

# 基于阻抗法的多螺栓连接预紧扭矩检测试验研究<sup>\*</sup>

任凯 张子涵 杜飞 吴冠男 徐超<sup>†</sup>

(西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

**摘要** 目前小卫星快速响应要求不断提高,然而小卫星包含大量的螺栓连接部件,在小卫星装配完成后对其螺栓预紧扭矩进行快速检测,对于提高小卫星快速响应具有重要意义.为实现螺栓预紧扭矩快速检测,本文研究了基于机电阻抗法的两螺栓搭接梁中螺栓预紧扭矩检测方法.由于螺栓松动导致结构机械阻抗发生变化,通过机电耦合效应,会使贴于结构表面的压电陶瓷的电阻抗发生变化.根据上述原理,将压电陶瓷纤维复合材料 MFC 贴于搭接梁表面,利用阻抗分析仪测量 MFC 的阻抗实部的谱曲线,以此找到阻抗实部随扭矩变化而变化的敏感频段,在此频段内,通过比对松动后阻抗实部的均方根偏差与标准扭矩下的阻抗实部均方根偏差,判断螺栓松动状况.实验结果显示,随着搭接梁两个螺栓的松动甚至脱落,阻抗实部的谱曲线上的峰值大小和峰值频率会发生明显变化,对应的均方根偏差也逐渐增大.建立了包含标准状态下阻抗实部数值和已知工况的 RMSD 的数据库,通过对比未知工况的 RMSD,来判断螺栓松动状况,并用实验验证了该方法.因此,采用 MFC 作为压电敏感元件的机电阻抗法,能够有效地检测搭接梁两螺栓连接是否松动.

**关键词** 机电阻抗法, MFC, 搭接梁, 螺栓松动, 预紧扭矩检测

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-016

## 引言

随着微小卫星技术迅速发展,缩短发射准备时间的需求已经成了最直接的问题<sup>[1]</sup>,而这就需要我们能够快速及时地检测结构健康状况.卫星结构一般通过大量的螺栓连接的方式组装成为整体.由于装配过程中的操作不当、发射和再入过程中的动态激励等不可控原因,螺栓连接可能出现预紧力下降、连接界面错动甚至松脱等损伤现象,从而严重威胁航天器的结构完整性和系统功能性,所以监测螺栓连接松动就成了目前面对的主要问题.另一方面,空天飞行器逐渐成为各国关注的重点,而空天飞行器用于保持良好的气动外形和热防护的蒙皮与骨架的常见连接方式也是螺栓连接,为了能重复利用,也迫切需要针对螺栓连接预紧扭矩进行监测.

目前,机电阻抗<sup>[2]</sup>和超声导波方法<sup>[3]</sup>被广泛应用于航空航天结构健康监测.导波具有在结构中传播距离远,只需很少的传感器就可以实现对结构大范围地监测的优点,但当结构几何形状复杂、界面众

多,即使在简单激励下,导波的频散、多模态特性导致其信号异常复杂,在多螺栓连接的结构中,提取出表征连接状态变化的特征信息将变得十分困难.

结构机械阻抗对于损伤较为敏感,利用压电传感器可以检测机械阻抗的变化,该方法对外界环境影响免疫力强,不依赖模型分析,故适宜复杂结构,适宜在线监测等优点<sup>[4]</sup>.Liang 等<sup>[5-8]</sup>最早提出了智能结构的阻抗分析方法,在阻抗分析的工作中做了大量的相关工作,他的研究奠定了基于压电陶瓷 PZT 的阻抗分析法的基础,其提出了 PZT 耦合结构的一维单自由度弹簧-质量-阻尼系统(SMD)模型的耦合电导纳表达式,分析了结构机械阻抗的变化对压电片电导纳的影响,以悬臂梁为例进行了实验验证.Sun 等<sup>[9]</sup>利用压电传感器,对组合桁架进行了结构健康监测实验,通过对比损伤前后压电片电导纳的变化,验证了机电阻抗技术能准确识别出组合桁架发生的损伤.Bhalla 等<sup>[10]</sup>研究了 PZT 在钢结构的初始损伤诊断中的应用,通过实验验证了机电阻抗法能有效地检测到钢结构的初始损伤.Yabin

2017-07-05 收到第 1 稿,2017-08-08 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金委和中国工程物理研究院联合基金(U1530139),国家级大学生创新训练项目(201610699104)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail:chao\_xu@nwpu.edu.cn

Liang 等<sup>[11]</sup>利用 PZT 对销连接结构的载荷进行监测,结果表明阻抗实部对结构变化更加敏感.熊先锋等<sup>[12]</sup>对螺栓连接的四角固定铝板的螺栓松动状况进行了研究,证明了通过分析 PZT 阻抗的变化来检测螺栓松动状况的可行性.

目前学者针对基于机电阻抗的多螺栓的预紧扭矩检测方法的研究还不够深入,为此本文采用具有质轻,高效,制造容易,抗压等优点的压电陶瓷纤维复合材料 MFC 代替传统的 PZT 进行研究<sup>[13,14]</sup>.针对常见的多螺栓连接结构,本文以两螺栓搭接梁为研究对象,提出了基于压电陶瓷纤维复合材料 MFC 的螺栓预紧扭矩检测方法.

## 1 基于机电阻抗的结构损伤识别原理

压电陶瓷材料是一种能够实现机械能和电能相互转换的功能材料,传统的 PZT 具有脆性大,密度高,硬度高,不易变形等缺点,使这类材料在应用上受到了很大限制,由 NASA 的 Langley 研究中心发明的压电陶瓷纤维复合材料 MFC 则具有优异的强度和灵活性.MFC 是由矩形的压电陶瓷纤维夹在胶粘剂、电极和聚酰亚胺薄膜之间复合而成,电极和薄膜以相互交叉的方式接触,这样可以将电压直接传到压电陶瓷纤维上,或者由其传出.MFC 作为一种智能材料,具有正、逆压电效应.当 MFC 在沿一定方向上受到外力的作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷.当外力去掉后,它又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应.当作用力的方向改变时,电荷的极性也随之改变.相反,当在 MFC 的极化方向上施加电场,MFC 也会发生变形,电场去掉后,MFC 的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应.

借鉴基于压电陶瓷 PZT 与结构的相互作用模型<sup>[15]</sup>,MFC 与结构的相互作用可以用如图 1 所示的一维阻抗模型描述,MFC 被看作为一个狭长的杆件,在交变电场作用下做  $x$  向的轴向振动,MFC 一端固定,另一端与简化为单自由度系统的基体结构相连.

此时,粘贴在结构表面的 MFC 受到垂直于  $x$  方向的电场作用,该系统中 MFC 的电导纳为:

$$Y = j\omega \frac{b_a l_a}{h_a} \left( \frac{\varepsilon_{33}^\sigma}{Z_s + Z_a} - d_{31}^2 \bar{Y}_{11}^E \right) \quad (1)$$

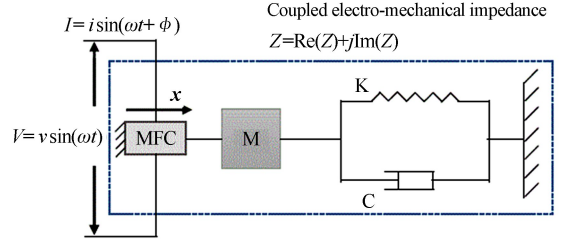


图1 MFC与梁结构机电耦合的一维模型

Fig.1 1-DOF model of electromechanical coupling between MFC and beam structures

方程(1)中, $l_a, b_a, h_a$ 分别是MFC的长、宽、厚, $\bar{\varepsilon}_{33}^\sigma = \varepsilon_{33}^T(1 - \delta j)$ 是MFC在静应力下的复电容率, $\bar{Y}_{11}^E = Y_{11}^E(1 + \eta j)$ 是MFC在静电场中的复杨氏模量, $\delta, \eta$ 分别是介电损耗因子和力学损耗因子, $Z_s, Z_a$ 分别是结构的机械阻抗和MFC的电阻抗, $d_{31}$ 是MFC压电应变系数.

从方程(1)中可以看出,当压电材料的参数和性能保持恒定,与之相贴合的结构机械阻抗唯一的确定了MFC的电导纳.MFC的电导纳的任何变化都反映了结构的机械阻抗的变化,反映了结构中缺陷、损伤或其他物理变化.

相比于MFC的导纳模值、阻抗模值、阻抗虚部等参数,结构变化引起MFC的阻抗实部  $R = \text{Re}(1/Y)$  变化更为明显.因此,为了对螺栓的松动状况进行定性和定量的评价,本文以螺栓松动前后两组阻抗实部数据的均方根偏差  $RMSD$  作为指标:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (R_i^1 - R_i^0)^2}{\sum_{i=1}^{i=N} (R_i^0)^2}} \quad (2)$$

其中  $R_i^0$  为螺栓未松动时第  $i$  个频率点的阻抗实部,  $R_i^1$  为螺栓松动后第  $i$  个频率点的阻抗实部.

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置与试件

本文以图2所示的双螺栓搭接梁为研究对象.两端自由,两根相同的梁用两个M6螺栓相连,梁的几何尺寸为: $l_s = 400\text{mm}, b_s = 60\text{mm}, h_s = 2\text{mm}$ ,梁的材料为2024-T3铝,螺栓对称安装,相距32mm,距梁安装螺栓一端边界20mm,MFC型号为2814-p1,因为机电阻抗法敏感范围限于压电片附近区域<sup>[13,14]</sup>,所以MFC应贴于螺栓附近,MFC中心距梁上下边界均为30mm,距有螺栓连接一侧边界

50mm.阻抗分析仪型号为 IM3570 精密阻抗分析仪,选取 MFC 阻抗值的实部为测量对象.

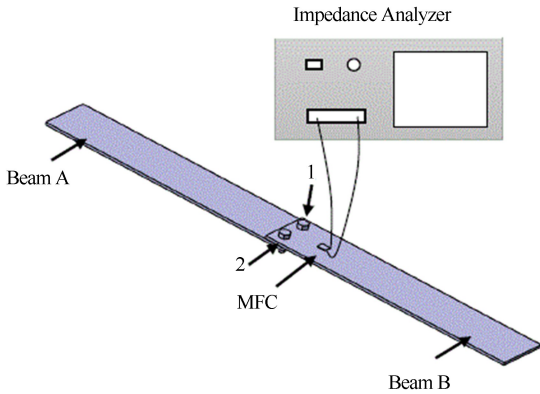


图 2 双螺栓搭接梁模型

Fig.2 Model of double bolt lap beam

### 2.2 实验方法

因为基于机电耦合特性的机电阻抗技术工作频率高(30~500kHz)<sup>[4]</sup>,所以先选取扫频范围为30~200kHz.查得强度等级 8.8 的 M6 螺栓标准扭矩为 9~12N·m,由于所用铝板较薄,为防止铝板屈曲变形,取标准扭矩为 6N·m,实验考虑了 4 种

工况,分别是:工况 1.两个螺栓扭矩均为 6N·m;工况 2.螺栓 1 扭矩 3N·m,螺栓 2 扭矩 6N·m;工况 3.螺栓 1 扭矩 3N·m,螺栓 2 扭矩 3N·m;工况 4.将螺栓 1 取下,螺栓 2 扭矩 3N·m.

用扭矩扳手改变作用在螺栓上的扭矩,寻找阻抗实部的谱曲线上峰值频率与峰值大小的变化程度大的频段,作为敏感频段.通过计算此频段内损伤工况与标准工况(工况 1)间的均方根偏差 RMSD 来判断螺栓松动状况.

### 2.3 实验结果

图 3 为四种工况中阻抗实部随频率变化的曲线,可以发现在 40~43kHz,50~53kHz,72~75kHz,150.5~153.5kHz,164~167kHz,193.5~196.5kHz 六个频段内,阻抗实部谱曲线上峰值频率和峰值大小变化比较明显,因此初步选择上述六个频段为敏感频段,得到工况 2,3,4 相对于工况 1 的 RMSD 如图 4 所示.从图中可以看出,40~43kHz 和 150.5~153.5kHz 两个频段不能区分工况 2 和工况 3,因此,以 50~53kHz,72~75kHz,164~167kHz 和 193.5~196.5kHz 为敏感频段.

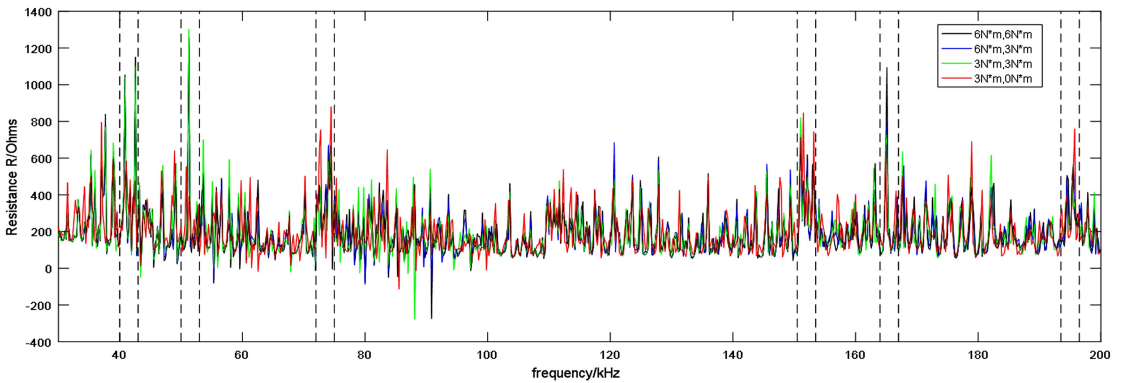


图 3 不同扭矩水平的阻抗实部谱曲线

Fig.3 Impedance real spectral curve under different torque levels

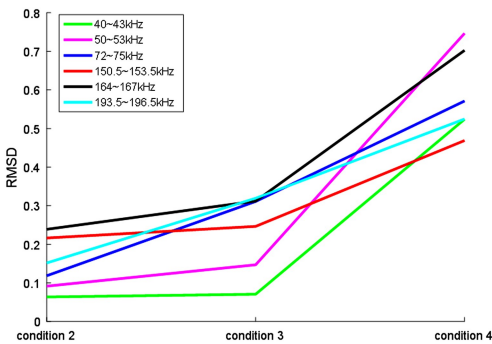


图 4 其余工况阻抗实部数据相对于工况 1 的数据的 RMSD

Fig.4 RMSD of impedance real spectral data under other operating conditions compared with that of the condition 1

在每个频段内,每组工况重复实验 5 次,以工况 1 重复实验 5 次得到阻抗实部数据的平均值为参考数据,计算各工况在对应频段相对于参考数据的 RMSD,结果如图 5 所示.

从图 5 可直观地看出,同一工况下 5 组数据的 RMSD 波动较小,说明阻抗方法用于检测螺栓连接的搭接梁中螺栓松动实验有良好的可重复性.随着螺栓逐渐变松,螺栓上的扭矩下降,MFC 测得的阻抗实部值与参考数据的 RMSD 逐渐增大,但变化较小.当有螺栓脱落后,MFC 测得的阻抗实部值与参

考数据的 RMSD 明显增大。

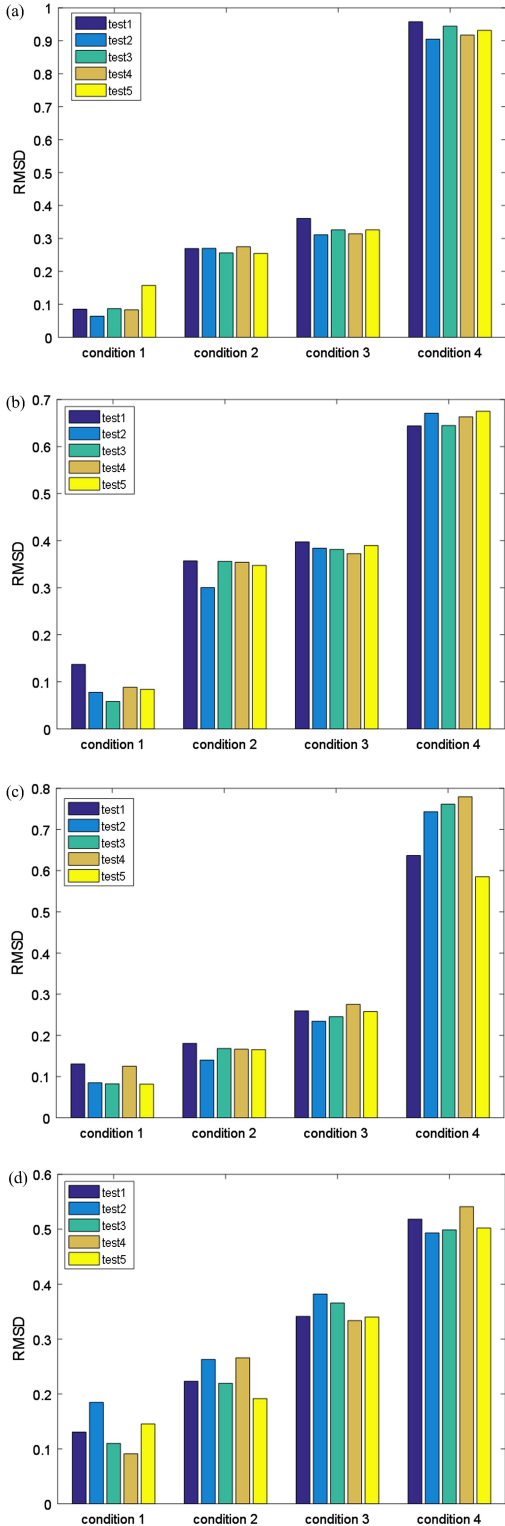


图5 各敏感频段内不同工况的 RMSD

(a) 50~53 kHz; (b) 72~75kHz; (c) 164~167kHz;  
(d) 193.5~196.5kHz

Fig.5 RMSD under different operating conditions  
in each sensitive frequency bands

(a) 50~53kHz; (b) 72~75kHz; (c) 164~167kHz;  
(d) 193.5~196.5kHz

## 2.4 螺栓松动检测步骤

计算得到每组工况 5 次实验的 RMSD 的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ . 建立包含参考数据和已知 4 种工况 RMSD 的均值和标准差的数据库。

步骤一、计算未知工况的 RMSD.

步骤二、对比未知工况的 RMSD 与 4 种工况 RMSD 的均值和标准差。

假设在给定频段内, 每种工况的 RMSD 服从正态分布, 由未松动物况得到的 RMSD 落入工况 1 的  $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$  内的概率为 95.44%, 则由未知工况得到的 RMSD 若落入工况 1 的  $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$  内, 未知工况即为未松动物况. 若未知工况得到的 RMSD 不在工况 1 的  $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$  内, 说明螺栓发生了松动, 对比工况 2, 3, 4 的 RMSD, 就能判断出螺栓的松动程度。

表 1 4 种工况的统计值

Table 1 Statistics of 4 operating conditions

Frequency Range (kHz)	50~53	72~75	164~167	193.5~196.5
$\mu-2\sigma$ (condition 1)	0.031	0.037	0.056	0.068
$\mu+2\sigma$ (condition 1)	0.159	0.141	0.145	0.196
$\mu$ (condition 2)	0.265	0.343	0.167	0.233
$\mu$ (condition 3)	0.328	0.385	0.254	0.353
$\mu$ (condition 4)	0.931	0.660	0.701	0.511

为验证阻抗法能检测出螺栓上是否松动, 对两个螺栓都施加扭矩  $3\text{N}\cdot\text{m}$ , 在 4 个敏感频段内计算其阻抗实部数据相对于参考数据的 RMSD, 如表 2 所示:

表 2 未知工况的 RMSD

Table 2 RMSD under unknown operating condition

Frequency Range (kHz)	50~53	72~75	164~167	193.5~196.5
RMSD	0.365	0.388	0.288	0.346

可以看出, 在 4 个敏感频段内, 未知工况的 RMSD 均未落入工况 1 的  $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$  内, 且接近工况 3 的均值, 说明未知工况螺栓发生松动, 且松动状况与工况 3 接近. 因此根据损伤指标 RMSD, 可以实现两螺栓不同松动物况的检测。

## 3 结论

针对工程中常见的多螺栓连接结构, 本文以两



个螺栓连接的搭接梁为研究对象,测量结构与压电陶瓷纤维复合材料耦合系统的阻抗实部,以敏感频段内阻抗实部的均方根偏差 RMSD 为损伤指标进行预紧扭矩检测.实验结果表明:

(1)敏感频段内阻抗实部的 RMSD 能够有效表征螺栓松动的损伤指标;

(2)根据实验建立了不同螺栓拧紧力矩下的阻抗实部均方根偏差数据库,并提出了螺栓松动检测方法.

(3)利用上述方法实现了对螺栓连接梁中不同螺栓预紧扭矩工况的检测.

## 参 考 文 献

- 王峰,叶水驰,曹喜滨.快速响应对地观测小卫星发展现状及趋势.中国空间科学学会2013年空间光学与机电技术研讨会会议论文集,2013(Wang F, Ye S C, Cao X B. The Development status and trend of operationally responsive satellite. In: Conference Proceedings of the China Space Science Society 2013 Space Optics and Electromechanical Technology Conference, 2013 (in Chinese))
- Gyuhae P, Hoon S, Charles R F, et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest*, 2003, 35(6): 451~463
- Ajay Raghavan, Carlos E. S. Cesnik. Review of guided-wave structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 2007, 39(2): 91~114
- 朱宏平,王丹生,张俊兵.基于压电阻抗技术的结构损伤识别基本理论及其应用.工程力学,2008,25(SUP II):34~43(Zhu H P, Wang D S, Zhang J B. Theory and application of structure damage detection based on piezoelectric impedance technique. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(SUP II): 34~43 (in Chinese))
- Liang C, Sun F P, Rogers C A. Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994, 21(3): 232~252
- Liang C, Sun F P, Rogers C A. An impedance method for dynamic analysis of active material system. *IEEE Transactions of the ASME*, 1994, 116(1): 120~128
- Liang C, Sun F P, Rogers C A. Coupled electromechanical analysis of adaptive material system Determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994, 5(1): 12~20
- Sun A F P, Liang C, Rogers C A. Structural modal analysis using collocated piezoelectric actuator/sensors: an electromechanical approach. In: North American Conference on Smart Structures and Materials, 1994: 238~249
- Sun F P, Chaudhry Z A, Liang C, et al. Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1995, 6(1): 134~139
- Bhalla S, Soh C K. Diagnosis of incipient damage in steel structures by means of piezoceramic patches. In: Proceedings of the 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 5-7 December, Singapore, 2001: 238~248
- Liang Y, Li D, Parvasi S M, et al. Load monitoring of pin-connected structures using piezoelectric impedance measurement. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(10): 105011
- 熊先锋,杨光瑜,杨拥民等.压电阻抗技术用于结构健康诊断的一种方法.传感器技术,2003,22(10):62~64(Xiong X F, Yang G Y, Yang Y M, et al. A Method for Structural Health Diagnosis using piezoelectric impedance technology. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2003, 22(10): 62~64 (in Chinese))
- 吴斌,左啸腾,刘增华等.基于机电阻抗技术的管道法兰结构健康监测实验研究.实验力学,2010(5):516~521(Wu B, Tong X T, Liu Z H, et al. Experimental study of structural health monitoring for pipeline flanges based on electromechanical impedance. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(5): 516~521 (in Chinese))
- Peairs D M, Grisso B L, Margasahayam R N, et al. Impedance-based health monitoring of space shuttle ground structures. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, 5394: 99~107
- 王丹生,朱宏平.基于裂纹弯曲弹簧模型的裂纹混凝土梁动力特性分析.世界地震工程,2006,22(1):45~48(Wang D S, Zhu H P. Dynamic characteristics of concrete beams with a crack based on a bending spring model. *World Earthquake Engineering*, 2006, 22(1): 45~48 (in Chinese))

(Chinese))

## EXPERIMENTAL STUDY ON MULTI-BOLT CONNECTION PRE-TIGHTENING TORQUE TESTING BASED ON IMPEDANCE METHOD\*

Ren Kai Zhang Zihan Du Fei Wu Guannan Xu Chao<sup>†</sup>*(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)*

**Abstract** Small satellites have much higher requirement of rapid response, but they contain a large number of bolted connections. Fast detection of bolt tightening torque after completing assembly is of great significance to improve the fast response of small satellites. In order to detect the bolt preload torque in the multi-bolt connection structures, the electromechanical impedance method is used to study how to detect the bolt pre-tightening torque in the two-bolt lap joint. The loosening of bolts leads to structural mechanical impedance changes. The electrical impedance of the macro-fiber composite (MFC) on the surface of structure changes due to the electromechanical coupling effect. According to the above principle, the MFC was pasted on the surface of the lap beam. When the torque on the bolt is reduced, the impedance curve of the MFC is measured by the impedance analyzer to search the sensitive frequency range. In the above sensitive range, the root mean square deviation (RMSD) of the real part of the impedance was calculated when the bolt is loose and in the healthy state. The experimental results show that the peak and its frequency of the real part of the impedance curve changes obviously with the loosening of the two bolts, and the RMSD gradually increases. A database containing the RMSD of the real number of the impedance and the known operating conditions is established by comparing the unknown conditions of the RMSD so as to determine the bolt loosening situation, and this method is also verified by experiments. Therefore, the electromechanical impedance method, which uses MFC as piezoelectric sensors, can successfully detect whether the two bolts of the lap joint are loose or not.

**Key words** electromechanical impedance method, MFC, lap beam, loose bolts, preload torque detection