有频率及能耗的影响,结果表明,随着激励幅值的增大,系统固有频率降低。

针对螺栓连接结构的建模方法、滞回特性和结构动力学行为分析广泛采用接触算法和简化模型。接触算法是通过建立有限元接触模型,将复杂的连续接触表面划分为许多小的有限元素,并根据物体形状、接触力及摩擦力等参数在每个元素内求解方程,以模拟整个结合面的黏滑行为。简化模型是采用数据拟合的方法建立相应的数学模型,描述结合面上的黏滑摩擦行为。由于螺栓连接结合面非线性特性明显,导致有限元接触算法计算效率低且收敛困难,而简化模型通常需通过仿真或实验数据进行模型参数辨识。

本研究通过有限元模型分析不同预紧力及结合面摩擦因数下螺栓-盘连接结构力学性能及接触状态演化机理。首先,基于 Iwan 模型结构及结合面接触状态演化机理与力-位移数据映射关系,提出一种连接结构简化模型及其参数的辨识方法;其次,基于 COMBIN 40、COMBIN 14 单元在 ANSYS 中建立连接结构简化模型,探究预紧力、结合面摩擦因数和激励频率对连接结构动力学特性的影响规律;最后,通过螺栓-盘连接结构激振实验分析预紧力和激励频率对连接结构响应特性的影响,验证了理论分析结果的准确性。

1 螺栓-盘连接结构力学性能分析

螺栓-盘连接结构如图 1 所示。本研究通过建立有限元模型,分析其接触状态演化过程与不同预紧力和结合面摩擦因数下的力学行为演化规律,基于 Iwan 模型结构并结合接触状态演化机理,建立螺栓-盘连接结构简化模型,提出一种仅需初始加载阶段力-位移数据的离散化参数辨识方法。

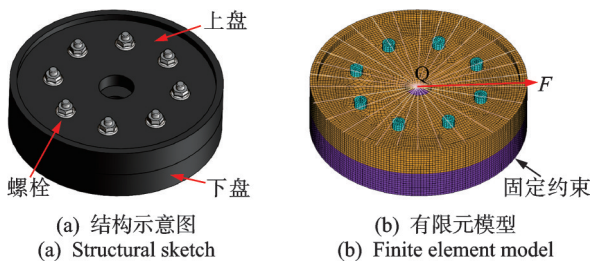


图1 螺栓-盘连接结构

Fig.1 Bolted-disk joint structure

1.1 螺栓-盘连接结构接触状态演化与力学性能分析

图 1(b)所示为螺栓连接结构的有限元模型,其实体部分采用 SOLID185 单元进行建模,盘-盘接触和螺栓-盘结合面采用 CONTACT174 与 TARGET170 单元模拟其接触行为。边界条件设置为:下盘底部端面节点施加固定约束;上盘顶部端面与无质量中心点(Mass21 单元)刚性耦合于端面中心 Q 点,在 Q 点施加简谐横向力 $F=180 \sin(0.01\pi t)$ N,并使用 PRETS179 单元对螺栓施加 $P=100$ N 的预紧力,基于 ANSYS 准静态求解得到其滞回曲线。连接结构滞回曲线与初始加载阶段曲线如图 2 所示。螺栓-盘连接结构参数见表 1。

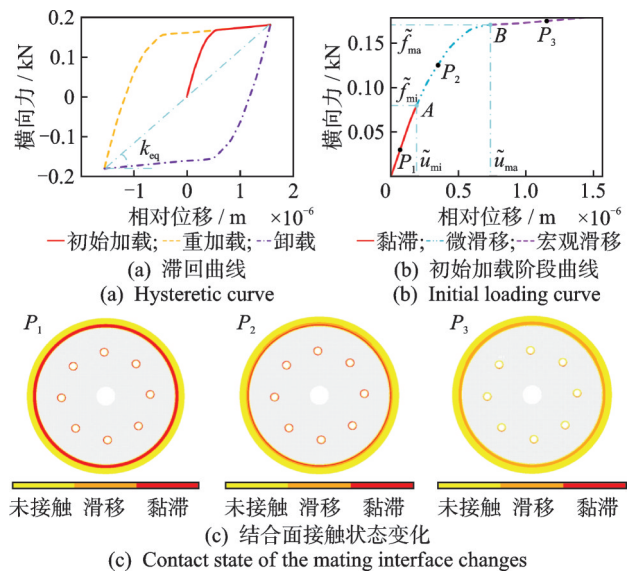


图2 连接结构滞回曲线与初始加载阶段曲线

Fig.2 The hysteretic curve and initial loading curve of the joint structure

表1 螺栓-盘连接结构参数

Tab.1 Physical parameters of the bolted-disk joint structure

模型参数	数值
盘外半径/mm	70
盘内半径/mm	9.5
盘厚度/mm	10
螺栓半径/mm	3
螺孔半径/mm	3.5
螺孔距盘中心距离 l /mm	45
法兰外径/mm	80
法兰内径/mm	70
法兰厚度/mm	20
弹性模量/Pa	2.09×10^{11}
泊松比	0.28
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 860
盘质量/kg	2.1
摩擦因数	0.2

由图 2(a)可以看出,随着载荷幅值的增加,结合面的接触状态发生改变,其力-位移曲线斜率明显减小,导致连接结构结合面刚度减小,发生刚度软化现象^[21]。根据横向力加载方向,滞回曲线可分为 3 个阶段:初始加载阶段;卸载阶段;重加载阶段。曲线两端点连线斜率为连接结构等效平均刚度 k_{eq} ^[22]。如图 2(b)和图 2(c)所示,进一步提取初始加载阶段力-位移数据及 $P_1 \sim P_3$ 时刻结合面接触状态,根据斜率及滑移面积的变化,可将结合面接触状态分为 3 个阶段:①当横向力较小时,其力-位移曲线斜率为恒值,结合面处于整体黏滞阶段($O \sim A$);②随着横向力加载到微观临界滑移力 \tilde{f}_{mi} 时,结合面发生局部滑移,进入微滑移阶段($A \sim B$),其力-位移曲线斜率逐渐降低;③当横向力加载到宏观临界滑移力 \tilde{f}_{ma} 时,结合面发生整体滑移,其力-位移曲线呈线性,即进入宏观滑移阶段($B \sim P_3$),其斜率称为残余刚度 k_a 。图中 A、B 位置分别为微滑移与宏观滑移触发位置,与其对应的力与位移为滑移触发条件。当横向力开始卸载或重加载时,结合面接触状态重新进入黏滞状态,且随着横向力的减小或增大依次进入微滑移、宏观滑移阶段^[12]。因此,随着横向载荷周期性加载,结合面接触状态在黏滞、微滑移和宏观滑移之间交替变化,其力-位移曲线形成滞回环。

完整滞回周期内接触状态演化如图 3 所示。其中,滞回曲线所包围的面积为一个加载周期内所产生的摩擦能量耗散^[23]。有限元模型所使用的 SOLID185 实体单元刚度远大于螺栓连接提供的刚度,且施加的激励幅值较小,所产生的结构变形也相对较小,因此本研究中所提取的位移参数可以认为是结合面相对滑移对应的位移。

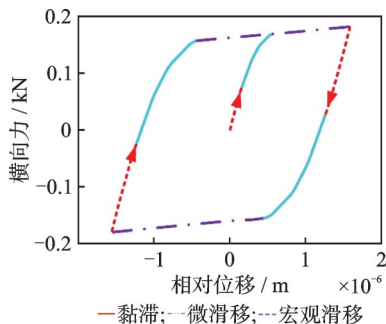


图 3 完整滞回周期内接触状态演化

Fig.3 Contact state evolution in a complete hysteresis period

为分析螺栓-盘连接结构力学性能,分别改变有限元模型的预紧力与结合面摩擦系数进行参数化分析。当预紧力为 80 和 100 N、横向力幅值为 180 N、

摩擦系数为 0.2 时,不同预紧力下的滞回曲线如图 4 所示。由图可知:在相同结构参数下,随着预紧力的增大,滞回曲线所包围的面积减小而等效平均刚度增大,即所产生的摩擦耗散减小而结合面连接刚度增大,这是由于预紧力的增大导致结合面微滑移触发条件提高,且宏观滑移阶段占比降低,进而影响滞回曲线的面积与等效刚度;不同预紧力下黏滞阶段刚度基本一致,这是由于此阶段的刚度主要取决于结合面的结构参数,而预紧力仅对其滑移触发条件产生影响。

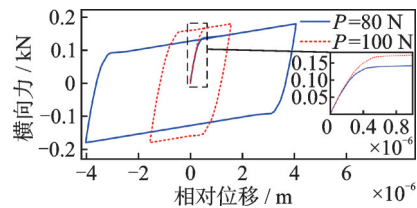


图 4 不同预紧力下的滞回曲线

Fig.4 Hysteretic curves under different preload

当有限元模型在结合面摩擦系数分别为 0.2 和 0.25、横向力幅值和预紧力分别为 180 N 和 250 N 时,不同结合面摩擦系数下的滞回曲线如图 5 所示。由图可知:,在相同条件下,滞回曲线面积随着结合面摩擦系数的增加而减小,而等效平均刚度增大,这是由于相同预紧力下摩擦系数的提高使得结合面可承受的最大静摩擦力增大;随着结合面摩擦系数的增大,其黏滞阶段的刚度增大,而宏观滑移后的残余刚度保持不变,表明摩擦系数仅对其黏滞阶段刚度与滑移触发条件产生影响。

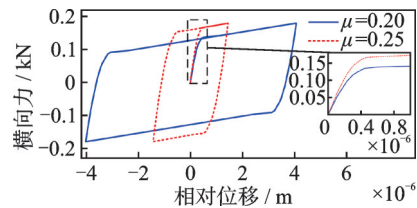


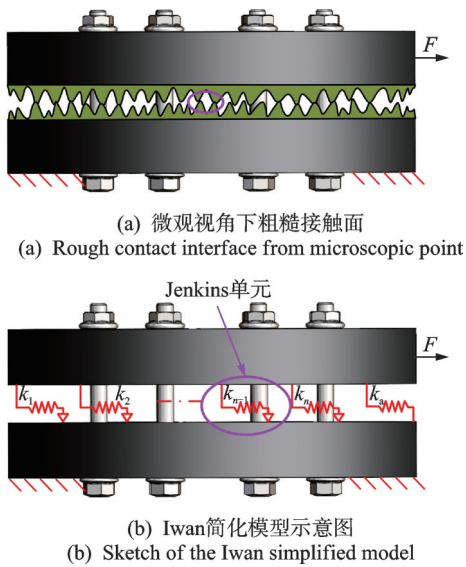
图 5 不同结合面摩擦系数下的滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curves under different friction coefficient of mating interface

1.2 螺栓-盘连接结构简化模型及参数辨识方法

预紧力与结合面摩擦系数对连接结合面接触状态演化和力学性能有显著影响。由于有限元接触单元模拟连接结构动态特性存在计算成本较高的问题,本研究基于 ANSYS 弹簧单元,提出一种基于 Iwan 模型的螺栓连接结构简化模型及其参数识别方法。

在微观视角下,结合面的接触行为可简化为2个具有无限凸点的粗糙表面接触问题,通过描述单个凸点的接触力学特征,将单个凸点模型扩展到整个粗糙表面,从而建立螺栓-盘连接结合面宏观力学模型。连接结构等效接合面如图6所示。由于螺栓预紧力提供的法向压力分布不均匀,导致单个凸点所能承受的最大摩擦力不同,即滑移行为发生不同步。因此,随着横向力的增加,其发生滑移的凸点数增加,导致结合面接触状态随之改变,进而发生刚度软化。当所有凸点发生滑移时,结合面整体滑移,进入宏观滑移阶段。



(a) 微观视角下粗糙接触面
(b) Iwan简化模型示意图

(b) Sketch of the Iwan simplified model

图6 连接结构等效接合面

Fig.6 The equivalent mating interface of joint structure

如图6(b)所示,根据上述结合面接触状态演化过程,引入Jenkins单元模拟单个凸点的接触状态,该过程可表征为

$$f_i(u_i) = \begin{cases} \tilde{k}_i u_i & (0 < |u_i| \leq \tilde{u}_i \text{ 黏滞}) \\ \pm \tilde{f}_i & (\tilde{u}_i < |u_i| \text{ 滑移}) \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_i 为第*i*个Jenkins单元承受的接触力; \tilde{k}_i 为第*i*个Jenkins单元刚度; u_i 为第*i*个Jenkins单元两端的相对位移; \tilde{u}_i 为第*i*个Jenkins单元的临界滑移位移; \tilde{f}_i 为第*i*个Jenkins单元的临界滑移力。

由于各凸点所能承受的最大摩擦力不同,因而各Jenkins单元的临界滑移力 \tilde{f}_i 不同^[24]。假设*n*个Jenkins单元临界滑移力满足

$$\tilde{f}_1 \leq \tilde{f}_2 \leq \dots \leq \tilde{f}_{n-1} \leq \tilde{f}_n \quad (2)$$

将*n*个Jenkins单元与1个线性弹簧并联,形成可描述整个结合面接触状态的Iwan模型,其中线性弹簧用于模拟宏观滑移后的残余刚度。结合图3所

示结合面接触状态演化过程,通过描述每个单元在各接触阶段的力与位移的关系并叠加,即可模拟整个结合面的接触状态。Iwan简化模型可表示为

$$F(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^l \tilde{f}_i + \sum_{i=l+1}^N \tilde{k}_i x + k_a x & \text{(初始加载)} \\ -\sum_{i=1}^l \tilde{f}_i + \sum_{i=l+1}^N [\tilde{k}_i(\delta - x) + \tilde{f}_i] + k_a x & \text{(卸载)} \\ \sum_{i=1}^l \tilde{f}_i + \sum_{i=l+1}^N [\tilde{k}_i(x + \delta) - \tilde{f}_i] + k_a x & \text{(重加载)} \end{cases} \quad (3)$$

其中: x 为结合面相对位移; δ 为上一加载阶段的最大相对位移; k_a 为线弹簧刚度,即残余刚度。

根据牛顿定律,Iwan简化模型动力学方程可表示为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F(x) = F_t \quad (4)$$

其中: m 为连接结构质量; F_t 为外部激励。

由于 $F(x)$ 中已经考虑了连接结构刚度及摩擦耗散,因此 c 、 k 均设为0。

由式(3)可知,求解简化模型需对 \tilde{u}_i 、 \tilde{f}_i 、 \tilde{k}_i 和 k_a 进行参数化辨识。结合Iwan建模原理、初始加载阶段力-位移数据及接触状态发展过程,采用最小二乘法识别初始加载阶段的黏滞与宏观滑移状态。对于黏滞状态,因为所有Jenkins单元都未发生滑移,故其斜率等效为所有Jenkins单元与线弹簧并联所产生的刚度之和,即 $k_a + \sum_{i=1}^N \tilde{k}_i$;对于宏观滑移状态,因为

所有Jenkins单元均发生滑移,其刚度仅由线弹簧提供,故其斜率对应为 k_a 。将其非线性微滑移阶段按横向力等差离散化为*N*-1个线性组合,每个线性段端点位置表示1个Jenkins单元滑移触发位置,且端点对应的相对位移即为当前Jenkins单元的临界滑移位移 \tilde{u}_i 。因此,每个线性段斜率减去前1个线性段斜率对应为当前Jenkins单元刚度 \tilde{k}_i 。参数辨识流程如图7所示。

相对于现有的构建接触单元密度函数法^[9]和实验参数辨识法^[24],上述参数辨识方法仅需初始加载阶段力-位移数据即可完成参数辨识,进一步提高了建模效率。此外,基于Iwan模型结构、接触状态演化机制与力-位移映射关系,将各阶段接触行为与Jenkins单元参数关联,可实现模型参数的快速辨识。

为提高简化模型求解效率,基于ANSYS分析软件的COMBIN40单元、COMBIN14单元及

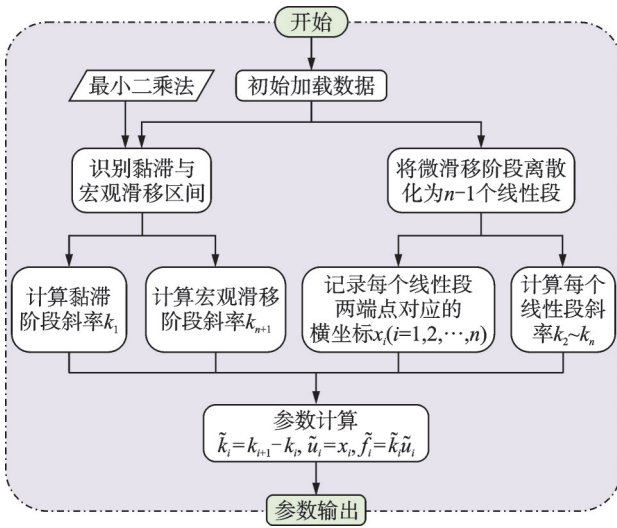


图 7 参数辨识流程

Fig.7 Flow of parameter identification

MASS21单元分别模拟 Jenkins 单元、线性弹簧及连接结构质量,开展动力学分析。ANSYS 弹簧单元如图 8 所示。其中: I, J 为节点; M 为结构总质量; GAP 为两节点相对位移; K_1, K_2 分别为滑移弹簧和线性弹簧刚度; F_{slide} 为滑移力; C_v, K 分别为弹簧阻尼单元的阻尼系数和刚度系数。仿真中,单元参数值分别设置如下: $K_1 = \tilde{k}_i, F_{slide} = \tilde{f}_i, K = k_a, M = m$, 其余参数均设为 0。根据文献[24],一般 4 个 Jenkins 单元即可完全模拟连接结构结合面的力学性能,因此后面参数化分析过程中均采用 4 个 Jenkins 单元与 1 个弹簧单元并联进行组合建模。

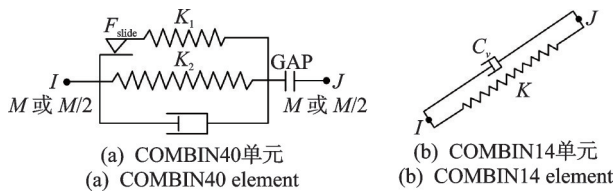


图 8 ANSYS 弹簧单元

Fig.8 ANSYS spring element

1.3 螺栓-盘连接结构简化模型静动态特性验证

为验证简化模型的准确性,本研究通过对比简化模型与有限模型在预紧力 $P = 100 \text{ N}$ 、结合面摩擦系数 $\mu = 0.2$ 时的滞回曲线与时域响应,分别展开对简化模型静态滞回与动态特性的验证。有限元模型与简化模型对比验证如图 9 所示。同时,以时域曲线的均方根值、方差和波形指标为误差指标,求解有限元模型与简化模型的误差。有限元模型与简化模型误差见表 2。

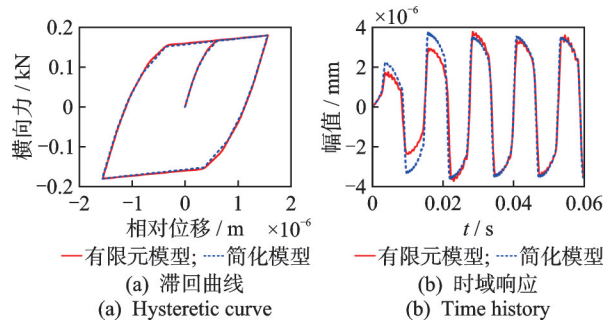


图 9 有限元模型与简化模型对比验证

Fig.9 Comparison and verification of finite element model and simplified model

表 2 有限元模型与简化模型误差

Tab.2 Error between finite element model and simplified model

误差指标	表达式	误差/%
时域曲线均方根值	$x_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)}$	3.47
时域曲线方差	$\delta = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{ x(n) } \right)^2$	7.26
时域曲线波形指标	$W = x_m / \bar{x}$	0.12

$x(n)$ 为时域曲线的序列, $n=1, 2, \dots, N$; N 为样本点数

为避免瞬态响应的影响,在误差分析时均舍去时域曲线对应的前 300 个时间步。由图 9(a)可以看出,有限元模型与简化模型的滞回曲线吻合较好,等效模型可以精确捕捉连接结构结合面的接触状态。由图 9(b)可以看出,简化模型与有限元模型在激励 $F = 180\sin(500t)$ 、时间步长为 0.000 1 s 时稳态响应有较高的一致性,且两者时域曲线结果均方根值、方差和波形指标的平均误差保持在 4% 以内,因此等效模型可有效模拟连接结构的动态特性。在中央处理器为 i7-12700 的工作站求解连接结构动态特性时,有限元模型计算时间为 8.4 h,而简化模型仅用时 25 s,进一步说明了简化模型的高效性。

2 螺栓-盘连接结构非线性动态特性分析

2.1 螺栓预紧力对连接结构响应影响分析

为分析螺栓预紧力对连接结构响应的影响,以预紧力为控制参数,在预紧力为 80 和 100 N 时分别求解连接结构时域响应与频谱。不同预紧力下连接结构响应与频谱如图 10 所示。其中:激励 $F = 180\sin(2\pi\omega_r t)$; 频率 $\omega_r = 250$; 结合面摩擦系数 $\mu = 0.2$; 积分步长单位周期为 256 步; 频谱横坐标表示

为阶次,是无量纲单位。由图可知:在相同结构参数与横向激励下,预紧力越大,其时域响应和频谱幅值降低越明显,即预紧力对连接结构振动响应幅值产生了抑制作用,这是由于预紧力的增加提高了连接结构的等效平均刚度和滑移触发条件,在相同激励下滑移行为延缓进而减小了滑移距离,其振动行为得到抑制;不同预紧力下的振动频率成分相同,且均仅存奇数倍频,因此频率成分不能作为预紧力对连接结构响应影响的分析标准。

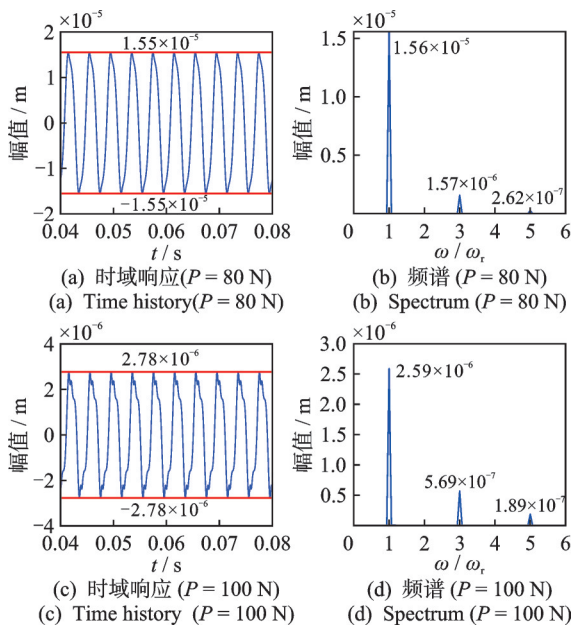


图 10 不同预紧力下连接结构响应与频谱

2.2 结合面接触摩擦因数对连接结构响应影响分析

为分析结合面摩擦因数对连接结构响应的影响,给定预紧力 $P = 80 \text{ N}$, 分别改变摩擦因数 μ 为 0.2 和 0.25, 其他参数与 2.1 节一致。不同摩擦因数下连接结构响应与频谱如图 11 所示。由图可知,随着结合面摩擦因数的增大,其时域响应与频谱幅值明显降低,但其频率分量未发生改变,这与不同预紧力下动力学行为发展趋势一致。这是因为相同预紧力下摩擦因数的提高使得结合面可承受的最大摩擦力增大,进而增大了等效平均刚度和滑移触发条件,减小了滑移距离,故其振动行为得到抑制。

2.3 激励频率对连接结构响应影响分析

为进一步研究激励频率对连接结构响应的影响,给定预紧力 $P = 80 \text{ N}$, 分别改变激励频率 ω_r 为 250 和 500, 其他参数与 2.1 节一致, 求解得到不同激

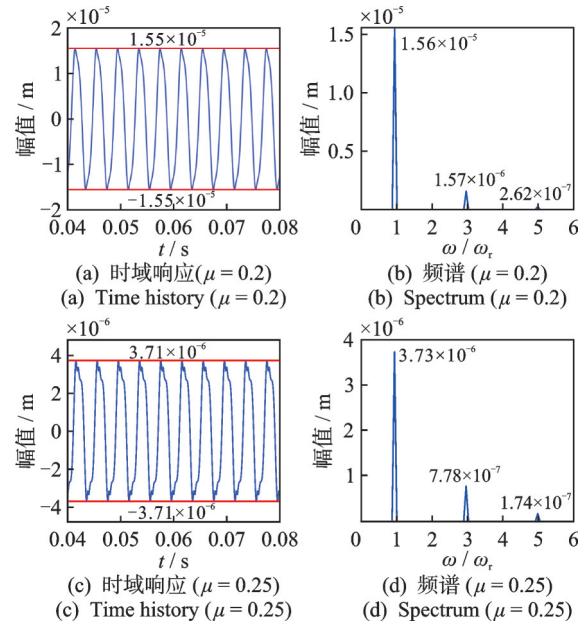


图 11 不同摩擦因数下连接结构响应与频谱

励频率下连接结构的动力学响应及频谱。不同激励频率下连接结构响应与频谱如图 12 所示。由图可知:在相同结构参数与和边界条件下,增大激励频率将导致连接结构时域响应与频谱幅值降低;频率成分虽无明显变化,但其 3 倍频和 4 倍频占比明显降低。这是由于相同参数下,连接结构的等效平均刚度与结合面滑移触发条件相同,而随着激励频率的增加,在相同时间内其发生滑移次数增加,进而增大

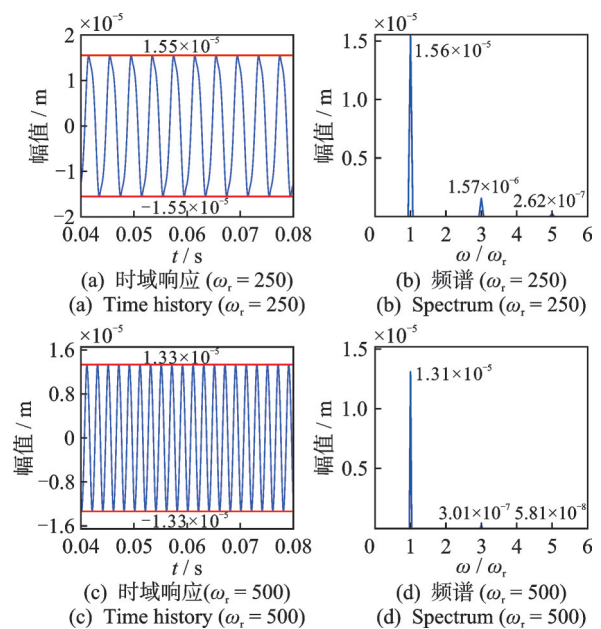


图 12 不同激励频率下连接结构响应与频谱

了总的摩擦能量耗散,故其振动幅值降低且振动更加稳定。

3 螺栓连接结构动力学实验研究

为验证上述理论分析结果的准确性,开展连接结构激振实验研究,分析激励频率及预紧力矩对连接结构稳态响应的影响。搭建螺栓-盘连接结构激振实验台,如图 13 所示。其中,横向激励信号由信号发生器控制,经功率放大器整理后通过激振器作用与螺栓连接结构上盘,而下盘通过夹具进行固定约束。为了采集螺栓-盘连接结构的力与位移数据,分别在激励输入位置及对侧安装力传感器与电涡流位移传感器。各螺栓预紧力矩通过定力矩扳手以顺序拧紧方式施加,且激励幅值均通过功率放大器控制为 48 N。在仿真过程中,采用 PRETS179 单元来模拟螺栓提供的预紧力,而实验中预紧力是无法准确计算的,一般通过控制预紧力矩调节预紧力的大小。实验所使用的螺栓为 6.9 级强度的 M6 螺栓,其最大许用预紧力矩为 7.7 Nm,选择预紧力矩分别为 3、6 Nm 的工况来分析预紧力对连接结构动力学特性的影响。



图 13 螺栓-盘连接结构激振实验台

Fig.13 Vibration test rig of a bolted-joint disk

实测不同预紧力矩下滞回曲线对比如图 14 所示。由图可知,预紧力矩的增大对连接结构滞回曲线有明显的影,随着预紧力矩的增大,滞回曲线所包围的面积减小,且两端点连线的斜率增大,即摩擦能量耗散减小,等效平均刚度增大。这是由于预紧力矩的增大提高了滑移触发条件并缩短了宏观滑移距离,这与有限元模型的滞回曲线变化规律相吻合。

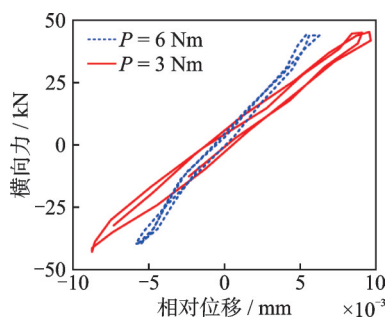


图 14 实测不同预紧力矩下滞回曲线对比

Fig.14 Hysteretic curves of the test rig

为阐明不同预紧力矩和激励频率对连接结构动力学响应的影响,实测了不同预紧力矩和激励频率下的响应与频谱,分别如图 15、16 所示。由图 15 可知,随着预紧力矩的增大,其时域响应及其频谱的 1 阶、3 阶幅值明显降低。这是由于预紧力矩的增大提高了连接结构等效平均刚度和触发滑移状态的条件,在相同激励下滑移行为触发推迟且滑移距离减小,因而振幅减小且振动更加稳定。由图 16 可知,在预紧力矩相同时,横向力激励频率的增加将显著抑制连接结构振动,其响应最大值变大,最小值变小,且第 1、3、5 阶频率幅值明显变小。这是因为随着激励频率的增加,相同时间内激励作用次数增加,进而增加了相对滑移次数,产生更多的能量耗散,导致其振动行为被抑制。这与简化模型分析结果具有相同的规律。

在实验过程中,实验结果会受到零部件加工精度、装配误差、磨损以及结构变形等外部因素的影响。

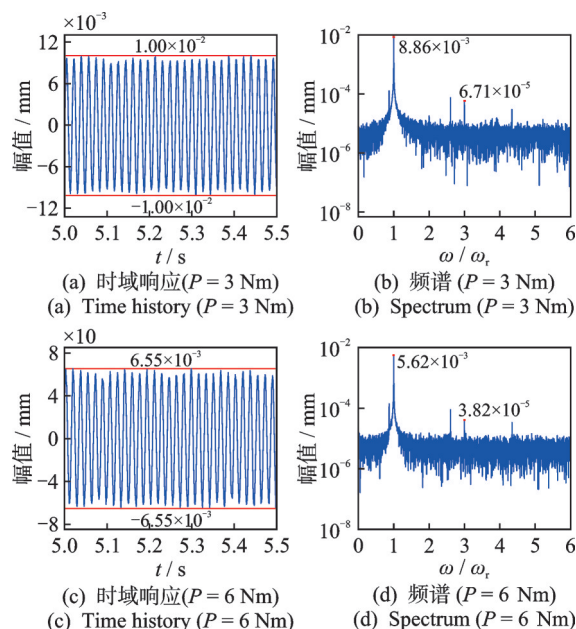


图 15 实测不同预紧力矩下的响应与频谱

Fig.15 Responses and spectrum of the test rig

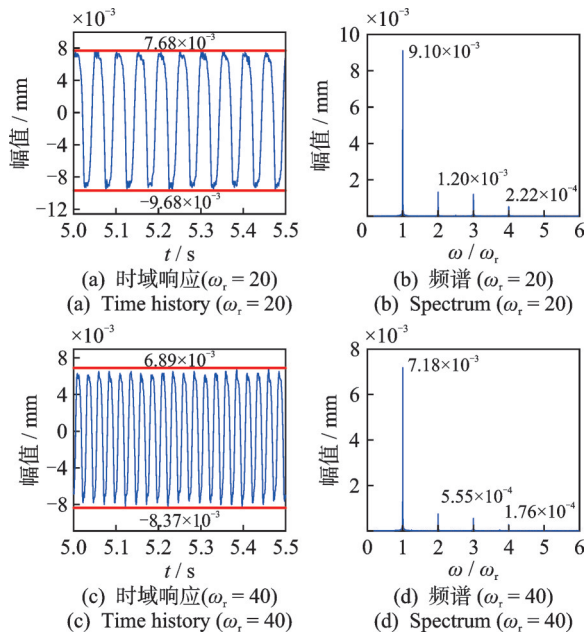


图 16 实测不同激励频率下的响应与频谱

Fig.16 Responses and spectrum of the test rig

响,而仿真模型结构较为理想化,所以实验数据和仿真结果会存在较大的数值差异。但是,实验和仿真结果在定性分析结果上具有一致性,从中仍可以推断出一些一般性结论,包括频率分量、迟滞曲线及响应幅值的变化,从而提高数值计算结果的实用性和普适性。此外,本研究在实验部分将实验平台与仿真模型设置了不同的参数,并在不同参数的仿真模型和实验平台中得到了相同趋势,进一步说明结果的普适性。

4 结论

1) 预紧力和摩擦因数对连接结构结合面接触状态有明显影响,两者均可提高连接结构的等效平均刚度并减小摩擦耗散。

2) 预紧力仅对其滑移触发条件产生影响,而摩擦因数可提高连接结构黏滞阶段刚度并改变滑移触发条件,但两者均未改变其宏观滑移阶段残余刚度的大小。

3) 预紧力、摩擦因数和激励频率的提高均对连接结构的时域响应及频谱幅值产生抑制作用,但均未对其振动频率分量产生影响。

参 考 文 献

- [1] LI Y Q, LUO Z, LIU J X, et al. Dynamic modeling and stability analysis of a rotor-bearing system with bolted-disk joint[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158: 107778.
- [2] 胡阳,姜东,王旻睿,等. 横向载荷作用下螺栓连接松动过程研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1091-1098.
- [3] HU Yang, JIANG Dong, WANG Minrui, et al. Study on loosening process of bolted joints under transverse load[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1091-1098. (in Chinese)
- [4] LI J Q, YANG Z Y, REN Q Z, et al. Study on the bistable vibration behaviour of a rod-fastened rotor-bearing system[J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 109(2): 609-629.
- [5] 郭宁,张欣,段绵超,等. 响应控制下非线性结构动力学实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(5): 915-921.
- [6] GUO Ning, ZHANG Xin, DUAN Jinchao, et al. Experimental study on nonlinear structure dynamics based on response-controlled[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(5): 915-921. (in Chinese)
- [7] 李玲,王晶晶,史小辉,等. 基于修正 Iwan 模型的螺栓结合面非线性建模研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 93-101.
- [8] LI Ling, WANG Jingjing, SHI Xiaohui, et al. Research on nonlinear modeling of bolt joint surface based on modified Iwan model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 93-101. (in Chinese)
- [9] ZHOU Z, ZHENG X D, WANG Q, et al. Modeling and simulation of point contact multibody system dynamics based on the 2D LuGre friction model[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 158: 104244.
- [10] JALALI H, JAMIA N, FRISWELL M I, et al. A generalization of the Valanis model for friction modelling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 179: 109339.
- [11] 李玲,蔡安江,阮晓光,等. 栓接结合部迟滞非线性等效线性化方法[J]. 振动工程学报, 2015(4): 560-566.
- [12] LI Ling, CAI Anjiang, RUAN Xiaoguang, et al. Equivalent linear method for hysteresis nonlinear of bolted joints[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015(4): 560-566. (in Chinese)
- [13] JAMIA N, JALALI H, TAGHIPOUR J, et al. An equivalent model of a nonlinear bolted flange joint[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153: 107507.
- [14] YUAN P P, REN W X, ZHANG J. Dynamic tests and model updating of nonlinear beam structures with bolted joints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158: 107778.

- 2019, 126: 193-210.
- [11] 官明光, 刘文光, 杨洋. 螺栓接头界面迟滞行为分析[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(9): 1416-1422.
GONG Mingguang, LIU Wenguang, YANG Yang. Analysis of hysteresis behavior of bolted joint interface[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(9): 1416-1422.(in Chinese)
- [12] LIU Y, WANG J, CHEN L. Dynamic characteristics of the flange joint with a snap in aero-engine[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2018, 23(2): 168-174.
- [13] 王东, 徐超, 胡杰, 等. 连接结构接触界面非线性力学建模研究[J]. 力学学报, 2018, 50(1): 44-57.
WANG Dong, XU Chao, HU Jie, et al. Nonlinear mechanics modeling for joint interface of assembled structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(1): 44-57.(in Chinese)
- [14] LIU J H, OUYANG H J, FENG Z Q, et al. Dynamic behaviour of a bolted joint subjected to torsional excitation[J]. Tribology International, 2019, 140: 105877.
- [15] 王志, 李吉凯, 刘玉. 带止口法兰连接结构刚度特性对结构振动影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1201-1208.
WANG Zhi, LI Jikai, LIU Yu. Stiffness characteristics of flange joint with a snap and its influence on structure vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1201-1208.(in Chinese)
- [16] 王东, 范宣华. 连接界面迟滞非线性特征的动力学分析[J]. 振动工程学报, 2019, 32(6): 1060-1066.
WANG Dong, FAN Xuanhua. Dynamics analysis for hysteresis nonlinearity of joint interfaces[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(6): 1060-1066.(in Chinese)
- [17] MIR-HAIDARI S E, BEHDINAN K. Nonlinear effects of bolted flange connections in aeroengine casing assemblies[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 166: 108433.
- [18] BEAUDOIN M A, BEHDINAN K. Analytical lump model for the nonlinear dynamic response of bolted flanges in aero-engine casings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 14-28.
- [19] LI D W, XU C, KANG J H, et al. Modeling tangential friction based on contact pressure distribution for predicting dynamic responses of bolted joint structures[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 101(1): 255-269.
- [20] PIRDAYR A, MOHAMMADI M, JAVAD KAZEMZADEH-PARSI M, et al. Self-loosening effects on vibration characteristics of plates with bolted joints: an experimental and finite element analysis[J]. Measurement, 2021, 185: 109922.
- [21] 刘冰, 董兴建, 彭志科. 基于Iwan模型的螺栓连接结合面非线性等效模型[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 7-12.
LIU Bing, DONG Xingjian, PENG Zhike. Nonlinear equivalent model of bolted joint interface based on Iwan model[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(2): 7-12.(in Chinese)
- [22] GIMPL V, FANTETTI A, KLAASSEN S W B, et al. Contact stiffness of jointed interfaces: a comparison of dynamic substructuring techniques with frictional hysteresis measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 171: 108896.
- [23] TAN L F, WANG C Y, LIU Y, et al. Study on hysteresis and threaded fitting behavior of bolted joint with non-parallel bearing surface[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168: 108655.
- [24] LI D W, BOTTO D, LIR Z, et al. Experimental and theoretical studies on friction contact of bolted joint interfaces[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 236: 107773.



第一作者简介:李玉奇,男,1992年1月生,博士、副教授。主要研究方向为螺栓连接转子动力学及连接结构动力学。
E-mail: liyuqi61148@126.com

通信作者简介:温传美,女,1990年8月生,硕士、助理研究员。主要研究方向为螺栓连接转子动力学。
E-mail: 15161101391@163.com