

# 激励电压对压电阻抗法检测灵敏度的影响\*

李继承<sup>1</sup>, 林 莉<sup>1</sup>, 孟丽娟<sup>1</sup>, 李喜孟<sup>1</sup>, 雷明凯<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学无损检测研究所 大连, 116024)

(2. 大连理工大学材料科学与工程学院 大连, 116024)

**摘要** 研究了锆钛酸铅压电陶瓷(lead zirconate titanate piezoelectric ceramic, 简称 PZT)传感器的激励电压与压电阻抗法(electro-mechanical impedance, 简称 EMI)结构健康监测技术灵敏度之间的关系。借助 WK 6500B 精密阻抗分析仪及自行搭建的高激励电压电阻抗测试系统(high excitation voltage electrical impedance measurement system, 简称 HEVEIMS), 在 0.01~20 V 之间 8 种不同激励电压下, 对尺寸为 1250 mm×100 mm×3 mm 铝梁结构上距离 PZT 传感器 1 000 mm 的直径为 1.2、2.5 和 3.5 mm 的通孔损伤进行了检测。研究表明, 激励电压与检测灵敏度之间的关系是非单调的。在 1~10 V 范围内, 提高激励电压能够显著增大 EMI 方法的检测灵敏度。高激励电压下 PZT 电阻抗信号中非线性成分增多是导致 EMI 方法检测灵敏度升高的主要原因。研究结果不但为 EMI 检测中激励电压的选取提供了参考, 也为明确激励电压与检测灵敏度之间的相关关系提供了数据支持。

**关键词** 压电阻抗; 压电传感器; 结构健康监测; 激励电压; 检测灵敏度

**中图分类号** TN712.5; TP206.1

## 引 言

压电阻抗(electro-mechanical impedance, 简称 EMI)法结构健康监测技术的检测灵敏度受锆钛酸铅压电陶瓷(lead zirconate titanate piezoelectric ceramic, 简称 PZT)传感器的激励电压、检测频段、损伤类型、损伤与传感器之间距离等多因素的影响<sup>[1-5]</sup>。目前, 研究的损伤尺寸普遍较大, 如通孔损伤通常不小于  $\phi 5$  mm<sup>[6-7]</sup>。如何提高 EMI 方法的检测灵敏度已经成为该领域的研究热点。近年来的研究表明, 增大 PZT 传感器的激励电压能够提高所得电阻抗信号的信噪比, 识别出相对较弱的振动模态, 进而提高 EMI 方法的检测灵敏度。Raju<sup>[8]</sup>使用 HP 4192A 阻抗分析仪在 0.01, 0.1, 0.5 和 1 V 四种激励电压下对铝梁螺栓连接的松动状况进行了检测。结果表明, 选用 0.01 V 时激发电压过低, 所得电阻抗信号完全被噪声信号湮没。当激发电压从 0.1 V 增大到 1 V 时, 检测灵敏度和敏感范围均逐渐增大。Yang 等<sup>[9-10]</sup>的研究结果表明, PZT 传感器的激励力正比于激励电压, 提高激励电压能够增大 PZT 所激发应力波信号的能量, 提高波动信号的传播距离, 进而增大对远距离损伤的检测灵敏度。

由于商用阻抗分析仪的最大激发电压通常为 1 V, 目前关于激励电压对检测灵敏度影响的研究大多局限于低电压范围。更高激励电压范围内的实验数据并不充分, 激励电压与检测灵敏度之间的相关机理尚未澄清。

笔者借助 WK 6500B 精密阻抗分析仪及自行搭建的高激励电压电阻抗测试系统(high excitation voltage electrical impedance measurement system, 简称 HEVEIMS)对一维铝梁结构上的通孔损伤进行了检测。为了研究 EMI 方法对于微小损伤的检测灵敏度, 所钻取的通孔损伤直径分别为 1.2、2.5 和 3.5 mm, 均小于目前研究中常用的 5 mm 直径圆孔。在 0.01~20 V 之间设计了 8 种激励电压对 PZT 传感器进行激励, 同时引入均方差 RMSD 作为损伤识别指数, 对激励电压与检测灵敏度之间的关系进行了定量分析。

## 1 实验系统及样品

### 1.1 实验系统

本研究所采用的两套电阻抗测试系统分别为

\* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2009CB724305)

收稿日期:2011-07-12;修改稿收到日期:2011-11-01

WK 6500B精密阻抗分析仪及自行搭建的 HEVE-IMS。WK 6500B精密阻抗分析仪的最大输出电压为1 V,测试频率范围为20 Hz~120 MHz,如图1所示。HEVEIMS由安装有WaveGen-1410波形发射软件的计算机、ARB-1410波形发射卡、阻抗测量电路及DPO-4032型数字示波器组成,如图2所示。该系统包括PZT传感器激励及电阻抗信号测量两个主要部分,其中PZT激励功能由ARB-1410波形发射卡及WaveGen-1410控制软件完成,DPO-4032型数字示波器及阻抗测量电路负责完成PZT电阻抗信号的测量。该系统能够在0~2 MHz频率范围内提供0~30 V的电压输出。为了研究激励电压对检测灵敏度的影响,在0.01~20 V之间设计了8种不同的激励电压对PZT传感器进行激励。其中,0.01~1 V之间的4种激励电压实验由WK 6500B精密阻抗分析仪测试完成,分别为0.01,0.1,0.5和1 V。1~20 V之间的4种激励电压由HEVE-IMS测试完成,分别为5,10,15和20 V。

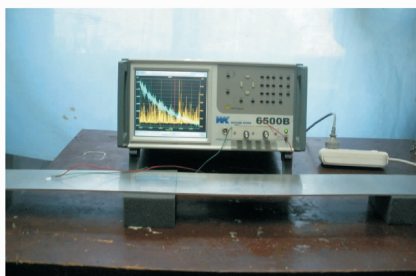


图1 WK6500B精密阻抗分析仪

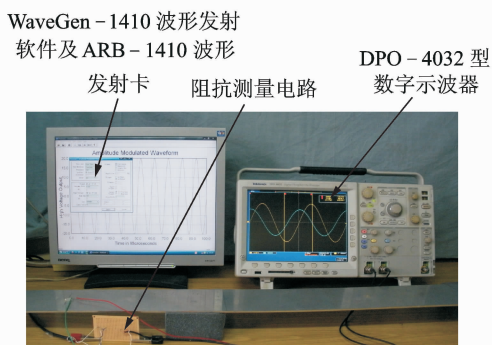


图2 HEVEIMS系统

## 1.2 实验样品

所用铝梁的几何尺寸为1250 mm×100 mm×3 mm,圆形PZT传感器的尺寸为 $\phi 14$  mm×0.2 mm,粘贴位置距离铝梁左端125 mm。通孔损伤的直径分别为1.2,2.5和3.5 mm,距离PZT传感器1000 mm,如图3所示。

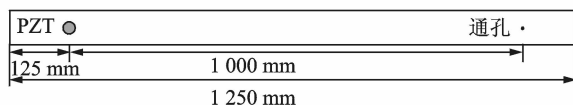


图3 一维铝梁结构上通孔损伤制作示意图

## 2 电阻抗信号测量结果

压电阻抗法的常用检测频率范围为30~450 kHz,在该频带内对损伤前的铝梁结构进行电阻抗信号测量,测量数据点数为701,相邻点之间的频率间隔为0.6 kHz,结果如图4所示。观察发现,300~310 kHz频段内电阻抗峰值的幅度更加明显,峰值分布更加集中,因而选用该频段进行损伤检测。检测用采样点数为101,相邻点之间的频率间隔为0.1 kHz。

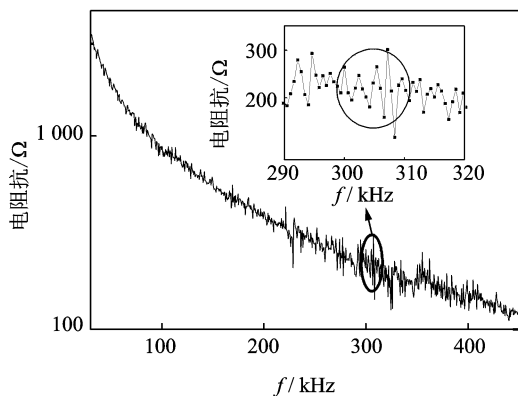


图4 原始状态PZT电阻抗测试结果

图5所示为300~310 kHz频段范围内不同激励电压作用下PZT电阻抗的测试结果。观察发现,当激励电压的变化范围在0.01~1 V之间时,对于1.2,2.5和3.5 mm直径的通孔损伤,损伤前后电阻抗信号的变化均不明显,仅在某些局部频率上存在峰值幅度的变化(见图5(a),(c)和(e))。当激励电压在5~20 V之间变化时,损伤后电阻抗信号峰值和谷值的幅度发生了明显变化,同时部分谐振峰向低频方向偏移,能够对结构损伤前后所处的不同状态进行区分(见图5(b),(d)和(f))。

## 3 分析与讨论

为了进一步研究PZT传感器激励电压的变化对压电阻抗法检测灵敏度的影响,引入Giurgiutiu等<sup>[1]</sup>提出的均方差RMSD作为损伤识别指数进行定量分析。均方差定义为

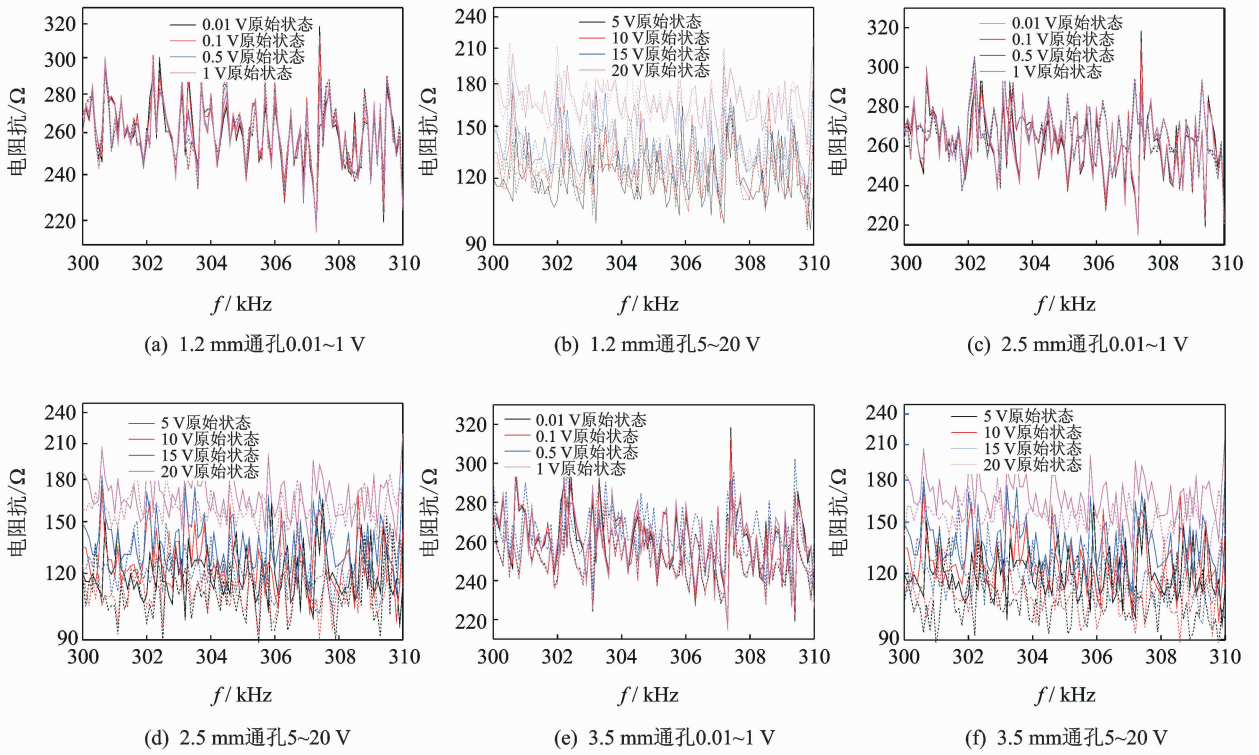


图5 不同激励电压下PZT电阻抗测试结果

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \times 100 \quad (1)$$

其中: $n$ 为采样信号中的数据点数; $x_i$ 和 $y_i$ 分别为结构损伤前后PZT电阻抗的采样信号。

RMSD的数值反映了结构发生损伤后,PZT电阻抗信号相对于结构处于原始状态时的变化程度。对于同一损伤,RMSD的数值越大,表明EMI方法的检测灵敏度越大。

图6所示为不同激励电压作用下,PZT电阻抗信号RMSD值的计算结果。可以看出,当激励电压小于1V时,RMSD的数值较小,对通孔损伤的检测灵敏度较低。当激励电压高于1V时,RMSD的数值明显大于1V以下的情况,具有更高的检测灵敏度。在相同激励电压下,随着通孔损伤直径的增大,RMSD值也逐渐增大。在0.01~20V的激励电压范围内,RMSD值的变化并非是单调的。以1.2mm直径通孔损伤检测结果为例,当激励电压由0.01V增大到1V过程中,RMSD值首先从0.01V时的4.47减小到0.5V时的2.17,之后又增加到1V时的4.59。当激励电压由1V增大到10V时,RMSD值由4.59增加到16.82,发生了明显的增大。当激励电压继续增大为20V时,RMSD值又逐渐减小到8.12。

在EMI结构健康监测研究中,RMSD的取值受

多个检测条件的影响,包括PZT传感器的激励电压、检测频带范围、采样点数、噪声信号的干扰、PZT传感器的粘结状况等。在本研究中,对应于不同的激励电压,检测频带范围和采样点数是完全相同的。当激励电压由0.01V增大到1V时,RMSD值数值较小,并存在一定的波动。激励电压较低时,PZT传感器的振动不够充分,此时所测得的电阻抗信号容易受到噪声信号的干扰,RMSD的取值反而会出现异常的增大。因此,在进行EMI检测研究时,为了获得更大的检测灵敏度同时避免噪声信号的干扰,应选用较高的激励电压。

当激励电压由1V增加到5V时,损伤识别指数RMSD出现了比较明显的增大,其原因是由于PZT传感器在高激励电压作用下非线性现象明显增强引起的。Abelea<sup>[12-13]</sup>和Rutherford<sup>[14]</sup>等的研究表明,PZT的非线性信号比线性信号对常规类型的损伤(通孔、裂纹等)具有更高的检测灵敏度。使用商用阻抗分析仪进行损伤检测时,由于激励电压较低,所得电阻抗信号中线性成分占主要,非线性成分很少。Yu等<sup>[15]</sup>的研究表明,在高激励电压作用下,由于压电材料的迟滞特性引起的激励电压与PZT传感器输出位移之间的非线性关系将会表现的十分明显。Sun等<sup>[16]</sup>也指出15V是PZT材料保持良好线性的电压上限。随着激励电压的升高,所

测得电阻抗信号中非线性成分明显增多,因而 EMI 方法的检测灵敏度也随之增大。同时,当激励电压由 1 V 升高到 20 V 时, RMSD 值并不是单调增大的,而是表现出先升高后降低的现象。这表明通过提高激励电压来获得更高的检测灵敏度也存在一定的限度。在高频情况下 PZT 传感器消耗的功率更大,对于 ARB-1410 波形发射卡的工作稳定性提出了更高的要求。处于高电压高频率工作方式下 PZT 的振动情况更加剧烈,对其自身粘结状况十分敏感。这些因素使得高频高压工作方式下 PZT 传感器的电阻抗信号更容易受到噪声信号的干扰。此外,PZT 传感器在高电压高频率方式下长时间工作时,由于发热引起自身温度升高的现象将变得比较明显。Park 等<sup>[17]</sup>的研究表明,温度升高会使 PZT 电阻抗信号的整体幅度发生明显的起伏变化。更高激励电压下 EMI 方法检测灵敏度的变化还需要进一步研究。

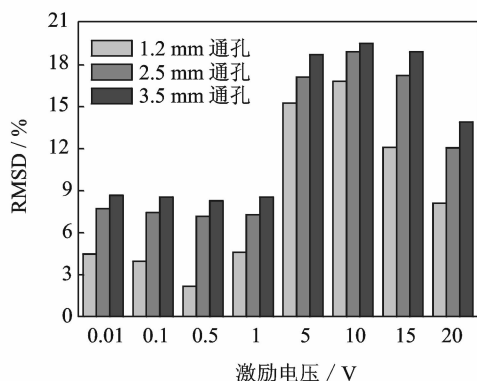


图6 不同激励电压作用下 PZT 传感器电阻抗 RMSD 值计算结果

## 4 结束语

笔者借助 WK 6500B 精密阻抗分析仪及自行搭建的 HEVEIMS 在 0.01~20 V 范围内对 EMI 方法中激励电压与检测灵敏度之间的关系进行了定量研究。结果表明,激励电压是影响检测灵敏度的重要因素,两者之间的关系是非单调的。当激励电压小于 1 V 时,无法对直径 1.2 mm 的通孔损伤进行有效检测。在 1~10 V 范围内,提高激励电压能够使所测得的电阻抗信号中非线性成分明显增多,进而使 EMI 方法的检测灵敏度明显增大。当激励电压高于 10 V 时,由于噪声信号的干扰及 PZT 传感器非线性等因素的影响,检测灵敏度反而降低。在实际检测中影响 EMI 方法检测灵敏度的因素较多,需要综合考虑 PZT 的激励电压、检测频带范围、

PZT 的粘贴位置等。激励电压与检测灵敏度之间的相互作用机理还需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Yan Wei, Chen Weiqiu. Structural health monitoring using high-frequency electromechanical impedance signatures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2010, 2010(1):1-12.
- [2] Panigrahi R, Bhalla S, Gupta A. A low-cost variant of electro-mechanical impedance (EMI) technique for structural health monitoring [J]. *Experimental Techniques*, 2010, 34(2):25-29.
- [3] 卢翔,朱楚为,章建文,等.压电阻抗技术在焊缝裂纹监测中的应用[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(2):205-209.  
Lu Xiang, Zhu Chuwei, Zhang Jianwen, et al. Application of electro-mechanical impedance method in crack detecting of welding line [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(2):205-209. (in Chinese)
- [4] 郑渝,杨铁梅,熊诗波.结构梁损伤的频响函数幅值变化特征分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2004, 24(2):266-269.  
Zheng Yu, Yang Tiemei, Xiong Shibo. FRF characteristic analysis on damaged beam [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2004, 24(2):266-269. (in Chinese)
- [5] 方剑青,矫桂琼.基于频响函数的结构状态识别神经网络方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2007, 27(1):45-47.  
Fang Jianqing, Jiao Guiqiong. Structure state identification with neural network method based on the frequency response function [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2007, 27(1):45-47. (in Chinese)
- [6] Naidu, A S K, Soh C K. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(2):393-403.
- [7] 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.
- [8] Raju V. Implementing impedance-based health monitoring technique [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [9] Yang Yaowen, Hu Yuhang, Lu Yong. Sensitivity of PZT impedance sensors for damage detection of concrete structures [J]. *Sensors*, 2008, 8(1):327-346.

- [10] Hu Yuhang, Yang Yaowen. Wave propagation modeling of the PZT sensing region for structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(3):706-716.
- [11] Giurgiutiu V, Rogers C A. Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE[C]// *Proceedings of the SPIE's 5th International Symposium on Smart Structures and Materials*. San Diego, California:[s. n.] 1998, 3329:536-547.
- [12] Abeele V D K, Visscher D J. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9):1453-1464.
- [13] Abeele V D K, Johnson P A, Sutin A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12(1):17-30.
- [14] Rutherford A C, Park G, Farrar C R. Non-linear feature identifications based on self-sensing impedance measurements for structural health assessment [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1):322-333.
- [15] Yu Y H, Xiao Z C, Naganathan N G, et al. Dynamic preisach modeling of hysteresis for the piezoceramic actuator system [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(1):75-89.
- [16] Sun F P, Chaudhry Z, Rogers C A, et al. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition[C]// *Proceedings of SPIE North American Conference on Smart Structures and Materials*. San Diego, California:[s. n.], 1995, 2443:236-247.
- [17] 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.



**第一作者简介:**李继承,男,1981年10月生,博士生。主要研究方向为压电阻抗法结构健康监测技术。曾发表《Ultrasonic characterization of modified Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by reflection coefficient spectroscopy》(《Transactions of Nonferrous Metals Society of China》2010, Vol. 20)等论文。

E-mail:lijicheng 1981@163.com

