

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.018

# 基于压电阻抗技术的螺栓松动监测试验研究

宋琛琛<sup>1</sup>, 谢丽宇<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学 工学部, 日本 仙台 982-8577)

**摘要:** 为了实现对螺栓松紧状态的监测, 设计一种黏贴有 PZT 材料的特制垫片。设定形状不同的垫片, 并与直接将 PZT 片黏贴在螺栓附近结构表面的方法进行对比试验。研究螺栓松紧程度不同的情况下各种监测方法的 PZT 谐振频率、幅值和损伤系数等频谱特性参数的变化。试验结果表明: 将 PZT 片粘贴在翘垫片上的方法中 PZT 片的 RMSD 值随螺栓扭矩增大, 有明显减小的趋势。且从 4 个螺栓相互干扰的试验结果来看, 使用翘垫片的方法感应范围集中于垫片的螺栓与主体结构连接部分, 非常有效地隔离了临近螺栓松动对信号的干扰, 对螺栓松动的敏感性更高。

**关键词:** 交通工程; 螺栓松动监测; 阻抗分析; 压电材料

中图分类号: U491.5<sup>+9</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 04-0113-07

## Experimental Study of Bolt Loosening Detection Based on Piezoelectric Impedance Technology

SONG Chen-chen<sup>1</sup>, XIE Li-yu<sup>1</sup>, XUE Song-tao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

**Abstract:** In order to monitor the tightness of bolts, a kind of special washer with PZT piece is designed. The PZT pieces are attached to different shaped washers or directly attached to the structural surface near the bolts for the contrast experiments between them. The variation of the spectrum characteristic parameters including the resonant frequency, the amplitude, and the damage coefficient of the PZT using various monitoring methods under different degrees of bolt tightness are studied. The experimental result shows that the RMSD value of PZT piece in the method of attaching to the bending washer obviously decreases with the increase of the bolt torque. The experimental result of mutual interference of 4 bolts shows that the sensing range of using bending washer is concentrated in the connecting part of the bolt and the main structure, it effectively isolates the interference of the loosening of adjacent bolts on the signal, and it has the higher sensitivity to the bolt loosening.

**Key words:** traffic engineering; bolt loosening monitoring; impedance analysis; piezoelectric material

## 0 引言

由于螺栓紧固件能拆卸并能够重复使用的重要优势, 其在轨道交通中得到了大量的应用。然而, 螺栓紧固件很容易发生自松动现象, 自从工业革命以来, 螺栓自松动一直没有得到很好的解决。尽管在最近的 150 年间, 针对螺栓松动的检测和监测提

出了大量的解决方案, 但是能够以较低人工、经济成本有效地检测出螺栓松动的解决方案还有待进一步的探索。

直接由螺栓松动导致的工程事故在土木工程或工业领域中时有发生, 而其中不乏一些灾难性的事故。2012 年 12 月 2 日, 日本山梨县境内的中央高速公路的笹子隧道发生部分顶板坍塌, 隧道顶部排列

收稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51208377)

作者简介: 宋琛琛 (1989-), 男, 山西高平人, 博士. (chenchen\_song@126.com)

的长5 m、宽1.2 m、厚8~9 cm的混凝土顶板约100块(每块重约1.2 t)突然掉下,使得正在行驶的3辆车被埋,共有9人死亡。隧道顶部固定在混凝土里的锚定螺栓由于腐蚀等原因发生破坏,而隧道维护运营方没有采用合理有效的螺栓松动监测手段早发现隐患,因而造成了此次事故<sup>[1]</sup>。

对螺栓松动的日常检查方法目前可分为两种,目视检查方法以及打音检查方法。所谓目视,就是用肉眼观察金属部件有所变化,变色;所谓打音检查就是用锤子敲打金属连接部位,从声音上判断是否有松弛或别的异常。当然,打音检查的效果比目视检查要好。但无论采用哪种方法,其都具有人工成本高的缺点,且对巡检人员的个人经验、责任心和工作态度等依赖性较大。

此外,还可以通过对螺栓的状态进行监测,安装可靠有效的智能监测装置,及时发现螺栓连接是否松动,这对保障结构安全有着重要的意义。

压电材料及压电传感技术的日趋成熟和多样,使得压电阻抗技术在机械工程和土木工程无损健康监测(NDE, nondestructive evaluation technique)中体现出了巨大的潜力和市场<sup>[1]</sup>。基于压电元件的压电阻抗方法(EMI, electro-mechanical impedance)将压电材料的特性与波动理论相结合,应用动态阻抗信息为结构的健康诊断提供依据。因其工作的频段较高,对结构诸如裂纹和螺栓松动等微小缺陷较为敏感,同时压电元件具有成本低廉、尺寸小、激励电压低和对复杂结构的适应性强等特点,该技术在结构健康监测领域具有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

## 1 压电阻抗原理

压电阻抗技术在结构损伤诊断和监测应用中的基本原理是:将压电元件粘附于结构表面或埋置于结构内部后,施加高频交流电压激励压电元件,采用阻抗分析方法获取耦合结构的阻抗函数,根据耦合结构的阻抗谱变化从而间接地判断结构的损伤状况。Liang等<sup>[3]</sup>最早提出了将压电阻抗法应用于结构健康监测的理论依据,从理论层面上分析了压电材料与结构系统构成的单自由度弹簧-质量-阻尼系统(SMD)模型,如图1所示。在仅考虑轴向伸缩变形的情况下,压电元件与结构的相互作用模型可简化为一个质量-刚度-阻尼系统,压电元件可被看作为一个狭长的杆件,一端被固定,另一端与简化为单自由度系统的基体结构相连,在施加的可变电场作用下做轴向振动。

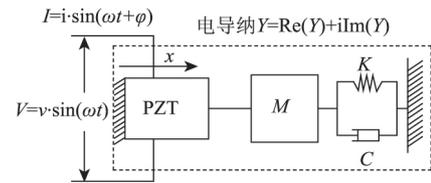


图1 压电材料与结构系统构成的单自由度弹簧-质量-阻尼系统(SMD)

Fig. 1 Single degree of freedom spring-mass-damping system (SMD) for piezoelectric material and structural system

Liang等<sup>[3]</sup>得出了压电元件机械阻抗与结构机械阻抗的关系,理论推导出压电元件驱动的一维SMD系统的耦合电导纳(耦合阻抗的倒数)表达式:

$$Y = \frac{1}{Z_{\omega}} = i\omega \frac{w_A l_A}{h_A} [\varepsilon_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} d_{3x}^2 Y_{xx}^E], \quad (1)$$

式中, $i$ 为虚数单位; $\omega$ 为所加激励的角频率; $w_A$ ,  $l_A$ ,  $h_A$ 分别为压电元件的宽度、长度和厚度; $\varepsilon_{33}^T$ 为压电元件在零应力时的复介电常数; $\delta$ 为压电元件的电磁损失系数; $d_{3x}$ 为零应力 $x$ 方向下的压电耦合系数; $Y_{xx}^E$ 为压电元件在零电场时 $x$ 方向的复杨氏模量; $Z_A$ 为压电元件的机械阻抗; $Z_B$ 为结构的机械阻抗; $Z_{\omega}$ 为压电元件耦合阻抗(能够通过仪器在压电元件上测得)。

从式(1)可以看出,第一项为自由压电元件的电容导纳,是导纳随频率变化的基线。第二项包含了压电元件自身的机械阻抗信息和外部结构的机械阻抗信息。对已经确定的压电系统来说,压电元件自身的机械阻抗值为常数,外部结构的机械阻抗值则是唯一影响第二项的参数,从而决定压电系统耦合电导纳 $Y$ 的变化。若结构发生局部的损伤破坏、螺栓松动等状况,造成外部结构机械阻抗的变化,则可通过压电系统耦合电导纳 $Y$ 反映出来。

## 2 基于压电阻抗技术的螺栓松动试验研究

随着压电阻抗技术的发展,如今它在很多土木工程领域均开展了应用研究。2001年, Park等<sup>[4]</sup>用压电阻抗原理对管线结构的螺栓连接进行了监测试验。试验通过对黏贴于管道表面的压电传感元件进行实时高频激励,获取相应导纳值进行识别损伤。

压电材料与主体结构之间连接方式有嵌入式和粘贴式两种。试验经验可知压电材料粘贴方法在实际应用中,存在以下问题:

(1) 压电陶瓷片脆薄、易断裂,要求操作人员具有足够的耐心,有一定的贴片经验,在施工现场

进行粘贴难度大,精度低;

(2) 压电陶瓷片贴好后,并不能代表其可直接投入试验中,还需要对其进行测试,若测试结果不对,还需重新贴片,耽误时间影响效率;

(3) 一旦压电陶瓷片贴于主体结构上,后期使用过程中如果发生破坏、老化,更换不便;

(4) 压电陶瓷片的贴片过程繁琐,贴片式的连接方式在试验中重复性的动作多,压电陶瓷片的数量要求相对较多,现场安装人工成本较大。

综上所述,压电材料粘贴式的连接方式不适用于实际应用。本文提出一种新的方法来代替传统的粘贴式使用方法。以上述粘贴的缺陷为出发点,设计一种特制的垫片,将压电陶瓷传感元件粘贴在垫片上。使用时,将此特制垫片与螺栓安装在一起,进而实现对螺栓松动监测。此方法的优点在于,垫片制作和压电陶瓷的粘贴与封装可以实现工厂流水化制作,施工现场只需要安装即可。拆卸的便捷性,使得现场适用性大大提升。

本试验目的在于证明通过特制垫片方式监测螺栓松动的可行性,并对比不同粘贴方式下压电材料对螺栓松动的敏感性差异。

## 2.1 试验工况设计

假设影响螺栓连接机械阻抗的因素有3个:①随扭矩增大,螺栓附近主体结构变形;②随扭矩增大,螺栓与主体结构接触面紧密程度变化<sup>[5]</sup>;③随扭矩增大,螺栓与主体结构之间的垫片变形。

为了验证不同因素对识别结果的影响程度,以获取最佳辨识效果,设置不同的粘贴方式。对于因素①,采用传统的直接粘贴法,将图2中左侧PZT片直接粘贴在每个螺栓旁的铝板上,使其对主体结构变形更加敏感;对于因素②,使用1mm厚钢片制作平垫片,将PZT片粘贴在平垫片的悬臂端,如图2右侧所示,使压电片不受主体结构变形影响;对于因素③,使用1mm厚钢片制作翘垫片,将PZT片粘贴在翘垫片悬臂端上,如图2中间所示,相对于平垫片,垫片翘曲会增大垫片平面外刚度,可以有效减小垫片变形。通过对比平垫片与翘垫片的辨识效果,可以分析出垫片变形对辨识结构的影响。

试验台设计分两部分:

### (1) 单个螺栓松动试验工况

单个螺栓试验台,如图3所示,使用两个相反倒置的槽钢作为支座,用两个螺栓将两块4mm厚铝板固定在支座上,以M12螺栓A为研究对象。

试验工况分3种情况:①不使用垫片,直接将

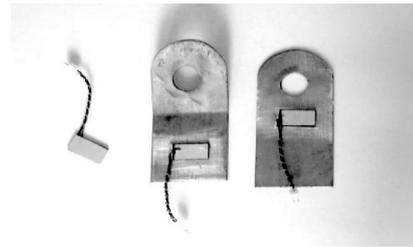


图2 垫片形状

Fig. 2 Shapes of washers

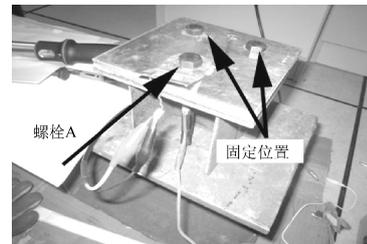


图3 单个螺栓松动试验

Fig. 3 Experiment of single bolt loosening

PZT片粘贴在铝板上;②使用平垫片,将PZT片粘贴在垫片上;③使用翘垫片,将PZT片粘贴在垫片悬臂端上。

如图3所示,以螺栓A为研究对象,分别在不加垫片、使用平垫片和使用翘垫片的情况下,对螺栓A施加扭矩。以60N·m为紧固状态,并以此时的PZT片阻抗谱为基线。每松动10N·m进行一次测量,分别得到不同松动程度下的PZT阻抗谱曲线。

### (2) 螺栓群松动试验工况

螺栓群试验台,如图4所示,使用两个槽钢作为支座,用左右共4个螺栓将两块4mm厚铝板固定在槽钢支座上,M12螺栓1,2,3,4为研究对象。

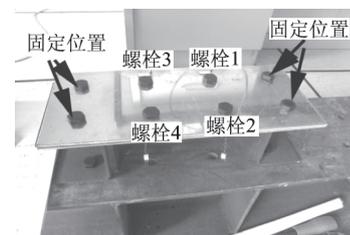


图4 多个螺栓松动试验

Fig. 4 Experiment of multiple bolts loosening

试验工况分两种情况:①不使用垫片,直接将PZT片粘贴在铝板上;②使用翘垫片,将PZT片粘贴在垫片上。

如图4所示,螺栓2,3,4均处于60N·m紧固状态不变,仅松动螺栓1。螺栓1从60N·m开始,每松动10N·m,即对螺栓1,2,3,4均进行

一次阻抗测量, 获得螺栓 1 不同松动情况下, 4 个螺栓分别的阻抗谱曲线, 用以研究临近螺栓间信号相互干扰的情况。

垫片尺寸如图 5 所示, 垫片安装位置及 PZT 传感器粘贴位置如图 6 所示。PZT 直接粘贴或使用平垫片时, PZT 粘贴位置距螺栓中心 1.6 cm 以上, 保证扭矩扳手的正常工作空间如图 6 (a)、(b) 所示。使用翘垫片时, 将 PZT 粘贴于垫片翘起端, 如图 6 (c) 所示。

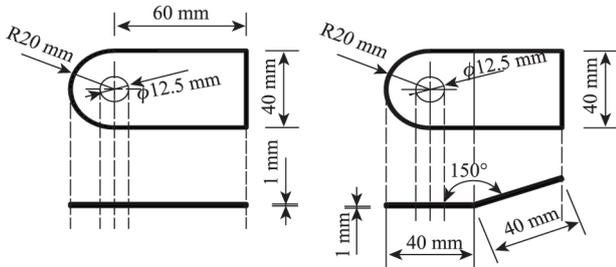
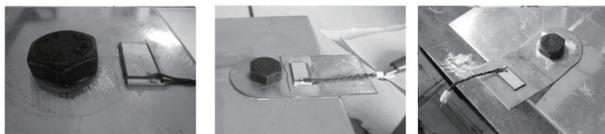


图 5 垫片尺寸

Fig. 5 Dimensions of washers



(a) 不使用垫片 (b) 使用平垫片 (c) 使用翘垫片

图 6 垫片安装位置及 PZT 片黏贴位置

Fig. 6 Positions of washers and PZT pieces

## 2.2 压电元件的尺寸选择

如何选择压电元件的尺寸大小, 与被监测构件的尺寸大小、结构形式有关, 也直接影响到其有效监测范围、所需的驱动激励电压。由前人的试验经验可知压电元件尺寸应遵循以下两个原则: ①为了尽可能的减小 PZT 本身对结构的影响, 应尽量采用尺寸厚度较小的 PZT 片<sup>[6]</sup>; ②厚度为 1 mm 的 PZT 效果较好, 容易激振<sup>[6]</sup>。故本试验采用 PZT-5 压电材料型号, 尺寸为 200 mm × 100 mm × 1 mm。PZT-5 材料具有高机电耦合系数, 适宜介电常数、较高的灵敏度, 具有较高的机电转换效率和灵敏度, 电极布置方式为单面双极型, 即在压电陶瓷片 PZT 的下表面通过镀银将电极翻转至上表面, 通过绝缘材料与上表面的电极分开, 在单面施加电压, 从而避免使用铜箔而导致结合面状况的不一致。

## 2.3 粘结剂的选择

一般而言, 要求粘结剂的杨氏模量尽量与压电传感材料本身相近, 这样能够起到最好的激振和振

动信号收集的效果。Ong 等<sup>[7]</sup>在对 PZT 的粘结材料的研究中发现, 粘结材料存在的剪力滞后效应是影响阻抗识别的一个重要因素。故应采用模量较高的粘结剂, 以减小其剪力滞后效应。

本试验考虑到取用方便和粘贴工艺简单的原则, 采用氰基丙烯酸酯粘合剂, 即常用的 502 胶水。这种粘合剂使用时无需加热, 在室温下可以瞬间固化, 拉伸剪切强度可以达到 10 MPa 以上。因为处于初始试验阶段, 故未考虑温度、湿度等因素对粘合剂性能的影响, 也未考虑粘合剂的耐久性问题。

## 2.4 数据采集方法

阻抗测量一般采用美国某公司生产的精密阻抗分析仪, 如图 7 所示。该仪器通过输入电压与通过电阻器的电流之比得到被测试器件的阻抗值, 通过 16092A 夹具与 PZT 片连接。

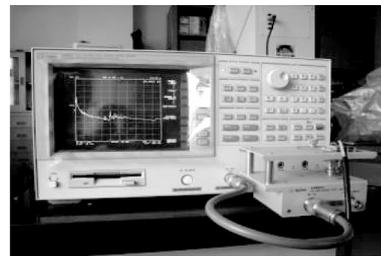


图 7 安捷伦阻抗分析仪

Fig. 7 Agilent impedance analyzer

## 2.5 扫描频率选取原则

为了能感应结构的刚度和阻尼的微小变化, 要求压电元件激励的波长较短, 所以选择的激励频率较高, 通常在 30 ~ 500 kHz。频率过低对结构的微小损伤将不敏感, 而频率过高则会导致 PZT 对温度和粘结层等边界条件过于敏感, 从而影响对损伤信息的判断<sup>[2]</sup>。

经反复试验, 发现频率低于 50 kHz 的部分, 阻抗值不稳定, 同种工况下数值漂移较大。频率高于 1 000 kHz 部分, 不同工况下阻抗值变化无明显规律性。从 50 ~ 1 000 kHz 的频率 - 阻抗曲线可以看出, 阻抗峰值和不同工况下阻抗变化主要集中于 50 ~ 500 kHz, 故本试验最终采用扫描频率为 50 ~ 500 kHz。试验所采用的阻抗分析仪能够提供最大采样点数为 801 个, 为了获取更详实的数据, 试验采用设备最大采样点数进行数据采样。

## 2.6 数据处理方法

通过阻抗分析设备, 可以同时得到压电导纳值的实部和虚部。导纳值实部对结构的完整性更为敏感, 所以在结构损伤识别中通常用压电阻抗的实部

信息来判断结构的健康状况。而导纳值虚部对温度变化和粘结层特性比较敏感,实际应用中可用于分析压电传感元件本身和粘结层是否破坏<sup>[8]</sup>。

频谱分析最直观简单的方法即为导纳频率谱谐振频率偏移、幅值变化、斜率变化等。已有的很多试验<sup>[6,9]</sup>研究都首先采用了这种方法,并且证实了谐振频率、幅值等频谱特性确实会因被监测结构的损伤发生偏移和变化。

仅使用谐振频率偏移、幅值变化等方式,还难以对被监测结构进行精确的定量分析。由于试件及试验其他条件也不可能完全一致,谐振频率受试验条件干扰也会发生较大变动,故引入了损伤系数的概念<sup>[8,10]</sup>。利用损伤系数可以提高压电传感器对损伤进行识别定位的灵敏性,而且不需要预先知道结构模态参数的信息。本试验采用最常用的损伤系数均方根值 RMSD (root mean square deviation) 对数据进行处理。

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{[\text{Re}_1(Y_k) - \text{Re}_2(Y_k)]^2}{[\text{Re}_1(Y_k)]^2}}, \quad (2)$$

式中,  $\text{Re}_1(Y_k)$  为螺栓无松动时的导纳实部;  $\text{Re}_2(Y_k)$  为螺栓出现一定程度松动时的导纳实部;  $k$  为第  $k$  个扫描频率点;  $N$  为扫描点的个数。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 单个螺栓试验

分别在不安装垫片、使用平垫片和使用翘垫片的情况下,测得 PZT 片的阻抗谱如图 8 所示。图中将每种情况, 0, 30, 60 N·m 下阻抗谱叠加进行对比。

从图中可以看出,相对于 60 N·m 时的阻抗谱,螺栓扭矩越小,阻抗谱变化越大。从图中也可以看出,频率 200~300 kHz 段的频谱变化最为明显。因此,对 200~300 kHz 段频谱放大查看,如图 9 所示。

采用式(2)所示损伤系数均方根值 RMSD 对数据进行处理,如图 10 所示。从图中可以看出,无垫片情况下总体上表现出随扭矩增加,RMSD 值减小,但是趋势不明显,不同扭矩间数值相差不大,难以准确判断螺栓松动程度。使用平垫片和翘垫片的情况下,均呈现明显的随扭矩增大,RMSD 值减小的趋势,且数值相差明显。但是对于平垫片,随扭矩增大 RMSD 值变化趋势并非绝对一致,在扭矩为 30 N·m 时出现了异常点。分析认为,使用平垫片时,垫片与主体结构有较大接触面积,使得垫片振动环境相对复杂。然而压电材料对微小变化敏感

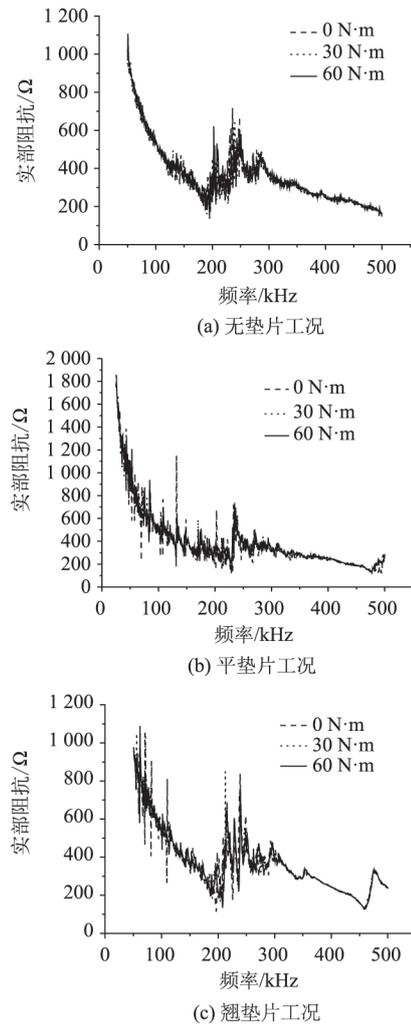


图8 PZT片阻抗实部频率范围50~500kHz

Fig. 8 Impedance real part of PZT pieces (frequency range: 50 ~ 500 kHz)

的特性,因而相对翘垫片更容易出现异常点,且平垫片平面外抗弯刚度较小,随扭矩增大,容易产生平面外变形,对信号造成不良影响。

二者之间使用翘垫片的效果更好,扭矩-RMSD折线斜率大于使用平垫片的情况,且不同扭矩间的RMSD数值差也大于使用平垫片的情况。

#### 3.2 4个螺栓试验

4个螺栓的试验主要用于研究临近螺栓间的相互干扰情况。螺栓1在不同松动情况下,4个螺栓的RMSD值的情况如图11~图14所示。

对比无垫片情况下的4个螺栓的RMSD值曲线,可以发现:不使用垫片的情况下,随着螺栓1扭矩增大,螺栓1的RMSD值呈明显下降趋势,但同时对于螺栓2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>的RMSD值造成了较大的干扰,不利于对螺栓松动情况的准确判断。

对比使用翘垫片情况下的4个螺栓的RMSD值

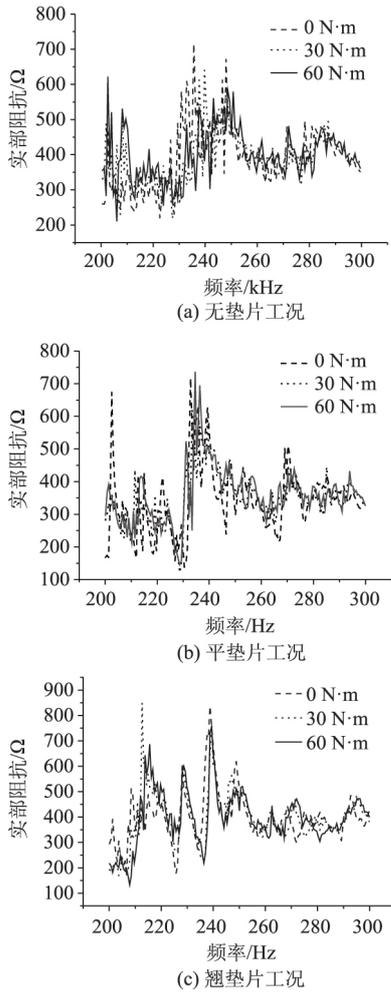


图9 PZT片阻抗实部 (频率范围200~300 kHz)  
Fig. 9 Impedance real part of PZT pieces  
(frequency range: 200 – 300 kHz)

曲线,可以发现: 使用翘垫片的情况下,随着螺栓1 扭矩增大,螺栓1 的RMSD值呈明显下降趋势,同时对螺栓2~4 的RMSD值基本不造成干扰,使用翘垫片可以有效隔离减小临近螺栓松动引起的信号干扰。

4 结论

综上所述,将PZT片粘贴在翘垫片上的方法随扭矩增大,RMSD值有明显的减小趋势。且从4个螺栓相互干扰的试验结果来看,使用翘垫片的方法感应范围集中于垫片的螺栓与主体结构连接部分,故受到的干扰也较小,非常有效地隔离了临近螺栓松动对信号的干扰,对螺栓松动的敏感性更高。

后期研究可以进一步在这种特制垫片上集成可以进行阻抗计算的AD5933模块和无线供能和传输模块<sup>[11]</sup>,而不需再使用体积较大的阻抗分析仪,更大

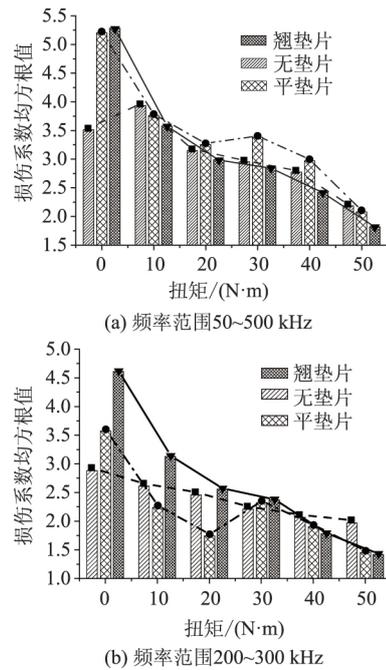


图10 阻抗实部RMSD值  
Fig. 10 RMSD value of impedance real part

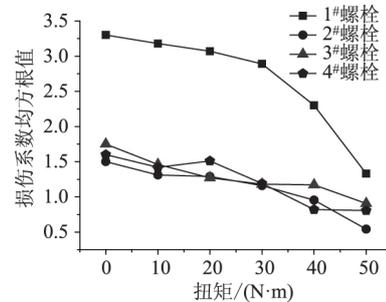


图11 1#~4#螺栓无垫片工况下RMSD值  
(频率范围50~500 kHz)  
Fig. 11 RMSD value of bolts No. 1 – 4 without washer  
(frequency range: 50 – 500 kHz)

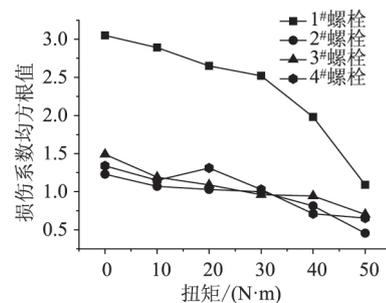


图12 1#~4#螺栓无垫片工况下RMSD值  
(频率范围200~300 kHz)  
Fig. 12 RMSD value of bolts No. 1 – 4 without washer  
(frequency range: 200 – 300 kHz)

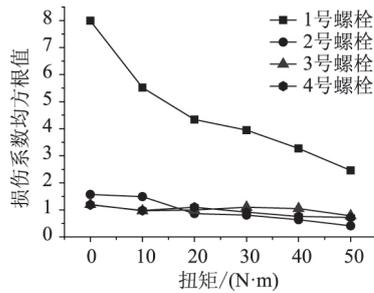


图13 1~4#螺栓翘垫片工况下RMSD值(频率范围50~500 kHz)

Fig. 13 RMSD value of the No. 1-4 bolt with bending washer (frequency range: 50-500 kHz)

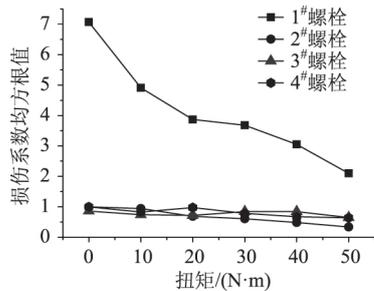


图14 1~4#螺栓翘垫片工况下RMSD值(频率范围200~300 kHz)

Fig. 14 RMSD value of bolts No. 1-4 using bending washer (frequency range: 200-300 kHz)

程度上提高这种方法的实用性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 宋琛琛, 谢丽宇, 薛松涛. 压电阻抗技术在结构健康监测中的应用研究 [J]. 结构工程师, 2014 (6): 67-76.  
SONG Chen-chen, XIE Li-yu, XUE Song-tao. Review of Piezoelectric Impedance-based Structural Health Monitoring [J]. Structure Engineers, 2014 (6): 67-76.
- [2] PARK G, SOHN H, FARRAR C R. Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path Forward [J]. Shock and Vibration Digest, 2003, 35 (6): 451-464.
- [3] LIANG C, SUN F P, RPGERS C A. Coupled Electro-mechanical Analysis of Adaptive Material Systems Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8 (4): 335-343.
- [4] PARK G, CUDNEY H H, INMAN D J. Feasibility of Using Impedance-based Damage Assessment for Pipeline Structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30 (10): 1463-1474.
- [5] 叶亮, 张有忱, 丁克勤, 等. 基于压电阻抗法的机械螺栓组松动监测及识别 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (18): 5172-5176.  
YE Liang, ZHANG You-chen, DING Ke-qin, et al. Monitoring and Localization of Loosened Bolts Based on E/M Impedance Method [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (18): 5172-5176.
- [6] 郭淳钦. 基于PZT的结构健康监测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.  
GUO Zun-qin. Research on Structure Health Monitoring Technology Based on PZT [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [7] ONG C W, YANG Y, WONG Y T, et al. Effects of Adhesive on the Electromechanical Response of A Piezoceramic Transducer Coupled Smart System [C] // 2002 International Conference on Smart Materials, Structures and Systems. Bangalore: SPIE, 2003: 241-247.
- [8] TAWIE R, LEE H K. Monitoring the Strength Development in Concrete by EMI Sensing Technique [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (9): 1746-1753.
- [9] 冯伟. 应用于结构健康监测的压电阻抗技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
FENG Wei. Study on Piezoelectric Impedance Technology for Structural Health Monitoring [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [10] PARK G, KABEYA K, CUDNEY H H, et al. Impedance-based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications [J]. JSME International Journal Series A: Solid Mechanics and Material Engineering, 1999, 42 (2): 249-258.
- [11] KIM J T, NGUYEN K D, PARK J H. Wireless Impedance Sensor Node and Interface Washer for Damage Monitoring in Structural Connections [J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15 (6): 871-885.