

机械装备螺栓连接状态测试 技术研究现状*

齐艳华,黄庆涛,袁 博,孙清超

(大连理工大学机械工程学院,大连 116024)

[摘要] 螺栓连接广泛存在于航空航天结构中,结构的连接状态直接关系到设备的安全性和功能性。航空飞行器在服役过程中面临着振动、冲击等多种极端环境,最终会导致栓接结合部出现松脱、滑移等现象,因此对结构的连接状态进行监测具有重要意义。主要综述了螺栓连接状态测试技术的研究现状及其测试原理。首先,对螺栓连接状态机理的研究现状进行了分析,主要内容包括结合面细微观机理和结构非线性动力学理论。然后,介绍了传统的螺栓连接状态直接测量技术,并分析了其测量精度不足和应用局限性等问题。最后,综述了各类基于响应信号的螺栓连接状态测试技术的原理,包括振动信号分析法、机电阻抗法、声弹性效应法、超声波能量法、光栅光纤传感器法,并分析了其优缺点和适用范围,指出了其发展方向。

关键词: 螺栓连接;结构健康监测;螺栓预紧力;非线性动力学;结构振动

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.063



齐艳华

硕士研究生,主要研究方向为高端紧固装配技术,参与了中国航发商用航空发动机公司合作项目——螺母高精度自动装配平台拧紧工艺仿真和试验项目。

螺栓连接具有可靠性高、承载能力强、拆卸方便等优点,广泛存在于航空航天结构中。然而,螺栓连接结合部又是影响系统结构可靠性的薄弱环节。航空飞行器在服役的过程中,面临着如地面运输、反复吊装中的低频往复振动,发动机工作时产生的随机振动环境以及气动噪声产生的全频段复杂振动,同时还经受飞行过程中产生的多方向、宽频段、高量级的冲击,以及发动机点火瞬间高量级中低频冲击等多种极端环境,导致螺栓连接结合部出现预紧力下降、结合面松动、滑移、发出异响等现象。其最终结果就是系统的刚度降低、结构的完整性遭到破坏、振动加剧、能量耗散增加,进而影响结构的工作性能和安全可靠性^[1]。因此,科学准确地测试螺栓连接结构的连接状态,对于保证结构的安全性、避免重大安全

事故具有重要意义。为此,国内外众多学者针对螺栓连接松动机理和状态测试技术进行了大量的研究工作。

螺栓连接是典型的跨尺度非线性问题,宏观可见的状态变化总是由微观接触运动累积形成的。早在1977年,Beards等^[2]基于Hertz接触理论,通过控制界面的微观滑移特性,研究了结合部非线性动力学的阻尼与能量耗散之间的关系。1978年,Sakai^[3]通过对横向受载的栓接结合部的理论研究,推导出螺纹副之间产生滑移的力和力矩方程,提出了临界滑移的概念。2002年,Hess等^[4]进一步提出了局部滑动和完全滑动的概念。螺栓连接松动的细微观机理在不断地完善与发展,结合面微观接触特性与系统的非线性刚度和能量耗散密切相关,而这些物理量又是评价结构连接状态的重要指标。基于

* 基金项目:国家自然科学基金(51875081);两机专项项目(2017-VII-0010-0105);大连理工大学基本科研业务费项目(DUT18LAB04)。

结合面的微观接触特性理论,衍生出了众多测量方法,如振动分析法、机电阻抗法、超声波能量法等方法。

振动环境中,由于工作载荷的不断变化和微观滑移特性的影响,连接界面的刚度、阻尼均为非线性,从而导致螺栓连接结构的非线性动力学行为。1996年,Hess^[5]研究了在轴向正弦载荷作用下单个螺栓的响应情况,进行了螺栓不同预紧程度的试验现象,观察了随着振动量级以及振动频率的变化情况。2001年,陈予恕等^[6]基于弹性理论和拉格朗日方程,研究了连接结构松动对系统非线性动力学特性的影响。2006年,徐永波^[7]采用谐波叠加法模拟脉动风载荷研究输电塔螺栓松动前后的振动响应特性。2009年,美国Sandia国家实验室^[8]针对螺栓连接结合面法向力和切向力的影响以及微观滑移现象,以能量耗散和非线性刚度为主要测量特征进行了大量的研究工作,包括动力学正弦激励试验、模态试验、螺栓连接准静态试验、构建Iwan模型、结合部有限元建模等,证明结合部的连接非线性会造成系统非线性刚度下降、阻尼硬化、各阶模态固有频率下降、振型畸变等问题。2010年,赵登峰等^[9]研究了螺栓连接结构连接状态变化时的振动响应特性,提出了以谐波失真度作为连接状态的评价指标。由此可见,研究螺栓连接结构的非线性动力学特性是识别其连接状态的基础和前提。随着工业生产对设备功能性和安全性的要求不断提高,基于响应信号的动力学参数识别和连接状态监测技术已经成为国内外的研究热点^[10-15]。

本文概述了螺栓连接状态变化的微观机理和非线性动力学特性的研究进展;简要介绍并分析了传统螺栓连接状态测试技术的局限性;总结和综述了基于振动分析、超声导波技术、光栅光纤传感器等技术的螺栓连接状态监测技术,并详细分析了

几种技术的测试原理、关键技术、优缺点和适用范围;指出了螺栓连接状态测试技术的未来研究方向。

传统螺栓连接状态测试技术

在工程实践中,施工人员广泛采用扭矩扳手控制连接结构中的螺栓预紧力^[16-17]。然而,由于螺纹副以及螺栓与零件接触面之间的摩擦系数存在较大的分散性,采用扭矩法测得的螺栓预紧力并不精确。相关研究表明,同一规格的螺栓在同一扭矩下的预紧力误差可以高达30%^[18-19]。为提高螺栓预紧力的精确性,准确判断结构的连接状态,研究人员开发出了电阻应变片电测法、压力敏感胶片法等螺栓连接状态直接测量技术。

1 电阻应变片电测法

电阻应变片电测法是通过电阻应变片测量螺栓长度方向上的应变获得螺栓预紧力的一种方法^[20]。将电阻应变片粘贴在未受力螺栓表面,通过对比螺栓拧紧前后的应变片的电阻值变化计算得出螺栓表面的轴向应变,然后根据胡克定律推导出螺栓表面的应力变化。在螺栓拧紧过程中存在剪切应力,会对测量结果的精度产生影响。该方法相对于扭矩扳手法精度较高,但是由于应变片粘贴过程较为复杂、成本较高、受测螺栓不能拆卸等缺点,仅适用于实验室环境下的测量分析。

2 压力敏感胶片法

压力敏感胶片对接触面间的压力敏感,能够通过受压染色的图像显示出界面接触区域和压力分布情况,其使用方法和试验效果如图1所示。使用压力敏感胶片法测量螺栓连接状态,首先要对压力敏感胶片进行标定,确定胶片色彩深浅与压力大小之间的对应关系;然后将压力敏感胶片放在螺栓连接结合面中,并施加预紧力;最后取出受压后的胶片,对胶片上的图像进行扫描,如图2所

示,将扫描后的图像进行滤波和简化处理,通过处理过的图像进行色彩信息对比,即可确定结合面压力分布情况。该方法的优点是试验简单、直接、成本低;缺点是压力敏感胶片不能测量动态压力,且其存在本身就已经改变了结合面的微观特性,最终难以分析测量的结果。

综上所述,传统的螺栓连接状态测试技术虽然能够对单个螺栓预紧力进行直接检测,但同时也存在其局限性:(1)多数方法仅适用于静态连接结构或实验室环境;(2)对技术人员的专业技能要求较高;(3)基于扭



(a) 夹装时的压力敏感胶片



(b) 压力敏感胶片试验效果

图1 结合面压力敏感胶片

Fig.1 Joint pressure sensitive film

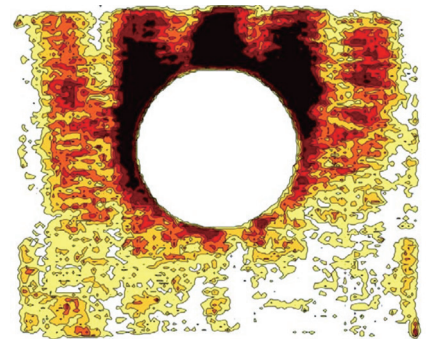


图2 结合面的滤波和简化图像

Fig.2 Filtered and simplified image of contact patch

矩法、转角法间接测得预紧力,结果存在较大误差(4)螺栓需要特制,且仅能单次使用,成本较高。因此,传统的测试技术无法实现针对航空航天飞行器服役环境复杂的设备的连接状态实时监测^[21-23]。

近年来,随着非线性动力学理论、传感器测试技术、信号分析处理技术和模式识别技术的飞速发展,结构的响应参数更易获取,且数据采集效率和精度都有了极大的提高,由此出现了基于响应信号的螺栓连接状态监测技术。其中最具代表性的有基于振动分析的监测技术、基于超声导波的监测技术和基于FBG传感器的监测技术。

基于振动分析的连接状态测试技术

螺栓连接广泛存在于航空发动机转子连接结构中,其振动特性与转子系统的刚度、阻尼、模态振型等动力学特性密切相关,一直是相关工作者长期研究的课题^[24]。而振动信号具有易于提取、可实现实时监测、在线监测等优点,特别适用于这种大型复杂结构,通过振动分析识别结构的连接状态一直是无损检测技术领域的研究热点^[25]。

1 基于结构动力学参数的连接状态监测技术

根据结构动力学理论,结构连接状态的变化必然会导致结构的刚度、阻尼等动力学特性发生变化。可将观测到的结构动力学参数作为特征指标与基准参数进行对比,根据敏感参数的变化情况即可判断结构的连接状态^[21,26-30]。常用的结构动力学参数有位移模态振型、各阶模态固有频率、频响应函数、曲率模态振型、应变模态振型、应变频率响应函数等^[31]。也可以通过分析处理振动信号,提取信号中的时域统计特征并对其进行敏感度评估,利用敏感特征的模式识别技术判断结构的连接状态。

状态信息的特征提取是机械设备故障诊断技术的关键,信号处理是信号特征提取的基础^[32]。振动分析法的关键技术在于振动信号处理技术和敏感特征提取技术。目前常用的振动信号处理技术有时频域统计分析、傅里叶变换、时间序列分析、细化谱分析、全息谱分析、奇异谱降噪、匹配追踪分析和几何分形分析等。此外,针对机械设备工作过程中的非平稳、非线性、非高斯分布的振动信号,又开发出了高阶谱分析、快速傅里叶变换、小波分析、小波包变换、第二代小波变换、随机共振技术、经验模式分解、变分模式分解等先进的信号处理技术。而在特征提取方面,主要分为有量纲指标和无量纲指标。有量纲指标是指时域分析中的均值、方差、标准差,以及最大最小值等具有实际物理含义的物理量。无量纲指标则是在有量纲指标的基础上进一步演变,主要有偏斜度、峭度、波形指标、峰值指标、脉冲指标等,其优点是不易受到设备工况变化的影响^[33]。

基于振动分析的监测技术是研究机械结构动力学特性最为成熟的一种技术,但该技术应用于螺栓连接结构状态监测领域的时间较短,相关的非线性动力学特性、信号处理、特征提取等关键技术还有待进一步发展。

2 基于机电阻抗法的连接状态监测技术

压电材料(如石英晶体、锆钛酸铅压电陶瓷,简称PZT)工作频率较高,对结构中的细微变化非常敏感,能够及时发现结构中的损伤。螺栓连接状态的变化会改变结构的机械阻抗,利用其机电耦合效应可以获得机械阻抗的变化信息。具体方法及原理如图3所示,将压电材料粘贴在被测基体上,并对其施加交流电场。利用逆压电效应使压电陶瓷和被测基体产生振动。被测基体的振动又

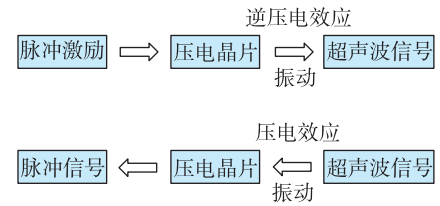


图3 压电传感器工作原理
Fig.3 Working principle of piezoelectric sensor

会反作用于压电陶瓷,使其产生正压电效应,引起压电陶瓷自身的电阻抗发生变化。通过采集并分析压电陶瓷的电阻抗信号,即可获得结合部机械阻抗的变化信息^[34-37]。

2000年,王丹生等^[38]以压电导纳实部和虚部变化量的均方根为评价指标,研究了钢架结构的螺栓连接状态变化。研究结果表明,以压电导纳实部信息为评价指标能够较好地识别结构连接状态的变化。2016年,Yin等^[39]使用智能压电陶瓷垫片设计了一种新型螺栓预紧力检测传感器,根据提取的波能量信号峰值变化与螺栓预紧力的近似线性关系,实现了螺栓连接状态的智能监测。

值得注意的是螺栓连接状态的松动对结构动力学响应的影响主要体现在高频谱段,因此测试过程中需要给压电陶瓷施加高频激励(一般不能低于20Hz)。同时由于螺栓连接结构在高频谱段存在建模困难的问题,目前大多通过对比结构连接状态变化前后的电阻抗谱来确定其状态变化情况。

由于压电阻抗技术设备昂贵,压电材料难以应用于曲面结构等特点,该方法的应用范围受到了一定的限制,主要集中在航空、航天、机床、核能等高端领域。

基于超声导波的螺栓连接状态测试技术

超声波检测技术开始于20世纪30年代,发展到今天该技术已经成为无损检测技术中研究和应用最为

广泛的技术之一。超声波用于无损检测具有以下优点：

(1)全面性。检测范围广,适用于金属、非金属和复合材料。

(2)高灵敏度性。穿透力强,检测深度大,能够准确定位结构损伤。

(3)无破坏性。超声作用应力小,不损伤被测结构。

1975年,德冈辰雄^[40]基于有限变形弹性理论,推导出了超声横波沿主应力方向的2个横波分量的传播速度差与主应力差的关系式,奠定了现代声弹性应力测量的基础。

1 基于声弹性效应法的连接状态监测技术

声弹性效应是超声波波速随材料内部应力状态变化而发生变化的现象。而基于声弹性效应的监测技术就是利用超声波声弹性效应间接测量螺栓轴向预紧力^[41-42]。孙国峰^[43]证明了螺栓在弹性变形范围内,轴向所承受的应力和超声波的飞行时间近似呈一阶线性关系。其具体方法如图4所示,在螺栓头端部施加轴向的窄脉冲超声波束,检测超声回波信号和超声波传播的时间,从而确定螺栓中超声波的传播速度。最后,根据波速与应力的线性关系计算出螺栓的受力状态。

目前基于声弹性效应的监测方法主要有3种研究方向^[44](1)利用超声波在螺栓松弛状态及拧紧状态下的飞行时间差来确定螺栓的受力状态。国际上,Yasui等^[45]采用飞行时间差法,准确测得了40kN以内的螺栓预紧力,并将螺栓预紧力与飞行时间差之间的线性误差控制在0.2%以内。2010年,Doyle等^[46]通过信号的相位信息提取时延,检测空间卫星结构的螺栓连接状态。(2)利用纵波和横波声弹性常数不同的特点,通过纵波和横波的速度比值法来确定螺栓的预紧力。2000年,Yasui^[47]和Chaki等^[48]先后采用该方法测得了螺栓预紧力。(3)利用

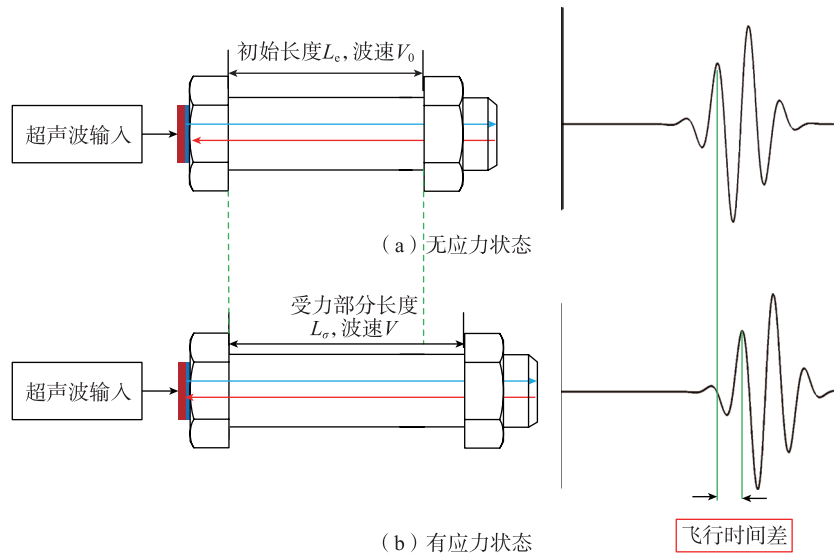


图4 无应力状态与有应力状态的螺栓模型
Fig.4 Model of stressed bolt and unstressed bolt

螺栓中声学共振频率与应力之间的线性函数关系,判断螺栓受力状态的变化。1977年,Heyman等^[49]使用透射振荡器超声分光计与反射振荡器超声分光计研究了螺栓所受应力与共振频率之间的关系,结果发现了两者之间的线性函数关系。1984年,Joshi等^[50]使用了载波相位检测技术跟踪螺栓中声学共振频率的偏移,测量分辨率约为60Hz/MPa。

基于声弹性效应的监测技术能够快速实现无损检测,而且其测量目标是螺栓内部的轴向应力,不需要像扭矩法一样考虑摩擦系数离散性的影响,因而精度较高。但该技术需要专用的精密仪器才能识别出超声波传播过程中的飞行时间差,因此成本很高;且超声导波易受工业现场噪声的影响,存在多模态、频散等特性,使得信号处理困难,在实际工业应用中受到一定限制。

2 基于超声波能量法的连接状态监测技术

超声波在固体、液体和气体中传播时声阻抗差异巨大,研究表明,三者之间的声特性阻抗之比约为1:3000:80000^[51]。当超声由固体传递到固体时,声阻抗差很小,其声

强透射系数接近100%;而由固体传递到气体时,声阻抗差很大,其声强透射系数几乎为0,全部反射。如图5所示,在螺栓连接结构中,由于结合面的实际接触面积远小于理论接触面积,而超声波能量只能通过实际接触面进行传播,因此超声波在透过连接界面传递时会产生能量耗散。

根据GW接触模型可知,结合面的实际接触面积 A_r 与螺栓预紧力 F 之间存在着必然的联系,在轻载荷小变形时表现出线性关系:

$$A_r = \alpha F \quad (1)$$

因此,可以通过分析透过螺栓连接结合面的超声波能量 Q 来获得结构的连接状态信息。

$$Q = G(A_r) \quad (2)$$

式中, $G(A_r)$ 为 A_r 的线性函数。

2017年,武汉科技大学的王涛教授等^[52]就基于粗糙面接触理论建

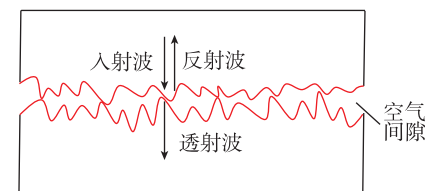


图5 实际粗糙表面的接触情况
Fig.5 Actual rough interface contact

立了有限元模型,模拟超声波透过连接界面的传播过程,分析了响应信号幅值与螺栓预紧力之间的关系,证明随着预紧力增加,结合面接触更加紧密,能量耗散减小,连接刚度增大。而在预紧力增加到一定程度之后,结合面接触面积很难继续增加,能量耗散趋于稳定,连接刚度增量变缓,此时该方法的检测灵敏度会明显降低。

该方法的关键技术问题是确定螺栓预紧力、实际接触面积以及透射导波能量三者之间的关系。由于该问题涉及到粗糙表面接触理论模型和超声导波理论等,要想通过理论推导研究该问题存在较大困难,研究人员通常通过有限元仿真和超声导波实验完成相关问题的研究工作。

基于 FBG 传感器的连接状态监测技术

光纤光栅(FBG)传感器因其尺寸小、灵敏度高、耐腐蚀、抗(电磁、噪声)干扰能力强等优点,在结构健康监测方面得到了广泛的应用^[53-55]。光纤光栅的结构如图6所示,通过紫外线激光或CO₂激光在纤芯上刻入按周期分布的空间相位光栅。由于包层和纤芯折射率的不同,入射光波受到筛选,特定波长的光会被反射回来。光纤布拉格光栅的谐振方程为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}A \quad (3)$$

式中, λ_B 为光纤中心波长; n_{eff} 为纤芯有效折射率; A 为光栅周期。

当光纤光栅受到外部环境的应力应变影响时,其中心波长会发生漂移,根据中心波长的变化即可判断应力应变状态。

$$\Delta\lambda_{B_g} = \lambda_B(1-P_e)\Delta\varepsilon = K\Delta\varepsilon \quad (4)$$

式中, P_e 为传感器的弹光系数; K 为应变灵敏度。

图7显示了一个典型的光纤光栅分布传感系统:不同反射波长的 n 个Bragg光栅沿单根光纤排列,分别放置于监测对象的 n 个不同监测部位,当这些部位的应力应变场发生

变化时,各个Bragg光栅反射回来的波长编码信号就携带了相应部位的应力应变场的变化信息,通过接收端的波长探测系统进行解码,将光信号转换成电信号传入计算机,并分析Bragg波长位移情况,即可获得应力应变场的变化情况。螺栓预紧力的变化会导致周围区域的应力应变场发生变化,将光纤光栅埋入螺栓连接结合部,即可实现结构连接状态的实时检测。

国际上,美国国家航空航天局大量使用光纤光栅传感网络,对航天飞行器的温度和结构应变进行实时监测^[56]。日本东京大学的Takeda等^[57]将光纤光栅用于复合材料制成的飞机机翼的健康监测。国内,陈志军等^[58]使用FBG传感器测量机械部件的应变值确定其不同的连接状态。黄永阔等^[59]研究并制备出了耐高温金属封装可再生光纤布拉格光栅传感器,并基于该传感器提出了高温法兰螺栓预紧力的测量方法。

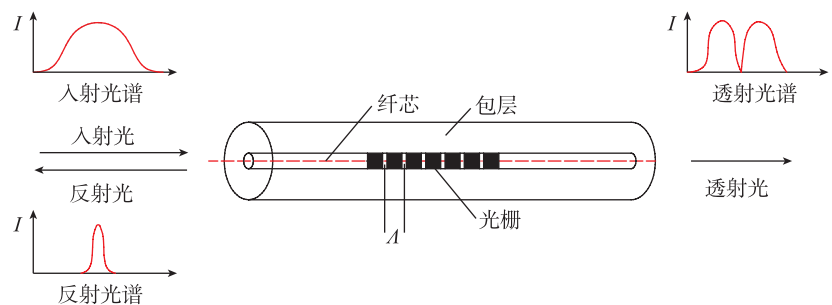


图6 光纤光栅结构示意图

Fig.6 Structural diagram of optical fiber Bragg grating

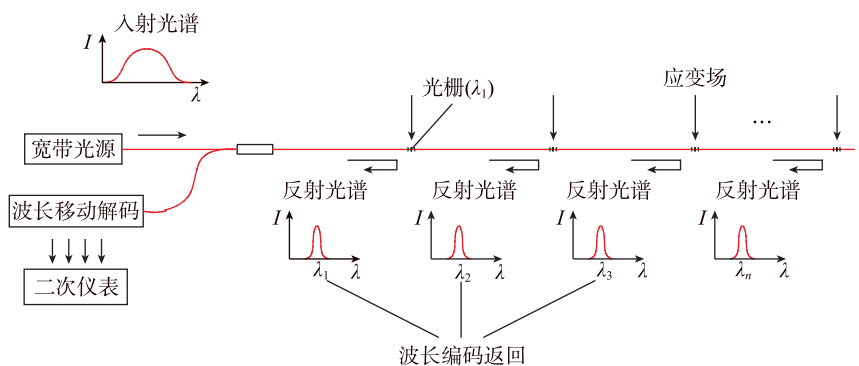


图7 FBG分布传感系统的原理图

Fig.7 Principle diagram of FBG distributed sensing system

光纤光栅传感器除了对应变敏感外,对温度也同样敏感,因此该方法在使用的过程中要解决交叉敏感问题,避免温度干扰。此外,虽然光栅光纤的材料为石英光纤,化学性质稳定不易老化,但随着使用时间的延长,其波长会发生少量漂移^[60]。如何进一步延长光纤光栅传感器的服役寿命是下一步的研究方向。

结论

螺栓连接结构状态测试技术涉及到非线性动力学、接触摩擦力学、传感器技术、信号处理技术和模式识别等多个领域的理论知识,是国内外的研究热点。针对螺栓连接状态测试的技术众多,本文仅对该领域中具有代表性的几种方法进行了综述。在众多方法中,基于振动分析的连接状态监测技术和基于超声导波的连接状态监测技术是目前发展较快的两个方向,本课题组对两个方向都展开了深入的研究,进行了大量的

理论研究和仿真试验工作。在振动分析研究方向,通过提取振动信号中的有量纲参数和无量纲参数,组成联合特征,并对其进行敏感度评估,获得能够反映连接状态的敏感特征参数。在超声导波研究方向,基于声弹性理论研制了一种智能螺栓。通过对智能螺栓的制备以及后续的标定、测试,验证了与同类方法相比具有较高的测量精度和稳定性,能够将预紧力误差控制在1%以内。在栓接结合部非线性动力学特性方面,提出并开发了一种基于梯度虚拟材料的栓接结合面连接参数表征模型,准确表征了结合面压力/刚度分布的不均匀性^[61]。

现有的测试技术还无法完全解决被测对象因服役环境复杂、工作载荷不稳定等因素带来的干扰信号的影响,目前还停留在实验室试验阶段,无法真正实现结构连接状态的实时监测和在线监测。因此,螺栓连接状态测试技术未来的发展方向主要是解决以下问题:

(1) 为完善理论基础,实现连接结构参数化建模,需要进一步研究螺栓连接结构的非线性动力学特性和结合面的微观接触特性。

(2) 提高现有技术的测试精度,发展更为先进的测试技术。

(3) 为去除信号中的噪声干扰等冗余信息,需要改进非线性激励技术和非线性信号采集、处理技术。

(4) 研究的最终目的是面向工程应用。为此,在试验过程中应发展多物理场耦合条件下的螺栓连接状态监测技术,更好的模拟服役环境。

参考文献

[1] 陈学前,杜强,冯加权.螺栓连接非线性振动特性研究[J].振动与冲击,2009,28(7):196-198.
CHEN Xueqian, DU Qiang, FENG Jiaquan. Study on nonlinear vibration characteristics of bolt joints[J]. Journal of

Vibration and Impact, 2009, 28(7): 196-198.
[2] BEARDS C F, WILLIAMS J L. The damping of structural vibration by rotational slip in joints[J]. Journal of Sound & Vibration, 1977, 53(3): 333-340.
[3] SAKAI T. Investigations of bolt loosening mechanisms: 1st report, on the bolts of transversely loaded joints[J]. Bulletin of JSME, 1978, 21(159): 1385-1390.
[4] PAI N G, HESS D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(4): 383-402.
[5] HESS D P, SUDHIRKASHYAP S V. Dynamic analysis of threaded fasteners subjected to axial vibration[J]. Journal of Sound & Vibration, 1996, 193(5): 1079-1090.
[6] 郝淑英,陈予恕,张琪昌.连接结构松动对系统非线性动力学特性的影响[J].天津大学学报,2001,34(4):452-454.
HAO Shuying, CHEN Yushu, ZHANG Qichang. Influence of loose connection structure on nonlinear dynamic characteristics of systems[J]. Journal of Tianjin University, 2001, 34(4): 452-454.
[7] 徐永波.输电塔法兰联接节点螺栓松动等效模型及风振响应分析[D].武汉:武汉理工大学,2007.
XU Yongbo. Equivalent model of bolt looseness of transmission tower flange joint and analysis of wind-induced vibration response[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
[8] AMES N M, LAUFFER J P, JEW M D, et al. Handbook on dynamics of jointed structures[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2009.
[9] 赵登峰,曾国英.振动环境中螺纹联结松动过程的研究[J].振动与冲击,2010,29(10):175-178.
ZHAO Dengfeng, ZENG Guoying. Research on the loosening process of threaded joint in vibration environment[J]. Vibration and Impact, 2010, 29(10): 175-178.
[10] 徐超,周帮友,刘信恩,等.机械螺栓连接状态监测和辨识方法研究进展[J].强度与环境,2009,36(2):28-36.
XU Chao, ZHOU Bangyou, LIU Xinen, et al. Research progress on monitoring and identification methods of mechanical bolt

connection status[J]. Strength and Environment, 2009, 36(2): 28-36.
[11] 杜飞,徐超.螺栓连接松动的导波监测技术综述[J].宇航总体技术,2018,2(4):13-23.
DU Fei, XU Chao. Review of guided wave monitoring technology for loose bolt connection[J]. General Aerospace Technology, 2008, 2(4): 13-23.
[12] KIM J, YOON J, KANG B, et al. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(5): 895-911.
[13] QIN Z, HAN Q, CHU F, et al. Bolt loosening at rotating joint interface and its influence on rotor dynamics[J]. Engineering Failure Analysis, 2016: 456-466.
[14] WILEMAN J, CHOUDHURY M, GREEN I, et al. Computation of member stiffness in bolted connections[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(4): 432-437.
[15] 张学良,王南山,温淑花,等.机械结合面切向接触阻尼能量耗散弹塑性分形模型[J].机械工程学报,2013,49(12):43-49.
ZHANG Xueliang, WANG Nanshan, WEN Shuhua, et al. Elastoplastic fractal model for tangential contact damping energy dissipation of machine joint interfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 43-49.
[16] 李如松.扭矩扳手的技术发展和应用[J].组合机床与自动化加工技术,1991(4):24-29.
LI Rusong. Technical development and application of torque wrench[J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 1991(4): 24-29.
[17] 苏滨生,刘春红.影响扭矩扳手准确性的因素分析[J].东方电机,2007(3):51-55.
SU Binsheng, LIU Chunhong. Analysis of factors influencing the accuracy of torque wrench[J]. Dongfang Motor, 2007(3): 51-55.
[18] 滕冠.高强度螺栓的紧固分析[J].装备制造技术,2009(4):163-165.
TENG Guan. Fastening analysis of high-strength bolts[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(4): 163-165.
[19] 张俊.基于声弹性原理的超声波螺栓紧固力测量技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.

- ZHANG Jun. Research on ultrasonic bolt preload measurement technology based on acoustic elasticity principle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [20] JAGLINSKI T, NIMITYONGSKUL A, SCHMITZ R, et al. Study of bolt load loss in bolted aluminum joints[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of The ASME, 2007, 129(1): 48–54.
- [21] LIANG D, YUAN S. Decision fusion system for bolted joint monitoring[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1–11.
- [22] 袁慎芳. 结构健康监控 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- YUAN Shenfang. Structural health monitoring [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [23] YUAN S, LAI X, ZHAO X, et al. Distributed structural health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 15(1): 1–8.
- [24] 刘卓乾. 航空发动机螺栓连接转子的振动特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- LIU Zhuoqian. Research on vibration characteristics of bolted rotor of aero-engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [25] 刘济科, 汤凯. 基于振动特性的损伤识别方法的研究进展 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2004, 43(6): 57–61.
- LIU Jike, TANG Kai. Research progress of damage identification method based on vibration characteristics[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 2004, 43(6): 57–61.
- [26] CACCESE V, MEWER R, VEL S S. Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 895–906.
- [27] NASSAR S A, YANG X. A mathematical model for vibration-induced loosening of preloaded threaded fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(2): 021009.
- [28] ZUCCA S, FIRrone C M. Nonlinear dynamics of mechanical systems with friction contacts: Coupled static and dynamic multi-harmonic balance method and multiple solutions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(3): 916–926.
- [29] BOGRAD S, REUSS P, SCHMIDT A, et al. Modeling the dynamics of mechanical joints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(8): 2801–2826.
- [30] 王术新, 姜哲. 基于结构振动损伤识别技术的研究现状及进展 [J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 99–102.
- WANG Shuxin, JIANG Zhe. Research status and progress of damage identification technology based on structural vibration[J]. Vibration and Shock, 2004, 23(4): 99–102.
- [31] MONTALVAO D, MAIA N M M, RIBEIRO A M R. A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006, 38(4): 295–324.
- [32] 陈祥芹. 振动信号多元统计分析特征提取及传动系统关键部件故障诊断应用 [D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- CHEN Xiangqin. Feature extraction of multivariate statistical analysis of vibration signal and application of fault diagnosis of key components of transmission system[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014.
- [33] 雷亚国. 混合智能技术及其在故障诊断中的应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- LEI Yaguo. Hybrid intelligence technology and its application in fault diagnosis[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007.
- [34] PARK G, SOHN H, FARRAR C R, et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward[J]. The Shock and Vibration Digest, 2003, 35(6): 451–463.
- [35] TSENG K K H, NAIDU A S K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11(3): 317–329.
- [36] ANNAMDAS V G, RADHIKA M A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24(9): 1021–1042.
- [37] TAO W, SHAO P E N G L, JUNHUA S, et al. Health monitoring of bolted joints using the time reversal method and piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(2): 025010.
- [38] 王丹生, 朱宏平, 鲁晶晶, 等. 基于压电导纳的钢框架螺栓松动检测试验研究 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(10): 157–160.
- WANG Dansheng, ZHU Hongping, LU Jingjing, et al. Experimental study on bolt looseness detection of steel frame based on piezoelectric admittance[J]. Vibration and shock, 2007, 26(10): 157–160.
- [39] YIN H, WANG T, YANG D, et al. A smart washer for bolt looseness monitoring based on piezoelectric active sensing method[J]. Applied Sciences, 2016, 6(11): 320.
- [40] 德冈辰雄. 理性连续介质力学入门 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- DEGAN G Chenxiong. Introduction to rational continuum mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [41] HIRAO M, OGI H, YASUI H, et al. Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer[J]. Ndt & E International, 2001, 34(3): 179–183.
- [42] JHANG K, QUAN H H, HA J, et al. Ultrasonic estimation of clamping force in high-tension bolts[J]. Key Engineering Materials, 2006, 321–323: 240–243.
- [43] 孙国峰. 基于超声波技术的螺栓紧固轴力测量应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- SUN Guofeng. Application research of bolt axial preload measurement based on ultrasonic technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [44] WANG T, SONG G, LIU S, et al. Review of bolted connection monitoring[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 25(2): 1–8.
- [45] YASUI H, TANAKA H, FUJII I, et al. Acoustoelastic axial stress measurement of short bolts with longitudinal and transverse waves[M]// Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, London: Springer, 1999.
- [46] DOYLE D, ZAGRAI A, ARRI T B, et al. Damage detection in bolted space structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(3): 251–264.
- [47] YASUI H, KAWASHIMA K.

Acoustoelastic measurement of bolt axial load with hypothetical velocity ratio method[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part A, 2000, 66(642): 390-396.

[48] CHAKI S, CORNELOUP G, LILLAMAND I, et al. Combination of Longitudinal and transverse ultrasonic waves for in situ control of the tightening of bolts[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(3): 383-390.

[49] HEYMAN J S. A CW ultrasonic bolt-strain monitor[J]. Experimental Mechanics, 1977, 17(5): 183-187.

[50] JOSHI S G, PATHARE R G. Ultrasonic instrument for measuring bolt stress[J]. Ultrasonics, 1984, 22(6): 261-269.

[51] 李以善, 汪立新. 无损检测员: 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

LI Yishan, WANG Lixin. Nondestructive testing: ultrasonic testing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.

[52] 王涛, 刘佳来, 李友荣, 等. 基于结构界面波能损耗的螺栓联接结构健康监测[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 54-57.

WANG Tao, LIU Jialai, LI Yourong, et al. Health monitoring of bolted joint structure based on wave energy loss at structural interface [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(6):

54-57.

[53] OTHONOS A, KALLI K, KOHNKE G E. Fiber bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[J]. Physics Today, 2000, 53(5): 61.

[54] KHOMENKO A, KORICHO E G, HAQ M, et al. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2016, 51(2): 101-108.

[55] HO S C, LI W, WANG B, et al. A load measuring anchor plate for rock bolt using fiber optic sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(5): 057003.

[56] ECKE W, LATKA I, WILLSCH R, et al. Optical fiber grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring[J]. Proceeding SPIE, 2000, 4185: 888-891.

[57] TAKEDA S, AOKI Y, ISHIKAWA T, et al. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test[J]. Composite Structures, 2007, 79: 133-139.

[58] 陈志军, 潘国锋, 丁伯成, 等. FBG 传感器在机械静态连接状态检测技术研究中的应用[J]. 机械设计, 2014(10): 69-71.

CHEN Zhijun, PAN Guofeng, DING Bochong, et al. Application of FBG sensor in research of mechanical static connection state

detection technology[J]. Mechanical Design, 2014(10): 69-71.

[59] 黄永阔. 基于光纤光栅的高温法兰螺栓紧固力测量技术研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.

HUANG Yongkuo. Research on measurement technology of high temperature flange bolt fastening force based on fiber Bragg grating[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.

[60] 李鹏飞, 万方义, 崔卫民, 等. FBG 传感器在飞行器结构健康监测中的可行性研究[J]. 机械强度, 2011, 33(4): 624-628.

LI Pengfei, WAN Fangyi, CUI Weimin, et al. Feasibility study of FBG sensor in aircraft structural health monitoring[J]. Mechanical Strength, 2011, 33(4): 624-628.

[61] 孙清超, 黄庆涛, 孙志勇, 等. 基于梯度虚拟材料的栓接结合部连接参数表征[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 102-109.

SUN Qingchao, HUANG Qingtao, SUN Zhiyong, et al. Interface parameter identification of bolted connections based on gradient virtual material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 102-109.

通讯作者: 孙清超, 博士、副教授, 研究方向为高端紧固/装配和超高周疲劳损伤, E-mail: qingchao@dlut.edu.cn.

Research Status of Testing Technology for Bolted State of Mechanical Equipment

QI Yanhua, HUANG Qingtao, YUAN Bo, SUN Qingchao

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] Bolt connection is widely applied in aerospace structures. The bolted state of the structure is directly related to the safety and functionality of the equipment. The aircraft is faced with a variety of extreme environments such as vibration and impact in service, which will eventually lead to the phenomena of loose and slip of the bolted joints. Therefore, it is of great significance to monitor the connection state of the structure. This paper mainly reviews the research status and testing principle of bolt connection state testing technology. Firstly, the research status of bolted state mechanism is analyzed, which mainly includes the theory of joint surface microscopic characteristics and the theory of structural nonlinear dynamics. Then, the traditional direct measurement techniques of the bolted state are introduced, and its measurement accuracy and application limitation are analyzed. Finally, the principles of various types of the bolted state testing technologies based on response signals are reviewed, including vibration signal analysis method, electromechanical impedance method, acoustic elastic effect method, ultrasonic energy method and FBG sensor method. Their advantages, disadvantages and application range of the method are analyzed and the development direction is pointed out.

Keywords: Bolted joints; Structural health monitoring; Bolt preload; Nonlinear systems dynamics; Structural vibration

(责编 铃兰)