DOI: 10.3901/JME.2021.07.078

螺栓连接界面非线性建模及其参数辨识方法研究*

李朝峰^{1,2} 乔瑞环¹ 苗雪阳¹ 江雨霖¹

(1. 东北大学机械设计及理论研究所 沈阳 110819;

2. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室 沈阳 110819)

摘要: 螺栓连接是一种在机械结构中应用极其广泛的连接形式, 由于连接界面上存在多种非线性特征, 对连接结构的刚度和阻尼具有重要的影响, 并进一步导致其动力学特性的非线性变化。建立了螺栓连接界面的非线性模型, 并提出了一种基于准静态试验的模型参数辨识方法。首先, 在模型中考虑了沿界面法向的非线性接触刚度以及界面上粘滞、滑移、间歇性分离等多种接触状态的存在。进一步, 通过准静态试验获得了连接界面的滞回曲线以及拉压变形曲线, 对所提出的辨识方法进行了实例应用。结果表明理论与试验的曲线结果具有较好的一致性, 该辨识方法具有较高的准确性。该方法能够再现连接界面间复杂非线性特征且具备可识别便于使用的特点, 对于螺栓连接结构的动静态特性仿真计算具有重要意义。

关键词: 螺栓连接界面; 非线性建模; 参数辨识; 准静态试验

中图分类号: TH113; TH117

Investigation on Nonlinear Modeling and Model Parameters Identification of the Interface of Bolted Joints

LI Chaofeng^{1,2} QIAO Ruihuan¹ MIAO Xueyang¹ JIANG Yulin¹

(1. Institute of Mechanical Design and Theory, Northeastern University, Shenyang 110819;

2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: Bolted joints are widely used in mechanical structures. There are multiple nonlinear behaviors on the connection interface, which affect the stiffness and damping of the connection structure, and further cause the nonlinear changes in dynamic characteristics. Therefore, the establishment of a simplified model that can reproduce the complex nonlinear characteristics between the connection interfaces and further identify the model parameters accurately is of great significance for the research on the dynamic and static characteristics of structures with bolted joints. A nonlinear model of connection interface of bolted joints is established, and an identification method for model parameters based on quasi-static experiments is proposed. First, the normal nonlinear contact stiffness and various contact states such as stick, slip, and separation on the interface are considered in the modeling. Furthermore, the hysteresis curves and tensile-compressive deformation curves of the connection interface are obtained through quasi-static experiments, and the proposed identification method is applied to an example. The results show that the theoretical and experimental results are in good agreement, and the identification method has high accuracy.

Key words: interface of bolted joints; nonlinear modeling; parameters identification; quasi-static experiment

0 前言

螺栓连接由于具备易加工、便拆装、承载高、

可靠性好等诸多优点, 在机械设备中具有广泛的应用。螺栓连接改变了机械装配结构的连续性, 由于在连接界面存在接触以及不同的抗拉、抗压刚度, 使得螺栓连接结构的动力学特性表现出复杂的非线性特征。因此, 合理地建立能够再现螺栓连接非线性特征的力学模型, 并对模型参数准确辨识对于含螺栓连接的机械装配结构的动力学特性研究具有重

* 国家自然科学基金资助项目(52075086)。20200518 收到初稿, 20201220 收到修改稿

要的理论意义。

螺栓连接上存在多个接触面界面, 在外载荷作用下各个界面上存在粘滑运动甚至间歇性分离等迟滞非线性现象, 研究人员建立了多种理论模型来对界面接触非线性特性进行模拟。李以农等^[1]提出了一种简化的螺栓连接非线性模型, 考虑到螺栓孔间隙以及界面干摩擦, 分别采用立方刚度以及库伦阻尼模型对非线性刚度内力以及摩擦内力进行近似表示。TANG 等^[2]对螺栓连接圆柱壳进行了建模及分析, 其中螺栓约束力在沿轴向的分量用一个线性弹簧表示, 沿径向和切向的分量分别用两个具有黏滞-滑移-分离特征的分段线性的干摩擦力表示。LI 等^[3]基于螺栓连接的准静态试验研究, 同时考虑不同的拉、压刚度和连接界面之间的摩擦特性, 建立了螺栓连接的本构模型, 提出了螺栓连接薄壁圆柱壳的半解析建模方法, 并进一步分析了其振动响应和界面接触状态。HALLAJISANI 等^[4]在对螺栓支撑矩形板进行振动分析时通过一个 Jenkins 单元与一个线性弹簧的并联模型对螺栓的摩擦特性进行建模。SEGALMAN^[5]采用四参数 Iwan 模型对搭接接头进行了非线性建模。之后, LI 等^[6]通过包含截断幂律分布以及双脉冲函数的密度函数建立了六参数改进 Iwan 模型用于连接界面建模。WANG 等^[7]推导了一个临界滑移力密度函数具有幂律分布特征的 Iwan 微滑移模型用以对连接界面粘-滑行为的模拟。LI 等^[8]以桑德斯壳理论为基础, 应用能量法建立了压缩机薄壁管的振动微分方程, 并研究了其在均匀压力下的固有特性。除了以上理论模型, 基于有限元软件的数值建模也是对螺栓连接常用的研究手段。ABAD 等^[9]通过 ANSYS 建立螺栓连接梁的三维实体有限元模型, 通过在各个接触面上设置接触单元可以获得接触面上的迟滞特性曲线。SCHWINGSHACKL 等^[10]在对螺栓法兰连接壳进行有限元建模时考虑了界面微滑移和分离导致的非线性行为。OMAR 等^[11]提出了四种不同的螺栓连接有限元建模方法, 并通过与模态试验结果对比对各个有限元模型进行了评估。除此之外, 螺栓连接存在不同的抗拉、抗压刚度, 导致在外界拉压载荷作用下表现出非线性特性。LUAN 等^[12]提出采用具有双线性刚度的弹簧对螺栓建立简化模型。刘卓乾等^[13]采用分段线性轴向力模型建立了刚性转子螺栓法兰连接的弯矩模型, 并对系统进行了模态和响应分析。LI 等^[14]建立了圆柱壳的非线性响应测试系统, 对点约束薄壁圆柱壳的非线性振动进行了研究, 并分析了支撑刚度和点约束数量对非线性响应的影响。

螺栓连接模型参数辨识也是近年来该领域内研究的热点, 通常需要根据试验结果, 采用一定的辨识方法对理论模型中的参数进行调整, 使得理论与试验之间的误差最小。其中, 试验手段主要包括准静态试验与动态测试。ABAD 等^[9, 15]基于准静态拉伸试验, 通过试验设计技术对螺栓连接有限元模型中的接触参数进行了辨识。基于有限元模型获得了连接结构在剪切载荷下的迟滞曲线, 进一步对描述界面接触特征的 Valanis 模型参数进行了确定。孙伟等^[16]通过准静态试验获得了螺栓搭接梁的迟滞曲线, 并对结合部的刚度和阻尼进行了辨识。李一堃等^[17]通过准静态试验获取连接界面间的迟滞回线, 对六参数 Iwan 模型进行了辨识。SONG 等^[18]通过锤击试验获得了螺栓连接梁的加速度响应, 采用多层前馈神经网络方法辨识了螺栓连接中 Iwan 模型的参数。JALALI 等^[19]采用力状态映射法对螺栓连接梁结构中的螺栓模型参数进行了确定。CHU 等^[20]以理论和试验结果所获得的频响函数之间误差最小为原则建立了目标函数, 通过优化方法求解出目标函数的最优值, 从而获得螺栓理论模型中的 Valanis 模型参数。

在以往的研究中往往忽略螺栓连接界面间法向压力的变化对接触状态的影响以及在界面上具有任意方向的相对运动。并且, 不会同时考虑连接界面间摩擦以及不同的抗拉压刚度。因此, 考虑了连接界面上粘滞、滑移、分离等多接触状态以及不同的抗拉压刚度等多种非线性行为, 建立了更加符合实际特征的螺栓连接界面简化模型。其中, 采用分段线性模型对螺栓连接非线性接触刚度进行近似描述。通过考虑法向载荷变化和在接触面上两个正交方向上具有耦合效果的三维滑移迟滞模型对接触界面的干摩擦行为进行建模。进一步, 提出一种基于准静态试验的模型参数辨识方法, 通过对一个螺栓连接实例的试验及辨识对该方法进行了应用与验证。研究重点在于建立一个更符合实际特征的螺栓连接模型, 以供其他学者使用。因此对模型具体的应用, 如振动特性等相关的动力学问题在此不再进行研究。

1 螺栓连接界面模型建立

一个螺栓连接示意图见图 1, 并做出如下假设。

- (1) 连接界面上的变形与受力一致。
- (2) 仅承受外界法向拉压、切向剪切载荷。
- (3) 连接界面之间仅存在微小相对运动, 螺杆

不受剪切。

(4) 仅考虑两个被连接件之间形成的接触面,忽略其他接触面。基于以上假设,将螺栓连接简化为作用在两个连接界面间一对节点上的一组非线性约束力,如图 2 所示。为了便于分析,将下连接界面视为固定,并在该界面上沿切向和法向建立正交坐标系(x, y, z),其中 x 、 y 分别指向界面切向与垂直于纸面向外的方向, z 指向界面法向,上连接界面沿这三个方向的位移分量分别用 u 、 v 、 w 表示。

图 1 螺栓连接及界面受力示意图

螺栓连接具有不同的抗拉压刚度,由此导致 z 方向的连接刚度表现出非线性特征。模型中采用图 2a 所示的分段线性模型近似地建立沿连接界面法向约束力表达式

$$f_u = \begin{cases} k_c u & u < u_0 \\ k_c u_0 + k_T (u - u_0) & u \geq u_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_c 、 k_T 、 u_0 分别为螺栓连接的抗压刚度、抗拉刚度、和刚度转变时的临界法向相对位移。

螺栓连接存在预紧力 F_{pre} , 导致连接界面之间存在初始法向压力 F_n 。当沿连接界面法向有相对运动时, 压力大小将会发生改变

$$F_n = \begin{cases} F_{pre} - f_u & f_u < F_{pre} \\ 0 & f_u \geq F_{pre} \end{cases} \quad (2)$$

螺栓连接界面上的干摩擦是其非线性的另一重要来源,模型中采用图 2b 所示的三维宏观滑移迟滞模型来建立连接界面的切向约束力表达式。在该模型中考虑了连接界面法向压力的变化以及在界面上具有任意方向的平面椭圆运动,可以模拟连接界面之间粘滞、滑移和间歇性分离等多种接触状态。其

中,当剪切弹簧的合力 F_T 不超过临界滑移力时,界面处于黏滞状态,此时沿 x 、 y 方向的干摩擦力分量在数值上等于剪切弹簧的恢复力

(a) 连接界面法向分段线性模型

(b) 连接界面切向干摩擦模型

图 2 螺栓连接界面模型

$$F_f^v = k_v (v - d_v) \quad F_T \leq v F_n, F_n > 0 \quad (3)$$

$$F_f^w = k_w (w - d_w) \quad F_T \leq v F_n, F_n > 0 \quad (4)$$

式中, k_v 、 k_w 为剪切刚度, d_v 、 d_w 是摩擦阻尼器的位移, 取值为刚进入黏滞状态时的初始值且在粘滞运动过程中保持不变, 即 $\dot{d}_v = \dot{d}_w = 0$, v 为摩擦因数, F_T 的表达式为

$$F_T = \sqrt{[k_v (v - d_v)]^2 + [k_w (w - d_w)]^2} \quad (5)$$

当 F_T 大于临界滑移力, 连接界面发生滑移

$$F_f^v = v F_n \cos(\gamma) \quad F_T > v F_n, F_n > 0 \quad (6)$$

$$F_f^w = v F_n \sin(\gamma) \quad F_T > v F_n, F_n > 0 \quad (7)$$

此时, $\dot{d}_v = \dot{v}$ 、 $\dot{d}_w = \dot{w}$, 摩擦阻尼器与上连接界面同步运动, 剪切弹簧变形保持不变。 γ 为摩擦方向角^[21], 定义为在界面上摩擦力方向与 x 向间夹角的大小

$$\gamma = \begin{cases} \arccos \left[\frac{k_v (v - d_v)}{F_T} \right] & k_w (w - d_w) \geq 0, k_v (v - d_v) \neq 0 \\ \arccos \left[\frac{k_v (v - d_v)}{F_T} \right] & k_w (w - d_w) > 0, k_v (v - d_v) = 0 \\ -\arccos \left[\frac{k_v (v - d_v)}{F_T} \right] & k_w (w - d_w) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

当界面上压力为 0 时, 出现分离, 干摩擦力分量 $F_f^v = F_f^w = 0$, 摩擦阻尼器的速度 $\dot{d}_v = \dot{v}$ 、 $\dot{d}_w = \dot{w}$, 将其视为与连接件位移相同。考虑到螺栓连接发生滑移时仍存在剩余剪切刚度, 将沿 x 、 y 方向的摩擦力分量表示为摩擦力与线性弹簧组合的形式

$$f_v = \begin{cases} k_v(v - d_v) + k_{vl}v & F_T < vF_n, F_n > 0 \\ vF_n \cos(\gamma) + k_{vl}v & F_T \geq vF_n, F_n > 0 \\ k_{vl}v & F_n = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_w = \begin{cases} k_w(w - d_w) + k_{wl}w & F_T < vF_n, F_n > 0 \\ vF_n \sin(\gamma) + k_{wl}w & F_T \geq vF_n, F_n > 0 \\ k_{wl}w & F_n = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, k_{vl} 、 k_{wl} 为附加的线性弹簧刚度, 摩擦阻尼器位移如下

$$d_v = \begin{cases} d_{v0} & F_T < vF_n, F_n > 0 \\ v - \frac{vF_n \cos(\gamma)}{k_v} & F_T \geq vF_n, F_n > 0 \\ v & F_n = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$d_w = \begin{cases} d_{w0} & F_T < vF_n, F_n > 0 \\ w - \frac{vF_n \sin(\gamma)}{k_w} & F_T \geq vF_n, F_n > 0 \\ w & F_n = 0 \end{cases} \quad (12)$$

在实际的机械结构中, 螺栓往往是成组出现的, 其有效受力范围的半径大约为螺栓螺母直径的 1.5 倍。而且由于拧紧顺序不同, 螺栓之间会产生相互影响。但在实际的装配中, 每个螺栓都要预留出相应的空间用于安装, 所以大多数情况下两个螺栓之间相距的位置稍大于或等于其有效受力范围。

此外, 拧紧引起的结构动力学特征的变化主要是由于预紧力产生的局部变形造成的。为了将模型简化便于分析, 单个螺栓与螺栓组的动力学特性之间的联系暂不考虑。

2 模型参数辨识方法

这里对表 1 中所示连接界面模型参数进行了辨识, 其中黏滞状态剪切刚度 $k_{stick} = k_v + k_{vl} = k_w + k_{wl}$, 滑移状态剪切刚度 $k_{slip} = k_{vl} = k_{wl}$ 。这些参数可以分为两类, 一类是界面法向分段线性模型中的参数,

另一类是界面切向干摩擦模型中的参数。在建立的模型中假设此两类参数是相互正交的, 没有考虑二者相互耦合的影响, 具体的原因如下: 从模型的角度来看, 螺栓连接结构所受到的载荷都可以分解到轴向和径向两个方向, 考虑成正交载荷。而且其响应也主要是以径向的位移为主。因此这两类参数间具有相互独立性, 可以分别设计试验对其进行辨识。

表 1 螺栓连接界面模型参数

参数分类	参数名称	符号
切向干摩擦模型参数	黏滞状态剪切刚度	k_{stick}
	滑移状态剪切刚度	k_{slip}
	摩擦因数	v
法向分段线性模型参数	抗拉刚度	k_T
	抗压刚度	k_C
	临界点法向位移	u_0

设计了图 3 中 A、B 两组准静态试验, 分别对上述两类模型参数进行辨识。在试验 A 中, 将两个被连接件通过一个螺栓连接起来并施加一定的预紧力, 对连接结构施加准静态周期剪切载荷, 最终获得连接界面发生干摩擦时的滞回曲线, 并对切向约束模型中的参数进行调整。为了避免引入额外的力矩, 通过结构调整使得左右两个夹持端的受力中心与连接界面在同一个平面上。在试验 B 中, 对螺栓连接结构施加沿界面法向的准静态周期拉压载荷, 获得恢复力-变形曲线, 并对法向约束模型参数进行调整。在该结构中为了减小由于螺栓与夹持端之间偏心而导致的弯曲连接结构变形的影响, 将 AB、BC 段结构的截面尺寸加大以增大结构刚度, 其中 AB 段截面厚度为 11 mm, BC 段截面厚度为 8 mm, 同时采用了尺寸较小的 M6 螺栓。

图 3 准静态试验原理图

通过以上准静态试验结果对表 1 中的模型参数进行辨识, 具体辨识流程如图 4 所示。首先根据获得的界面发生干摩擦时的滞回曲线对参数 k_{stick} 、 k_{slip} 、 ν 进行调整。如图 5a 为一个典型的干摩擦滞回曲线^[15], 其中 AB 、 DE 段为粘滞运动, CD 、 FA 段为滑移运动, 滞回曲线包围的面积为一个周期内的能量耗散 E_d , 反映了连接界面的阻尼能力, AD 的斜率为连接界面等效刚度 K_{eq} 。为了使理论模型能准确有效的模拟连接界面的迟滞非线性特性, 通过参数调整使理论与试验所得滞回曲线最大程度吻合。因此, 以等效刚度与能量耗散作为衡量标准, 构造优化目标函数

$$F_{\text{OBJ}} = \left[(K_{\text{eq}}^p - K_{\text{eq}}^t)^2 + (E_d^p - E_d^t)^2 \right] \quad (13)$$

式中, K_{eq}^p 、 E_d^p 、 K_{eq}^t 、 E_d^t 分别为理论模型和试验结果对应的等效刚度与能量耗散值。

图 4 模型参数辨识方法流程

图 5 连接界面干摩擦滞回曲线

进一步, 采用 MATLAB 中的无约束非线性优化工具 `fminsearch` 对目标函数进行优化。首先, 对所辨识参数初始值进行估算。根据试验所得滞回曲线, 并基于最小二乘法对黏滞和滑移状态的曲线部分进行线性拟合并取其平均值, 获得剪切刚度 k_{stick} 、 k_{slip} 的优化初值。在理论模型中, 位移原点处的恢复力 $f_u = \pm \nu F_n$, 由此计算摩擦因数 ν 的初值。

为了获得目标函数的具体表达式, 对等效刚度和能量耗散的理论、试验值计算表达式进行推导。试验 A 中螺栓连接只存在 x 方向运动, 法向压力不变, 根据式(9)、(11)得到螺栓约束力的表达式如下

$$f_v = \begin{cases} k_v(\nu - d_{v0}) + k_{vl}\nu & k_v|\nu - d_v| < \nu F_{\text{pre}} \\ \pm \nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & k_v|\nu - d_v| \geq \nu F_{\text{pre}} \end{cases} \quad (14)$$

在图 5b 中滞回曲线段存在一点满足

$$F_f^v = k_v(\nu - d_{v0}) = 0 \quad (15)$$

此时 $\nu = d_{v0}$, 存在如下关系

$$d_{v0} = A - \frac{(\nu F_{\text{pre}} + k_{vl}A) - k_{vl}d_{v0}}{k_v + k_{vl}} \quad (16)$$

进一步可得

$$d_{v0} = A - \frac{\nu F_{\text{pre}}}{k_v} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)

$$f_v = \begin{cases} k_v(\nu - A) + \nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & AB \\ -\nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & BC \end{cases} \quad (18)$$

可用同样的过程得到整个滞回周期内界面切向约束力的表达式

$$f_v = \begin{cases} k_v(\nu - A) + \nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & AB \\ -\nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & BC \\ k_v(\nu + A) - \nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & CD \\ \nu F_{\text{pre}} + k_{vl}\nu & DA \end{cases} \quad (19)$$

进一步得能量耗散和等效刚度理论值表达式

$$\begin{cases} E_d^p = 4\nu F_{\text{pre}} \left(A - \frac{\nu F_{\text{pre}}}{k_v} \right) \\ K_{\text{eq}}^p = \frac{\nu F_{\text{pre}}}{A} + k_{sl} \end{cases} \quad (20)$$

采用七次多项式函数对试验数据进行拟合, 得到图 5a 中加载段 DA 与卸载段 AD 的表达式

$$\begin{cases} \tilde{f} = \sum_{i=0}^7 a_i \nu^i & DA(\text{加载}) \\ \tilde{f} = \sum_{j=0}^7 b_j \nu^j & AD(\text{卸载}) \end{cases} \quad (21)$$

进一步得到能量耗散、等效刚度试验值表达式

$$\begin{cases} E_d^t = \int_{\nu_1}^{\nu_2} (\tilde{f} - \tilde{f}) d\nu \\ K_{\text{eq}}^t = \frac{\tilde{f}_{\text{max}} - \tilde{f}_{\text{min}}}{\nu_2 - \nu_1} \end{cases} \quad (22)$$

式中, ν_1 、 ν_2 、 $\tilde{f}_{\text{max}}$ 、 $\tilde{f}_{\text{min}}$ 为如图 5a 中 D 、 A 点的位移与恢复力。

将式(20)、(22)代入式(13)

$$F_{\text{OBJ}} = \left(\frac{vF_{\text{pre}}}{A} + k_{\text{sl}} - \frac{\bar{f}_{\text{max}} - \bar{f}_{\text{min}}}{v_2 - v_1} \right)^2 + \left[4vF_{\text{pre}} \left(A - \frac{vF_{\text{pre}}}{k_v} \right) - \int_{v_1}^{v_2} (\bar{f} - \bar{f}) dx \right]^2 \quad (23)$$

为了获得连接界面法向分段线性模型中的参数,在获得连接结构在拉压载荷下的恢复力-位移曲线之后选取其在拉伸与压缩阶段的部分数据,然后基于最小二乘法对所取得数据直接进行线性拟合,从而获得抗拉、抗压刚度。进一步,通过拟合曲线对刚度转变临界点位移进行计算。

3 实例应用

以图 6 中所示的螺栓连接结构作为实例进行了准静态试验及其界面参数辨识,以对第 2 节中提出的模型参数辨识方法进行应用与验证。该螺栓连接结构为两个被连接件(45 钢)通过一个 12.9 级高强度螺栓(M6)连接在一起,在螺栓头与被连接件间安装有环形测力传感器(FC-LW6-10 kN,量程为 10 kN)以控制初始预紧力。

图 6 螺栓连接试件

准静态测试系统如图 7 所示,该系统由电-液疲劳试验机、螺栓预紧力测试系统构成。其中试验机上端夹具固定,下端夹具加载。在进行试验 A 时首先将试验件的 A、B 端装夹在夹具上,然后在加载端施加准静态周期剪切载荷,通过机器内部自带的传感器对位移和载荷数据进行记录,并最终通过计算机控制软件保存输出。这里进行了三组准静态剪切试验,其中螺栓的预紧力分别为 5.5 kN、6.0 kN、8.0 kN,所施加的剪切位移载荷幅值均为 0.1 mm,试验编号为试验 A1, A2 和 A3。试验所得迟滞曲线如图 8 中虚线所示。

(a) 准静态测试系统

(b) 夹具及试件

图 7 螺栓连接准静态试验

按照第 2 节中介绍的参数辨识方法,首先对图 8 中试验所得滞回曲线加载、卸载段的数据进行七次多项式拟合,得到等效刚度与能量耗散试验值如表 2 中所示。进一步结合目标函数表达式(23),采用 Matlab 中的无约束非线性优化求解器 fminsearch 得到各参数的优化结果如表 3 中所示。

表 2 等效刚度与能量耗散试验值

试验编号	能量耗散 $E_d^1 / (\text{N} \cdot \text{m})$	等效刚度 $K_{\text{eq}}^1 / (\text{N/m})$
A1	0.534 8	17 655 131.64
A2	0.643 8	19 354 966.78
A3	0.763 7	24 425 417.11

表 3 连接界面切向模型参数辨识结果

试验编号	参数	v	$k_{\text{stick}} / (\text{N/m})$	$k_{\text{slip}} / (\text{N/m})$
A1	初值	0.267 3	113 904 745.89	1 867 952.64
	优化结果	0.285 8	103 015 308.67	1 936 943.09
A2	初值	0.302 2	110 500 069.95	952 727.35
	优化结果	0.306 2	113 416 447.09	980 608.84
A4	初值	0.279 9	116 572 641.46	1 799 185.16
	优化结果	0.282 1	119 735 299.68	1 854 521.17

通过模型参数辨识结果可以得到所建立的螺栓连接界面模型对应的滞回曲线如图 8 中实线所示,通过曲线对比可以看到理论与试验结果具有较高的一致性,说明所建立的螺栓模型可以很好的模拟连接界面

之间的迟滞非线性特性。同时,为了进一步验证所提出辨识方法的准确性,分别计算两组试验条件下辨识结果与试验结果所得到的等效刚度与能量耗散的相对误差如表 4 所示。定义相对误差计算公式如下

$$\begin{cases} \text{error}_E = \frac{|E_d^t - E_d^p|}{E_d^t} \times 100\% \\ \text{error}_K = \frac{|K_{eq}^t - K_{eq}^p|}{K_{eq}^t} \times 100\% \end{cases} \quad (24)$$

表 4 等效刚度与能量耗散理论、试验值对比

	$F_{pre}=5.5 \text{ kN}$			$F_{pre}=6 \text{ kN}$			$F_{pre}=8 \text{ kN}$		
	理论值	试验值	误差(%)	理论值	试验值	误差(%)	理论值	试验值	误差(%)
等效刚度 K_{eq} /(N/m)	17 655 943.09	17 655 131.64	0.714	19 352 608.84	19 354 966.78	0.012	24 422 521.17	24 425 417.11	0.012
能量耗散 E_d /(N·m)	0.531 0	0.534 8	0.004	0.615 9	0.643 8	4.333	0.729 9	0.763 7	4.426

通过图 8 中的试验结果可以看到,连接界面从粘滞状态进入滑移状态时并非突变,而是会经历一个过渡过程,剪切刚度会经历逐渐软化的过程即微

(a) 试验A1(预紧力为5.5 kN)

(b) 试验A2(预紧力为6 kN)

(c) 试验A3(预紧力为8 kN)

图 8 理论与试验滞回曲线对比

在表 4 中最大的误差为 4.426%,来自于试验 A3,在误差允许范围内进一步证明了参数辨识方法的准确性。同时,通过图 8c 可以看到试验 A3 在正向与反向滑移时产生的恢复力并不对称,这是由于试件的加工以及安装误差导致试验机在未加载时存在更大的初始应力,从而引起了零点漂移。由于理论模型的滑移恢复力具有对称特征,从而导致试验 A3 辨识结果误差相对较大。

滑移阶段,对应于图 5a 中 BC、EF 段。图 8a 中理论与试验结果在粘滞与滑移阶段吻合较高,而在微滑移阶段产生了相对较大的误差,这是由于在建模中忽略了微滑移过程。因此,在后续的研究中为了对模型进行进一步深化,需要对界面间的微滑移运动进行考虑。

在相同的试验环境下进行准静态拉压试验并对法向模型参数进行辨识。首先对螺栓连接试验件施加两个不同水平的预紧力,并分别编号为试验 B1、试验 B2。然后将图 6 中被连接件 C、D 端装夹在夹具上,在夹具的加载端施加准静态周期拉压载荷,通过控制软件对位移和恢复力数据进行记录输出,得到对应曲线结果如图 9 中虚线所示。选取试件在受拉与受压阶段的部分数据进行分段线性拟合并计算交点,得到连接界面法向约束力模型参数如表 5 中所示。

表 5 连接界面法向模型参数辨识结果

试验编号	k_t (kN/mm)	k_c (kN/mm)	u_0 (mm)
B1	13.860 1	88.231 8	0.019 1
B2	13.300 4	90.449 0	0.022 3

图 9 中为试验与理论的恢复力-位移曲线结果对比,从图中可以看到二者之间具有较好的一致性,表明理论模型和辨识方法可以对螺栓连接的拉压非线性特性进行准确模拟。

为了进一步论证所建立的螺栓连接非线性模型及其参数识别方法的准确性,将所得到的现象与参考文献中使用有限元方法得到的现象进行了比较。论文^[9]中采用有限元方法建立了螺栓连接结构的三

维模型, 利用试验设计技术(DOE)拟合本构接触参数, 并通过试验验证了与弹塑性滞后循环有关的理论结果。经过比较发现两者所得到的现象和理论结果具有良好的一致性, 例如当对螺栓施加的预紧力增大时, 所得到的滞回曲线呈现出相同的变化趋势, 且所对应的等效刚度和能量耗散都随预紧力的增大而增大。同时结合理论与试验的对比, 认为所建立的模型及其参数识别方法具有良好的准确性。

图9 理论与试验拉压变形曲线对比

4 结论

基于螺栓连接界面之间的摩擦与不同的抗拉压刚度等多种非线性特征, 通过一种考虑粘滞、滑移、间歇性分离的三维宏观滑移迟滞模型与分段线性模型建立了螺栓连接界面的简化非线性模型。提出了一种模型参数辨识方法, 通过对螺栓连接实例的准静态试验与辨识对该辨识方法的准确性进行了验证。得到以下结论。

(1) 根据准静态试验结果, 螺栓连接在承受外部剪切载荷时表现出明显的迟滞非线性现象, 在承受外部拉压载荷时表现出明显的拉压刚度不一致, 法向接触刚度具有鲜明的非线性特征。

(2) 采用所建立的螺栓连接界面非线性模型, 并对模型参数进行适当地调整, 可以对上述的迟滞非线性特征以及拉压非线性特性进行准确模拟。所提出的界面模型参数辨识方法具有较高的准确性。

(3) 通过试验结果可以观察到在界面滞回曲线中存在明显的微滑移过程, 在微滑移阶段理论与试验吻合程度相对较差, 因而在进一步对模型精细化研究时需要对接面微滑移运动进行考虑。

参 考 文 献

- [1] 李以农, 郑玲, 闻邦椿. 螺栓接头非线性模型及其波能耗散[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 137-142.
LI Yinong, ZHENG Ling, WEN Bangchun. Nonlinear model of bolted joint and its wave energy dissipation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2): 137-142.
- [2] TANG Qiansheng, LI Chaofeng, SHE Houxin, et al. Modeling and dynamic analysis of bolted joined cylindrical shell[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(4): 1953-1975.
- [3] LI Chaofeng, QIAO Ruihuan, TANG Qiansheng, et al. Investigation on the vibration and interface state of a thin-walled cylindrical shell with bolted joints considering its bilinear stiffness[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107580.
- [4] HALLAJISANI S, KASHANI H, NOBARI A. Plate vibration suppression by optimizing friction threshold at its bolted supports[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2019, 8: 1-11.
- [5] SEGALMAN D J. A four-parameter Iwan model for lap-type joints[J]. Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, 2005, 72(5): 752-760.
- [6] LI Yikun, HAO Zhiming. A six-parameter Iwan model and its application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 68: 354-365.
- [7] WANG Dong, XU Chao, FAN Xuanhua, et al. Reduced-order modeling approach for frictional stick-slip behaviors of joint interface[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 131-138.
- [8] LI Chaofeng, TANG Qiansheng, SHE Houxin, et al. Natural characteristic of thin-wall pipe under uniformly distributed pressure [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(6): 108-117.
- [9] ABAD J, FRANCO J M, CELORRIO R, et al. Design of experiments and energy dissipation analysis for a contact mechanics 3D model of frictional bolted lap joints[J]. Advances in Engineering Software, 2012, 45(1): 42-53.
- [10] SCHWINGSHACKL C W, PETROV E P. Modeling of flange joints for the nonlinear dynamic analysis of gas turbine engine casings[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(12): 122504.
- [11] OMAR R, RANI M N A, YUNUS M A, et al. Efficient finite element modelling for the investigation of the

- dynamic behaviour of a structure with bolted joints[C]. AIP Conference Proceedings, Materi, 2018.
- [12] LUAN Yu, GUAN Zhenqun, CHENG Gengdong, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 331(2): 325-44.
- [13] 刘卓乾, 曹树谦, 郭虎伦, 等. 含螺栓连接转子系统非线性振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 10-16.
LIU Zhuoqian, CAO Shuqian, GUO Hulun, et al. Vibration characteristics of rotor systems with bolt joints[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 10-16.
- [14] LI Chaofeng, ZHANG Zixuan, YANG Qingyu, et al. Experiments on the geometrically nonlinear vibration of a thin-walled cylindrical shell with points supported boundary condition[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 473: 115226.
- [15] ABAD J, MEDEL F J, FRANCO J M. Determination of valanis model parameters in a bolted lap joint: Experimental and numerical analyses of frictional dissipation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 89: 289-298.
- [16] 孙伟, 谭龙飞, 吴宁祥. 螺栓结合部静态迟滞行为分析及刚度和阻尼辨识[J]. 东北大学学报, 2018, 39(12): 1743-1747.
SUN Wei, TAN Longfei, WU Ningxiang. Static hysteresis behavior analysis and stiffness and damping identification of bolted joints[J]. Journal of Northeastern University, 2018, 39(12): 1743-1747.
- [17] 李一莹, 郝志明, 章定国. 连接结构宏观滑移能量耗散特性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 125-131.
LI Yikun, HAO Zhiming, ZHANG Dingguo. Investigation on the energy dissipation properties of jointed structure during macro-slip stage[J]. Journal of Mechanical engineering, 2018, 54(15): 125-131.
- [18] SONG Y, HARTWIGSEN C J, MCFARLAND D M, et al. Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1-2): 249-276.
- [19] JALALI H, AHMADIAN H, MOTTERSHEAD J E. Identification of nonlinear bolted lap-joint parameters by force-state mapping[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(25-26): 8087-8105.
- [20] CHU Yongpeng, WEN Hao, CHEN Ti. Identification using Valanis model for beams with nonlinear bolted joint and boundary connection[C]// The 24th International Conference Vibro engineering, 2016, Shanghai, China.
- [21] XIA F. Modelling of a two-dimensional Coulomb friction oscillator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(5): 1063-1074.
-
- 作者简介: 李朝峰(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为耦合结构动力学与振动控制。
E-mail: chfli@mail.neu.edu.cn