

压电智能结构的损伤识别研究

杜天宇, 唐达培, 刘冬冬

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 630031)

摘要:采用有限元方法分析了裂纹宽度对压电智能结构阻抗信号的影响,得出了压电智能结构的导纳频谱图。结果表明:随着裂纹宽度的增加,电导的共振频率产生了向左的偏移,损伤程度越大,共振频率偏移越多,且出现了较多的次模态,共振峰值也随损伤的增大而减小。此外引入的损伤指标 RMSD 的值会随着裂纹宽度的增加而增大。此结论对于结构的损伤识别具有一定的参考价值。

关键词:裂纹宽度;压电阻抗;损伤识别;压电智能梁

中图分类号:TB381

文献标志码:A

引言

随着土木工程领域的不断发展,结构的健康状况越来越受到人们的关注。因此对结构的健康检测技术的要求也提高到了一个新的层次。压电材料由于具有显著的优点而被广泛的用作传感器和执行器^[1]。近年来,许多学者将压电材料应用到结构的损伤识别与健康监测中来,包括航空、机械以及土木工程等诸多领域。Liang^[2]等较早的对压电陶瓷与基体结构的机电耦合特性进行了研究,并提出了基于压电阻抗结构的健康检测技术。该技术的基本思想是:当压电片粘贴在结构表面或埋入结构内部且其性能保持不变的情况下,压电传感器的电阻抗将取决于机体结构的机械阻抗。当结构发生损伤时,其结构的机械阻抗的改变将通过压电传感器电阻抗反映出来。

许多研究表明三维有限元是构建 EMI 模型的有效方法,可以模拟复杂的工程结构和满足高频振动分析的需要。王伟^[3]等利用 ANSYS 软件建立了由“压电片-粘结层-含裂纹主体梁结构”耦合系统的三维有限元模型,研究了裂纹深度、粘结层厚度、振动模态等对压

电阻抗信号的影响;王丹生^[4]等研究了单压电片驱动下钢梁在纵向振动和弯曲振动下压电智能梁的机械阻抗;李万春^[5]等研究了不同裂纹位置对电导信号的影响;蔡金标^[6]等通过对混凝土梁裂缝发展的定量研究,其结果表明压电片-粘结层-主体结构耦合系统的共振频率及电导信号的峰值能够表征混凝土裂缝深度的发展,并且指出了在传统的损伤指标中,均方根偏差(RMSD)更适于检测混凝土裂缝的出现,而相关系数(CCD)则绝对比例偏差(MAPD)和 RMSD 更适于定量分析裂缝的发展;李继承^[7]等研究了激励电压对压电阻抗法检测灵敏度的影响,其结果表明:高激励电压下,压电阻抗信号中的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。

迄今,有关裂纹宽度对压电阻抗信号影响的研究还鲜有报道。据此,本文拟采用基于压电阻抗技术的结构损伤检测方法,通过有限元建立“压电片-粘结层-含裂纹梁”的三维压电智能结构,对不同裂纹宽度对压电阻抗信号的影响进行模拟计算和分析,与此同时引入了电导的均方根偏差 RMSD 来作为结构的损伤指标。

收稿日期:2016-03-30

作者简介:杜天宇(1990-),男,陕西榆林人,硕士生,主要从事工程结构健康监测方面的研究,(E-mail)810621658@qq.com;

唐达培(1966-),男,四川成都人,教授,博士,主要从事工程力学数值模拟方面的研究,(E-mail)dapeitang@163.com

1 压电智能结构的阻抗模型

压电结构的动态驱动分析需要引入弹性系数、质量和阻尼系数。图 1 为 PZT 驱动单自由度弹簧 - 质量 - 阻尼(SMD)系统简化模型。单点驱动情况下结构的机械阻抗为:

$$Z_{str}(\omega) = c_e(\omega) + i(\omega m_e(\omega) - k_e(\omega)/\omega) \quad (1)$$

其中,参数 $c_e(\omega)$ 、 $m_e(\omega)$ 、 $k_e(\omega)$ 的含义见图 1。

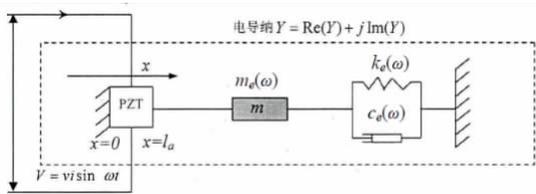


图 1 PZT 与结构的机电耦合

根据机电耦合效应以及 PZT 与结构的相互作用,可得到与结构耦合的 PZT 电导纳(阻抗的倒数)的表达式:

$$Y(\omega) = i\omega C \left(1 - \kappa_{31}^2 \frac{Z_{str}(\omega)}{Z_{PZT}(\omega) + Z_{str}(\omega)} \right) \quad (2)$$

其中, $Y(\omega)$ 为 PZT 的导纳; Z_{PZT} 、和 Z_{str} 分别为 PZT 和结构的机械阻抗, ω 为激励频率; C 是零电场下的电容; κ_{31} 是机电耦合系数。

由式(2)可以看出,只要压电片的参数及性能保持恒定,损伤引起的结构阻抗的改变会由 PZT 的电导纳反映出来。因此,电阻抗的任何变化都反映了结构中的缺陷、损伤或其它物理变化,这样就可以通过 PZT 的电导纳值对结构损伤进行识别。

2 损伤指标

通过对压电智能结构进行有限元模拟后,基本上可以从图像上观测到被检测结构的特性是否发生了变化,而对于变化不明显的的数据,从表面上难以直接判断其变化的规律,而这些数据同样非常重要,因此引入损伤指标。用于衡量损伤程度的指标有许多种,压电阻抗技术领域常用的损伤指标有以下几种:阻抗差值平均法、阻抗差方均值法、阻抗协方差法及阻抗均方根偏差法。阻抗差值平均法和阻抗差方均值法这两种方法通常适用于

所选取的信号为阻抗信号,计算的速度相对缓慢属于较传统的计算方法;阻抗协方差法主要是比对两数据之间的匹配程度,定量的准确度稍差。在以往研究中的结果表明利用压电导纳的均方根偏差(RMSD)来定义的损伤指标的精确度最佳^[8]。因此本文采用压电导纳的均方根偏差值(RMSD)来客观反映不同程度损伤下的电导纳的变化,其定义为:

$$RMSD =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Y_i) - \text{Re}(Y_0)]^2}{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Y_0)]^2} \right) \times 100\%} \quad (3)$$

其中: $\text{Re}(Y_i)$ 为无损状态下的电导纳值; $\text{Re}(Y_0)$ 为损伤状态下的电导纳值, n 表示扫描频率范围内频率点数。通过式(3)进行计算就可以得到各不同损伤状态下的损伤指标。

3 计算模型及边界条件

计算模型选取 200 mm × 20 mm × 2 mm 的含裂纹悬臂钢梁为主体结构,压电片的尺寸为 15 mm × 10 mm × 0.5 mm,压电片粘贴在梁的中部距梁左端 70 mm,裂纹距压电片的距离也为 70 mm,粘贴层的厚度为 0.5 mm,阻尼比为 0.08。本文将裂纹的宽度 d 作为可调变量,其宽度分别为 1 mm、2 mm、3 mm。模型的网格划分如图 2 所示。

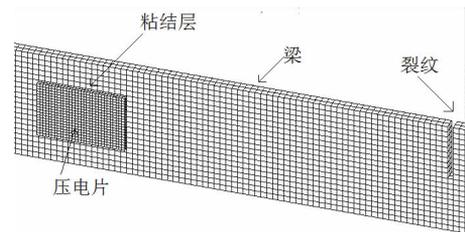


图 2 模型及网格划分

模型选取的主体梁结构以及粘层^[9]的材料参数见表 1。

表 1 主体结构和粘层的材料参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
钢材	7750	210	0.3
粘结剂	1000	5.9	0.4

压电片的材料参数^[10]见表 2。

表 2 压电片的材料参数

密度/(kg/m ³)	介电常数/(F/m)	压电应变常数/(10 ⁻¹² C/N)	压电柔度系数/(10 ⁻¹² m ² /N)
ρ	$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} \epsilon_{33}$	$d_{31} = d_{32} d_{33} d_{24} = d_{15}$	$s_{11} = s_{22} s_{12} s_{13} = s_{23} s_{33} s_{44} s_{55} = s_{66}$
7450	882.7 742.6	-123 270 420	12.9 -5.2 -5.7 15.5 36.2 39

4 结果分析和讨论

通过对不同裂纹宽度对压电智能结构阻抗信号的研究发现,当钢梁出现裂纹损伤时,粘贴在钢梁表面压电片的电阻抗发生明显变化。图3为不同裂纹宽度下压电片导纳曲线图。从图3中可以看出,随着裂纹宽度的增加,电导的共振频率产生向左的偏移,共振峰值也随损伤的增大而减小;当钢梁损伤程度越大时,其共振频率偏移的越多。这是由于梁中裂纹宽度的增加会引起结构的刚度减小,降低了相应的共振频率,从而表现为电导曲线的向左偏移,此结果证实了压电阻抗模型对结构的损伤非常敏感,可以用于结构的损伤识别。此外当裂纹宽度增大时伴有次模态的产生,这是由于结构局部的损伤而引起的^[11]。图4为不同裂纹宽度下压电片导纳的RMSD值。从图4中可以看出,电导纳的损伤指标RMSD值能够很好地识别损伤且随着裂纹宽度的增加,电导的损伤指标也增大,同时电纳的RMSD值也随着裂纹宽度的增大而增大。因此可以根据损伤指标RMSD值对裂纹损伤程度进行初步定量分析。

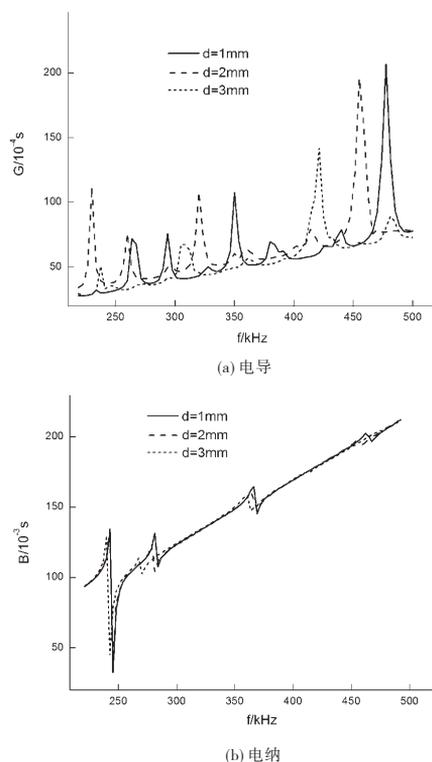


图3 不同裂纹宽度对电导纳信号的影响

5 结束语

本文采用有限元方法建立了“压电片-粘结层-含

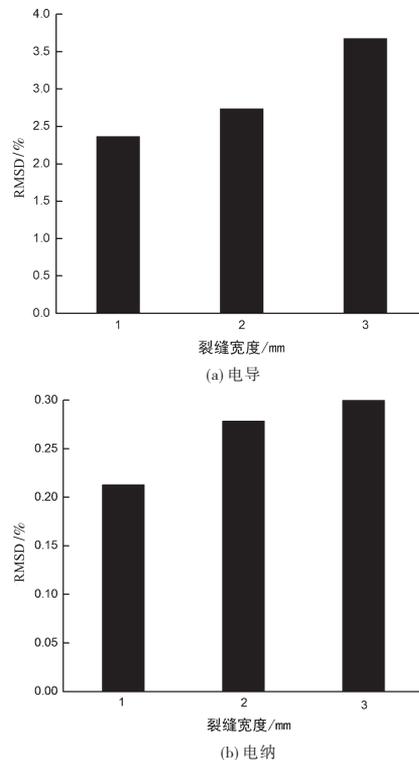


图4 不同裂纹宽度下电导纳的RMSD值

裂纹钢梁”这一耦合系统的三维有限元 EMI 模型来模拟裂纹宽度对压电阻抗信号的影响。结果表明:压电阻抗模型对结构的损伤十分敏感,可以用于结构的损伤识别;此外压电智能梁裂纹的宽度会对导纳谱产生影响。当裂纹的宽度增加时,电导的共振频率向左偏移,随着损伤程度的加深,共振频率偏移的越大并且伴有次模态的产生;共振的峰值也随着损伤的增大而减小;与此同时,电导纳的损伤指标RMSD值随着裂纹宽度的增加而增大。

此结论对基于压电阻抗技术的结构损伤识别具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 王波,殷学纲,黄尚廉.压电自感知悬臂梁振动的主动控制研究[J].固体力学学报,2004,25(1):107-110.
- [2] LIANG C,SUN F P,ROGERS C A.Electro-mechanical impedance modeling of active material systems [J]. Smart Materials and Structures,1998,5(2):171-186.
- [3] 王炜,严蔚,李万春.基于高频压电阻抗谱的钢框架损伤识别研究[J].宁波大学学报:理学版,2013,26(2):78-82.
- [4] 王丹生,朱宏平,金珂,等.压电智能梁的阻抗分析与

- 损伤识别[J].固体力学学报,2008,29(4):402-407.
- [5] 李万春,严蔚,王骥.含损伤梁的三维有限元压电阻抗模型及参数研究[J].振动与冲击,2012,31(12):45-48.
- [6] 蔡金标,李忠良.基于压电阻抗混凝土裂缝发展的定量研究[J].压电与声光,2014,36(1):79-84.
- [7] 李继承,林莉,孟丽娟,等.激励电压对压电阻抗法检测灵敏度的影响[J].振动、测试与诊断,2013,33(3):421-425.
- [8] 王涛.基于压电阻抗技术的螺栓松动监测的研究[D].武汉:武汉科技大学,2015.
- [9] 陈勇.基于压电阻抗的结构健康监测技术的研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [10] 吴建中.基于压电阻抗损伤识别技术的有限元研究[D].合肥:安徽理工大学,2011.
- [11] YAN W, CHEN W Q, CAI J B, et al. Quantitative structural damage detection using high frequency piezoelectric signatures via the reverberation matrix method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 71(5):505-528.

Research on Damage Identification of Piezoelectric Smart Structures

DU Tianyu, TANG Dapei, LIU Dongdong

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The effect of crack width on the impedance of piezoelectric smart structures was analyzed by using the finite method. The electric admittance spectrum of piezoelectric smart structures was obtained. The conclusion shows that with the increase of the crack width, the resonance frequency of the conductance is shifted to the left, and the larger the damage, the more the deviation. When the crack is increased, the secondary mode is generated. The resonance peak value also decreases with the increase of damage. Moreover, the damage index RMSD of electric admittance shows that with the increase of the crack width, the damage index RMSD also increases. These conclusions can provide some reference value for the identification of structural damage.

Key words: crack width; piezoelectric impedance; damage identification; piezoelectric smart beam