

基于 EMI 结构损伤检测技术的模拟与分析

许杨健, 韩朋成

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 该文基于压电阻抗法(EMI)对带有损伤板类结构进行模拟分析,研究了损伤拓展对 EMI 信号的影响规律。首先,采用有限元软件 ANSYS 建立 6 种不同损伤情况下的三维精细“压电片(PZT)-主体结构”有限元模型;然后,对有限元模型进行动力谐响应分析,得到考虑损伤深度 d 、损伤位置与压电片距离 s 的压电片电导频谱信号;最后,通过横纵向对比分析了板类结构损伤扩展对压电片电导频谱信号的影响规律。分析结果表明,采用建立的含有细小损伤的三维精确压电有限元模型,可以精确地检测到压电片电导纳谱中的共振模态,进而可以很好地识别板类结构局部的细小损伤;验证了现有电阻抗法对含有细小损伤结构分析理论的有效性;当损伤位置越靠近压电片,电导频谱信号模态峰值向左偏移的就越多,因此,通过布置压电片的合理位置可以确定结构细小损伤的位置。

关键词: ANSYS 软件;压电片;谐响应分析;电阻抗法;损伤检测

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.031

Simulation and Analysis of Structural Damage Detection Based on EMI

XU Yangjian, HAN Pengcheng

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Based on the high frequency electromagnetic interference(EMI) method, the damage patch structure is simulated and analyzed, and the influence of damage propagation on the EMI signal is studied in this paper. First, the three-dimensional finite element model considered “piezoelectric patches (PZT)-main structure” under six different damage cases is established by the ANSYS software. Then the conductance spectrum signal considering the damage depth of d and the distance s between the damage position and the piezoelectric patch is obtained by using the finite element model to analyze the power-harmonic response. Finally, the effect of the patch structural damage propagation on the conductance spectrum signal of the piezoelectric patch is analyzed with the vertical and horizontal comparison. The analysis results show that the resonant mode in the conductance spectrum of the piezoelectric patch can be accurately measured by using the three-dimensional finite element model contained the fine damage, and then the local minor damage in the patch structure can be recognized very well. The validity of the existing impedance analysis method for the analysis of structures containing small damage is verified. When the damage location is closer to the piezoelectric patch, the more the signal peak of the conductance spectrum signals is shifted to the left, so the location of the fine structure damage can be determined by arranging the reasonable location of the piezoelectric patch.

Key words: ANSYS software; piezoelectric patch; harmonic response analysis; electrical impedance method; damage detection

0 引言

随着结构服役时间的增加,结构材料早期的细小损伤若未能及时发现,将会不断地改变结构的强度与刚度,进而引发结构的累计损伤,从而导致结构

的突发性失效。因此,及时、准确地识别结构材料早期微弱和潜在的损伤具有重要的理论与应用价值。随着压电智能材料的发展,20 世纪 90 年代压电阻抗法(EMI)开始应用于结构损伤检测,为工程结构

收稿日期:2017-04-01

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2010001007,E2011402033)

作者简介:许杨健(1956-),男,四川富顺县人,教授,主要从事应用梯度功能材料以及结构检测方面的研究。E-mail:tdhui563@sina.com。

韩朋成(1990-),男,河南周口人,硕士,主要从事结构损伤检测方面的研究。E-mail:hpch1993@163.com。

长期实时的健康检测提供了新型、高效率可行方法。

为了更好地将 EMI 结构损伤检测技术应用于工程实际中,国内外学者对 EMI 技术进行了很多的理论研究与实验。Liang 等^[1]最早提出了基于等效集中力假设建立经典的 EMI 一维理论模型,粘贴在主体结构表面的铅钛酸铅压电陶瓷(PZT)压电片在交变电压的作用下被简化成仅能产生纵向膨胀和收缩的薄片,并由模型得到了反映主体结构振动特性的电导纳的表达式。Giurgiutiu 等^[2]基于压电阻抗技术,利用 PZT 压电片对钢筋混凝土结构进行结构健康检测的无损评价。HU 等^[3]利用 EMI 技术对两层混凝土框架进行损伤检测,并提出了损伤指数概念,分析了损伤位置与 PZT 间距对损伤指数的影响,能够定位结构的损伤区域。蔡金标等^[4]考虑了粘结层的影响,通过 ANSYS 有限元软件建立了由压电片-粘结层-主体结构组成的耦合系统三维有限元模型,得出了可应用于工程实际的、更精确的压电阻抗模型。Rogers 等^[5-7]对一些简单结构进行了 PZT 上电阻抗与结构机械阻抗相互关系的试验研究,证实压电阻抗技术可用于结构损伤检测。Xu 等^[8]用里兹(Ritz)法进行电阻抗法结构损伤研究,但是,作为形函数的多项式的选取将严重影响计算的精度。Rytter^[9]阐述了结构损伤识别的四阶段:

- 1) 检测结构中是否存在损伤(Detection)。
- 2) 识别结构中损伤的位置(Localization)。
- 3) 定量结构中损伤的大小(Assessment)。
- 4) 评估损伤发生后结构的寿命(Prediction)。

Dansheng Wang 等^[10]通过在主体结构并联多片压电片,提出了互相关系数指数(CC),得出了 PZT 压电片距离损伤越近,互相关系数就越小的结论。

Makkonen 等^[11]提出通过 ANSYS 有限元动力谐响应分析,频率即使达到吉赫兹也能得到较好的结果,证明了有限元谐响应分析可以应用于 EMI 技术的高频分析。谐响应分析是一种线形分析,可采用完全法(FULL)、缩减法(REDUCE)和模态叠加法(Mode Superposition)等方法。完全法采用完整的系统矩阵计算谐响应而不是缩减矩阵,矩阵可以为对称或非对称^[12],本文因结构简单而采用完全法谐响应分析。为了了解 PZT 压电片特性,本文首先对自由压电片进行谐响应分析,利用压电片的正逆压电效应同时作为驱动器和传感器,然后建立压电片-主体结构模型;考虑 6 种不同的裂缝工况,通过

横纵向对比分析板类结构损伤扩展对压电阻抗信号的影响。

1 自由 PZT 压电片模型分析

ANSYS 有限元分析软件具有强大的后处理工具,可以直接从分析结果中提取电导纳数据:通过 GUI: Time Hist Postpro > Add data > Reaction forces > Current flow,在任何一个电压自由度耦合部中选取节点序号最低的节点,提取节点反作用力解数据 AMPS-电荷值,计作 Q_p ,已知激励电压为单位电压,压电片电导纳的值 Y 为

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (1)$$

其中

$$Z = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Q_p} \quad (2)$$

式中: Z 为压电片电阻抗; f 为激励频率。得到电导纳后,可以提取出电导 G (电导纳实部)和电纳 B (电导纳虚部)。

本文选用方形压电片进行数值模拟,尺寸大小为 $0.015 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.00034 \text{ m}$;选用 SOLID5, keyopt(1)=3 耦合场六面体单元建立压电片三维模型。SOLID5 单元特性如表 1 所示。

表 1 SOLID5 单元特性

单元名称	简称/3D	节点数	节点自由度	备注
SOLID5	耦合场单元	8	每个节点最多有 6 个自由度,可为位移、电势、磁标量势、温度	支持循环对称(周期性)分析

分析时需要输入压电片各种参数:材料密度(ρ)、介电系数矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}$ (PERX、PERY、PERZ)、压电应力矩阵 \boldsymbol{e} 、弹性系数矩阵 \boldsymbol{C} 。其中, ρ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 采用 MP 命令输入; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 采用 TB,PIEZ 命令输入; \boldsymbol{C} 采用 TB, ANEL 命令输入,压电片各材料常数如表 2 所示。需特别注意的是,大多数已公布的压电材料的 \boldsymbol{e} 或 \boldsymbol{C} 矩阵都是基于 IEEE 标准按照 x, y, z, yz, xz, xy 的顺序,而 ANSYS 的输入数据是按照 x, y, z, xy, yz, xz 的顺序,即在输入数据时必须通过改变剪切项的行数据以转换到 ANSYS 数据格式。自由压电片模型如图 1 所示,划分单元尺寸大小为 0.05 mm ,在 z 方向两极施加 1 V 的激励电压,激励频率为 $20 \sim 30 \text{ kHz}$,荷载选用阶跃荷载,荷载步选取 100。由式(1)、(2)计算整理得到自由压电片电导纳实部 G ,结果如图 2 所示。

表2 压电片材料常数

$\rho/$ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\epsilon/(10^{-8} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1})$			$e/(10^{-10} \text{ m} \cdot \text{V}^{-1})$					$C/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$								
	ϵ_{11}^S	ϵ_{22}^S	ϵ_{33}^S	e_{13}	e_{23}	e_{33}	e_{42}	e_{51}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{23}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
7.45	1.75	1.75	2.14	-2.1	-2.1	5.0	5.8	5.8	15.0	-4.5	-5.7	19.0	-5.7	19.0	39.0	39.0	49.4

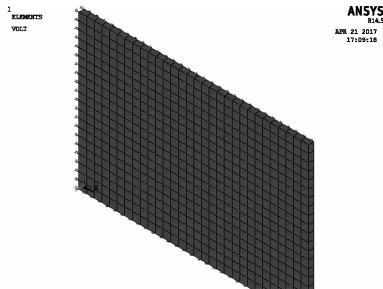


图1 自由压电片模型

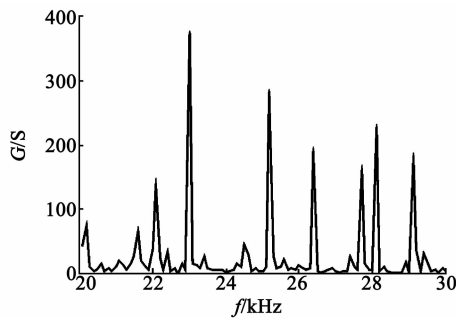


图2 自由压电片电导值

由图2可看出,压电片一共有11个模态峰值被激发。对于压电片虚部而言,模态峰值不易观测,因此,大多分析选用导纳实部数据对结构健康检测进行分析。

2 “PZT 压电片-主体结构”的 EMI 分析

1993年,Liang等^[13-16]就推导出压电材料-主体结构耦合系统中PZT驱动器的电导纳公式为

$$Y = j\omega \frac{\omega_A l_A}{h_A} \left(\epsilon_{33}^E - \frac{Z_S}{Z_S + Z_A} d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (3)$$

式中: ω 为圆频率; ω_A 、 l_A 、 h_A 分别为压电片的宽、长、高; Z_S 、 Z_A 分别为结构与压电片阻抗。

当压电片粘贴在主体结构上后,就已经确定压电系统,而PZT压电片材料自身的阻抗 Z_A 为常数,则 Z_S 是影响PZT驱动器电导纳的唯一因素。因此,对于发生损伤的主体结构,如果测得粘贴于表面PZT压电片的电导纳的变化,那么就间接地反应出了主体结构的损伤状态。

本文为了分析损伤位置距压电片距离 s 、损伤深度 d 对粘贴在板类结构的压电片电导纳信号的影响,设计了6种不同工况的结构损伤三维有限元模型,不同工况信息如表3所示。图3为 $s =$

0.05 m, $d = 0.002$ m 工况下的有限元模型。通过横纵向对比不同工况下的压电片电导纳信号的变化,分析钢板损伤位置及深度对压电片电导纳信号的影响。

表3 钢板损伤工况

工况	s/m	d/m
1	未损伤	0
2	0.05	0.002
3	0.15	0.002
4	0.15	0.004
5	0.15	0.008
6	0.20	0.002

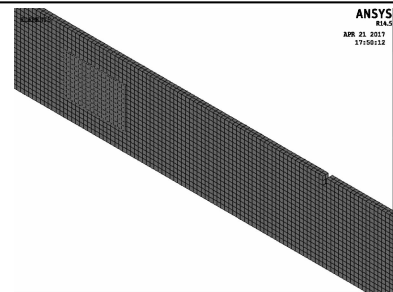


图3 工况2的有限元模型

建立主体结构钢板模型尺寸为 $0.3 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} \times 0.0014 \text{ m}$,钢板材料常数如表4所示。在距钢板左端0.05 m处,上、下表面粘贴两压电片,在两压电片上施加同步反向电压,进行谐响应分析。其中,压电片选用上文中分析的自由压电片模型,主体结构选用SOLID45单元,网格划分单元大小为0.001 m,采用完全法谐响应分析,激励频率为20~30 kHz,荷载步选用100,荷载形式选用阶跃式荷载,最后进行谐响应求解。

表4 钢板材料常数

材料	弹性模量 E/GPa	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^{-3})$	泊松比 μ
钢材	2100	7750	0.3

为了研究在 s 一定下, d 对压电片电导值的影响,对比了工况1、3、4、5情况下的压电片电导值,如图4所示。由图可看出,压电片电导信号对结构出现的损伤非常敏感,因为随着损伤的存在使结构的刚度减小,表现为压电片电导信号模态频率峰值向

左发生偏移,且损伤深度越大,偏移量就越大。

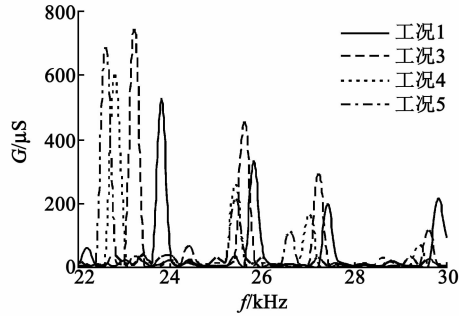


图 4 s 一定时,不同 d 下压电片电导值

通过对比工况 1、2、3、6 情况下压电片电导频谱信号(见图 5),可以得出在 d 一定下, s 对压电片电导频谱信号的影响。由图 5 可知,当 d 一定时, s 越小,频谱信号峰值就会越向左偏移,即损伤位置距离压电片越近,其电导频谱信号峰值就会越向左偏移。

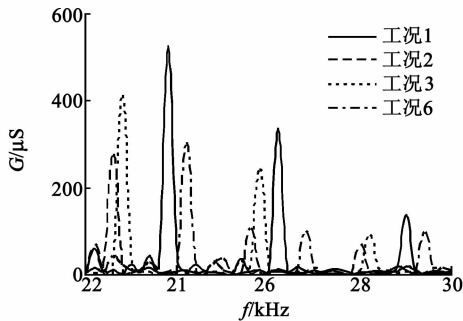


图 5 d 一定时,不同 s 下压电片电导值

3 结论

为了研究钢板损伤位置及损伤深度对 PZT 压电片电导频谱信号的影响,本文采用大型有限元软件 ANSYS 建立 6 种不同工况下的三维精确有限元模型。基于现有的电阻抗法对含有细小损伤结构的分析理论,通过 ANSYS 软件动力谐响应分析验证了损伤拓展对压电片电导频谱信号的影响,分析结果表明:

1) 通过对比工况 1、3、4、5 情况下压电片电导频谱信号,发现当损伤距压电片位置 s 一定时,随着损伤深度 d 的增加,使得钢板的刚度减小。表现为电导频谱信号峰值向左偏移,而共振峰值降低,且深度越大,偏移量就越大。

2) 通过对比工况 1、2、3、6 情况下压电片电导频谱信号,对于损伤深度 d 一定时,损伤距压电片位置 s 越小,电导频谱信号峰值越向左偏移,即损伤离压电片越近。表现为压电片电导频谱信号亦向左偏移。

基于结论得到的规律,对于如何精确识别结构损伤位置提供了一种新型、可实现的方法。通过合理布置压电片粘贴在主体结构上的位置,可达到识别定位损伤位置的目的。

参考文献:

- [1] LIANG C, SUN F P, ROGERS C A. An impedance method for dynamic analysis of active material systems [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994, 116 (1): 120-128.
- [2] GIURGIUTIU V. Active sensors for health monitoring of ageing aerospace structures [C]//AL: Proceedings Proc SPIE Conf on Smart Structures and Integrated Systems, 2000, 3985: 294-305.
- [3] HU Y H, YANG Y W. Sensing region of PZT transducers bonded to concrete [J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2007, 6529: 652907.
- [4] 蔡金标, 陈勇, 严蔚. 基于三维有限元分析的压电阻抗模型及其应用 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44 (12): 56-60.
CAI Jinbiao, CHEN Yong, YAN Wei. Three-dimensional finite element analysis based electromechanical impedance model and its application [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44 (12): 56-60.
- [5] ROGERS C A. Solid-state active sensing for in-situ health monitoring [C]//AL: Proceedings of the Society for Machinery Failure Prevention Technology Showcase, 1996.
- [6] AYRES J W, LALANDE F, CHAUDHRY Z, et al. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches [C]//AZ, Scottsdale: Proceedings of the SPIE Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing, 1996.
- [7] TSENG K K H, NAIDU A S K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material [J]. *Smart Materials & Structures*, 2002, 11(3): 317-329.
- [8] XU J F, YANG Y, SOH C K. Electromechanical impedance-based structural health monitoring with evolutionary programming [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2004, 17(4): 182-193.
- [9] RYTTER A. Vibration based inspection of civil engineering structures [M]. Denmark: Aalborg University, 1993.