

裂纹智能梁的三维有限元动力谐响应分析

王 炜, 严 蔚*, 李万春

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用面向结构健康监测应用的压电阻抗模型, 对粘贴有压电片的含裂纹梁结构采用三维有限元技术进行了高频压电阻抗谐响应分析. 利用通用有限元软件 ANSYS, 建立由压电片-粘结层-含裂纹主体梁结构组成的耦合系统的三维有限元模型. 并通过算例与振型叠加法和实验得到的结果进行了对比研究, 验证了该模型的有效性和准确性. 此外, 还考察了有限元单元尺寸、振动模态、裂纹深度以及粘结层厚度对压电阻抗信号的影响.

关键词: 压电阻抗; 结构健康监测; 有限元模型; 含裂纹梁

中图分类号: TU323.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0088-05

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和政府有关部门的重视, 从而对结构健康检测技术的要求也提高到了一个新的层次. 压电阻抗(EMI)法是利用压电材料的机电耦合效应的一种新型的检测技术. 相比以往的检测技术, 高频工作激励是其一大特点^[1-2], 正因为信号波长非常短, 所以对结构早期的细小损伤非常敏感. 此外, 一种优越的结构健康监测技术除了能得到结构早期微小的损伤信息外, 还需掌握结构损伤类型、损伤程度及损伤发展等信息. 但是鉴于实际工程中损伤的多样性和结构的复杂性, 只依靠测得的试验数据很难对结构损伤的具体特征进行正确判断, 此时就需要构建准确可靠的 EMI 模型.

许多学者在构建 EMI 理论模型方面作了大量的研究. Giurgiutiu 和 Zagari^[3]以及 Tseng 和 Wang^[4]基于振型叠加法建立了电阻抗(电导纳)与结构振型之间的解析关系式, 但这种模型的不足之处也非常明显. 其一, 没有考虑粘结层的作用, 采用了等效集中力模型来模拟压电片和主体结构之间的应力传递, 而大量研究已经表明压电片与主体结构是通过层间剪力来进行应力传递^[5-6]; 其二, 当

结构出现损伤时, 将很难得到显式的解析表达式. 严蔚等人^[6]在进行损伤结构的高频分析时, 将回传射线矩阵法引入到了 EMI 技术中, 在他们的模型中, 主体结构采用 Timoshenko 梁简化理论来研究, 粘结层采用剪滞模型, 即考虑 PZT-粘结层-主体结构之间的相互作用是通过层间剪应力来传递的. 但是, 此模型忽略了层间法向正应力的影响, 同时, 在高频激励作用下, 由于仅仅采用简化理论, 没有考虑一些次要共振模态(如梁的宽度方向的振动), 使得最后的计算结果可能预测不到某些模态频率点^[7]. 此外, 由于回传射线矩阵法仅能应用于简单的一维结构, 不能应用于二维和三维结构, 导致在实际应用中存在某种局限性.

目前一些研究成果已经表明三维有限元是构建 EMI 模型的有效方法^[7-8], 其原理是通过在有限元软件中建立 PZT-粘结层-主体结构组成的耦合系统的三维压电阻抗模型, 进行高频谐响应分析. 结构在周期荷载作用下会产生持续的动力响应, 结构的某些动力特性就可以利用此性质来预测. 谐响应分析用于确定弹性结构体系在承受按正弦规律变化的时域荷载时的稳态响应, 而不考虑瞬态响应, 再经过 Fourier 正变换得到频域响应, 频

收稿日期: 2012-06-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY12E08005); 浙江省重点科技创新团队项目(2011R09025-03).

第一作者: 王 炜(1985-), 男, 浙江上虞人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构健康监测. E-mail: 52402082@qq.com

*通讯作者: 严 蔚(1968-), 男, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: 结构健康监测. E-mail: yanwei@nbu.edu.cn

表1 压电片材料系数^[7]

密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	介电损耗 因子 δ	柔度系数 $S/(10^{-12}\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1})$						介电常数 $\varepsilon/(10^{-8}\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$			压电应变常数 $d/(10^{-10}\text{m}\cdot\text{V}^{-1})$		
		$S_{11}=S_{22}$	S_{12}	S_{33}	$S_{13}=S_{23}$	$S_{44}=S_{55}$	S_{66}	$\varepsilon_{11}^T = \varepsilon_{22}^T$	ε_{33}^T		$d_{31}=d_{32}$	d_{33}	$d_{15}=d_{24}$
7450	0.0185	15	-4.5	19	-5.7	39	49.4	1.75	2.14		-2.1	5	5.8

响曲线中会产生“峰值”响应——共振模式。在有限元谐响应分析中,可以利用 ANSYS 强大的后处理工具直接从分析结果中提取出电导纳。在任何 1 个电压自由度(Volt)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 Amp-电荷值,再根据已知激励电压(求解时施加的载荷)、压电片电导纳值就可以求得。尽管三维有限元 EMI 模型有很高的准确度,但在进行高频分析时,如果要达到一定的精度,对单元的尺寸有较高要求。笔者拟采用 ANSYS 11.0 软件进行高频情况下的三维有限元谐响应分析,从而构建应用于结构损伤检测的三维有限元 EMI 模型。

1 三维有限元模型与振型叠加法和实验的比较

1.1 三维有限元与振型叠加法的比较

基于振型叠加法的 EMI 模型,采用等效集中力来模拟压电片与主体结构的相互作用,对于压电片(PZT)粘贴于主体杆件上的情形,Giurgiutiu 和 Zagrai^[3]建立了电阻抗与结构振型之间的关系式:

$$Y = \frac{I_c}{V} = i\omega \frac{w_p l_p}{h_p} \left(\frac{d_{31}^2 \bar{E}_p Z_p}{Z_s + Z_p \phi \cot \phi} - d_{31}^2 \bar{E}_p + \bar{\varepsilon}_{33}^T \right), \quad (1)$$

$$Z_s = \frac{\rho_s A}{i\omega} \left\{ \sum_n \frac{[U_n(l_L + l_p) - U_n(l_L)]^2}{\omega_n^2 + 2i\xi_n \omega_n \omega - \omega^2} + \left(\frac{h}{2} \right)^2 \sum_k \frac{[W'_k(l_L + l_p) - W'_k(l_L)]^2}{\omega_k^2 + 2i\xi_k \omega_k \omega - \omega^2} \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式中, I_c 和 V 分别代表电流和电压; Z_s 和 Z_p 分别代表主体结构和压电片的阻抗; w_p , l_p 和 h_p 分别为压电片的宽度、长度和高度; $\phi = kl_p/2$, k 为波数; d_{31} , $\bar{\varepsilon}_{33}^T$ 和 $\bar{E}_p$ 分别为压电片的压电系数、介电系数和复弹性模量; ρ_s , A 和 ω_n 分别表示主体结构的质量密度、横截面面积和固有频率; U_n 和 W_k 分别表示轴向和弯曲振型; ξ 为阻尼比, l_L 表示压电片的左端点位置。当 2 片相同的压电片对称地粘贴在梁的上下表面,在相同且同相的电激励作用下,杆件进行轴向振动;在相同且反相的电激励作用

下,梁进行纯弯曲振动^[3-4]。从(1)式易得,只要压电片参数已知,且性能保持不变,与之相粘结的结构机械阻抗成为了唯一确定 PZT 的电阻抗因素。而电阻抗的任何变化就反映了结构的机械阻抗变化,也反映了结构中的损伤或其他物理变化。

假设 1 对压电片对称粘贴于等截面矩形梁上下表面,对压电片施加相同且反向电激励,梁的尺寸为 $120\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, PZT 大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 粘结剂厚度为 0.05 mm 。PZT 粘贴在梁长度方向正中间。PZT 的材料特性见表 1, 梁和粘结剂的材料常数见表 2。取阻尼比 $\xi = 0.01$ ^[6], 考虑自由边界条件。压电片选用耦合场单元 solid5, 为 8 结点六面体单元,每个结点有 UX 、 UY 、 UZ 和 $VOLT$ 4 个自由度。采用映射(Mapped)网格划分,单元尺寸为 1 mm 。粘结剂选用结构单元 solid45, 为 8 结点六面体单元,每个结点有 UX 、 UY 和 UZ 3 个自由度,单元尺寸为 1 mm 。主体梁结构也选用 solid45 六面体单元,单元尺寸为 1 mm 。

表2 钢梁和粘结剂的材料系数^[7]

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
钢梁	7 750	210	0.3
粘结剂	1 000	5.9	0.4

从图 1 可以看出在低频阶段,2 种方法的电导曲线比较吻合,而在较高频段,有限元方法对应的频率峰值点较振型叠加法向左偏移。这是因为振

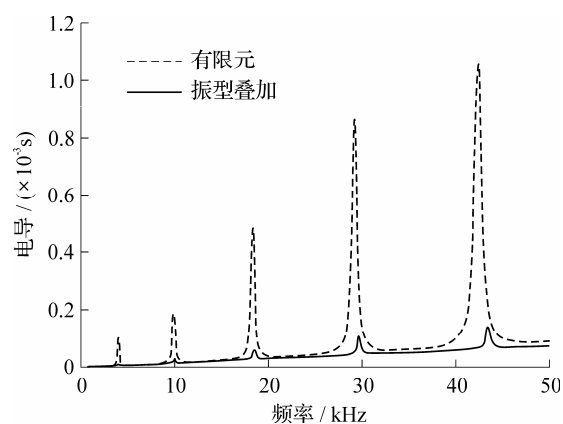


图1 有限元法和振型叠加法的对比研究

型叠加法采用了欧拉梁理论, 仅仅考察了纯弯曲模态, 其他方向的振动模态不予考虑(即其他方向的刚度如剪切刚度为无穷大), 所以结构的整体刚度比采用三维有限元要大. 同时, 该有限元模型考虑了压电片、粘结剂和梁三者之间的耦合作用, 更接近实际情况.

1.2 三维有限元与实验的比较

实验钢梁试件尺寸为 $400\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 压电片尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 一压电片粘贴于钢梁正中间, 通过导线与阻抗分析仪相连, 部分实验设备如图 2 所示.

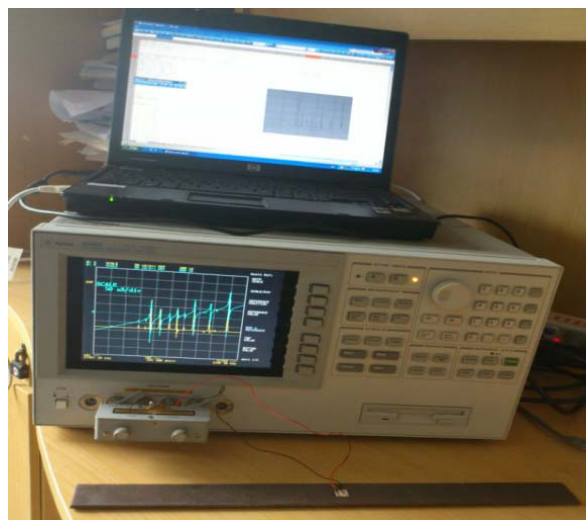


图 2 钢梁测试的部分实验设备

图 3 是有限元计算与实验测试得到的电导图, 通过比较我们可以看出, 在频率 $0 \sim 7\text{ kHz}$ 范围内, 有限元方法能预测到所有的频率峰值点, 计算结果基本与实验结果相符合, 但图中也可以看出, 有限元模型与实验结果还是存在一定的偏差, 这是

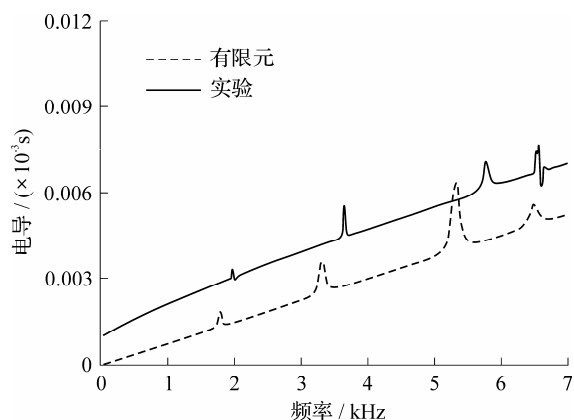


图 3 有限元结果与实验结果的对比

由于实验条件、现场情况等因素与理论模型有一定的差异造成的.

2 三维有限元 EMI 模型的参数

2.1 有限元单元尺寸

众所周知, 有限元单元尺寸对最后计算结果会有明显影响, 尤其在高频频域内. 现通过以下算例来探究此问题, 假设梁尺寸为 $120\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 压电片大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 粘结剂的厚度为 0.05 mm . 压电片粘贴在梁的正中间. 各材料系数见表 1 和表 2, 取阻尼比 $\xi = 0.01$ ^[6], 考虑自由边界条件. 压电片与黏结剂的单元选取同上, 主体梁结构分别选用 solid45 六面体单元尺寸 0.5 mm , 1.0 mm , 2.0 mm 和 3.0 mm .

从图 4 中可以看到, 在低于 15 kHz 的频率范围内, 单元尺寸的大小对计算结果影响很小, 但在频率较高的时候, 单元尺寸的大小对计算结果影响比较大. 而且, 从图中还可以看出, 梁结构取单元尺寸分别为 0.5 mm 和 1.0 mm 时, 对计算结果不再有明显的变化. 所以, 在进行数值分析时, 主体结构单元取 1.0 mm 基本能满足分析精度的要求, 同时还考虑到了计算机效率以及内存和储存空间的要求. 这表明采用有限元技术进行结构高频分析时应注意单元划分问题, 在较高的频域内, 需要划分较小的单元才能取得较为可靠的计算结果. 虽然这会导致计算效率的降低, 但随着计算机技术的发展, 此问题将能得到很好的解决.

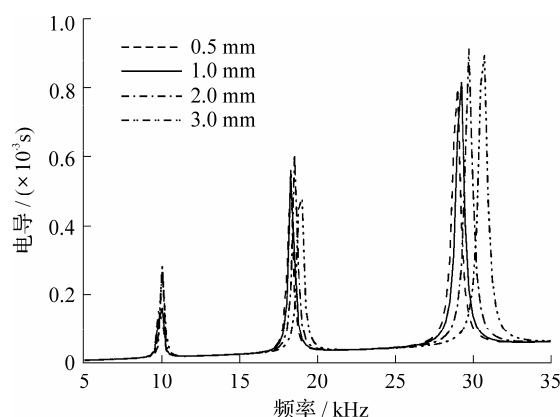


图 4 不同单元尺寸的电导

2.2 不同振动模态

当 1 对压电片对称的贴在梁的上下表面, 对压电片施加相同且同向的电激励时, 梁将产生轴向

振动^[3-4], 当一对压电片对称的贴在梁的上下表面, 对压电片施加相同且反向的电激励时, 梁将产生纯弯曲振动^[3-4]; 当梁表面只粘贴一压电片的时候, 梁将同时产生轴向振动和弯曲振动。

从图5可以看到, 在0~50 kHz的频段内, 弯曲振动激发的模态要比轴向振动激发的模态多, 纯弯曲振动有5个, 而轴向振动只有1个, 这是因为从数值上, 讲截面惯性矩要远远小于截面面积, 所以在一定频段内, 各阶弯曲模态频率的间隔要比轴向振动模态的间隔小, 也即弯曲振动模态更为密集, 这与相关的实验结果是一致的^[10]。在工程实际应用中, 因为共振频率包含了结构的振动特征信息, 在检测频段内保持一定数量的频率峰值点是必需的^[1]。所以, 激发弯曲振动模态更适合应用于压电阻抗结构健康监测技术。从图中还可以看出, 在单一压电片的激励下, 能同时估测到轴向振动和纯弯曲振动模态。

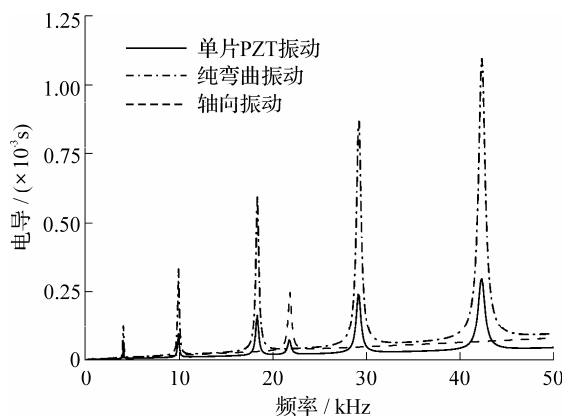


图5 不同振动模式下的电导信号

2.3 不同裂纹深度

现考察不同裂纹深度对压电阻抗信号的影响。在距梁左端25 mm处模拟一处宽度为1 mm的裂纹。从图6可以看出, 随着裂纹深度的加大, 模态频率向左偏移, 峰值下降, 这是由于裂纹的存在和加深, 使梁的整体刚度有所下降。也就是说, 损伤越大, 模态频率越向左偏移。同时, 还可以看到在裂纹深度4 mm时, 有次生模态产生, 这是由局部损伤引起的^[11]。所以, 三维有限元 EMI 模型能有效检测到结构的损伤, 并且对损伤非常敏感。

2.4 不同粘结层厚度

考察黏结层厚度对压电阻抗信号的影响。分别取粘结剂厚度为0.05 mm、0.10 mm和0.15 mm。

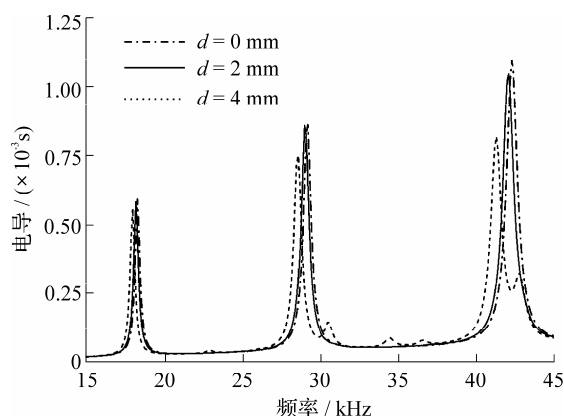


图6 对应于不同裂缝深度的电导信号

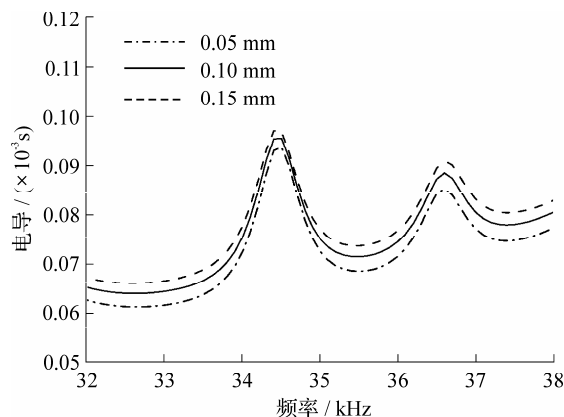


图7 对应于不同粘结层厚度的电导信号

图7表明不同的粘结层厚度对电导值有明显的影响, 随着粘结剂的厚度增加, 电导曲线向上产生一定的整体平移。但是与裂纹的产生和增大对压电阻抗信号的影响不同, 没有造成频率峰值点的左右偏移, 这是因为粘结层厚度对结构整体刚度几乎没有影响。

3 结语

采用三维有限元方法建立了压电片-粘结层-梁结构这一耦合系统的三维有限元 EMI 模型, 与传统的振型叠加方法和实验结果进行了比较分析, 验证了该模型的准确性和有效性。还利用了三维有限元模型进行了相关的参数研究。通过主体结构不同单元尺寸的探讨分析, 说明高频振动分析对单元划分提出了更高的要求; 通过不同振动模态的算例分析, 表明在一定频段内弯曲振动模态频率比轴向振动模态更为密集。所以, 在实际工程中, 激发弯曲振动模态更适合应用于结构的损伤识别; 通过不同粘结层厚度的算例分析, 反映了界

面粘结状况对压电阻抗信号有一定的影响;最后,数值计算还表明文中建立的三维有限元模型可用于结构健康监测。

参考文献:

- [1] Park G, Inman D J. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2007, 365:373-392.
- [2] 王丹生, 朱宏平. 基于波传播和阻抗特性的裂纹梁损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(3):186-189.
- [3] Giurgiutiu V, Zagari A N. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 124:116-125.
- [4] Tseng K K, Wang L S. Impedance-based method for nondestructive damage identification[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(1):58-64.
- [5] Giurgiutiu V. Tuned lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16:291-305.
- [6] 严蔚, 袁丽莉. 回传射线矩阵法含裂纹框架的电阻抗模型[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2): 212-216.
- [7] 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): 2342-2347.
- [8] Yang Y W, Lim Y Y, Soh C K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: II. Numerical verification[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(3):1-12.
- [9] Annamdas V G M, Soh C K. Three-dimensional electro-mechanical impedance model for multiple piezoceramic transducers-structure interaction[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21(1):35-41.
- [10] Yan W, Li W C, Yuan L L. Effects of ambient conditions on the impedance-based health monitoring technique[C]. 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China, 2011:2120-2123.
- [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: 505-528.

Three-dimensional Finite Element Harmonic Response of a Cracked Smart Beam

WANG Wei, YAN Wei*, LI Wan-chun

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: An electro-mechanical impedance (EMI) model is presented in this paper for structural health monitoring purposes. The high-frequency EMI harmonic response of a cracked beam with surface bonded piezoelectric patches is investigated by employing the three-dimensional finite element method (FEM). The three-dimensional FEM model of the coupled structural system consisting of PZT patches, bonding layer and cracked beam is established using the commercial software ANSYS. A comparison study with the mode superposition method and experimental results is adopted to validate the effectivity and accuracy of the proposed EMI model. Furthermore, the effects of finite element size, dynamic modes, crack depths and the thickness of bonding layer on EMI signatures in the high frequency range are also discussed.

Key words: EMI; structural health monitoring; finite element model; cracked beam

(责任编辑 章践立)