

# 基于压电阻抗法的结构损伤检测技术进展

张玉祥, 张 鑫, 陈家照, 李知佳  
(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘 要:** 为了实现结构损伤的快速在线检测, 研究基于压电阻抗(EMI)法的无损检测技术十分必要。总结了国内外在 EMI 方面的研究进展, 全面概括了应用 EMI 的单位和个人在此方面取得的成果, 并介绍了基于 EMI 检测损伤的经验及成熟度, 对后续开展基于 EMI 的结构检测具有指导意义。

**关键词:** 损伤检测; 压电阻抗; 脱粘

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)01-0069-06

## Development on Detecting Technique of Structure Damage Based on EMI

ZHANG Yu-xiang, ZHANG Xin, CHEN Jia-zhao, LI Zhi-jia  
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to resolve the problem of the rapid on-line detection of structural damage, studying the research development of nondestructive testing technology based on the EMI is necessary. This paper systematically summarizes the research progress of EMI method in recent years at home and abroad, comprehensively sums up the achievements achieved by units and individuals who apply the EMI, and introduces the experience and maturity of damage detection based on EMI in various damage cases, which will have guiding significance on the structure testing based on EMI hereafter.

**Key words:** Damage detecting; EMI; Debonding

无论是民用的飞机、桥梁、火车、汽车等, 还是军用的火箭、导弹、航母、潜艇等, 其安全性和可靠性都非常重要。在这些结构长期服役的过程中, 由于结构载荷、温度载荷以及人为因素等的作用, 结构可能出现不同程度的损伤或破坏, 从而导致安全性和可靠性降低, 甚至造成重大灾难性事故<sup>[1]</sup>。为了及时掌握结构的损伤状况, 需对结构件进行实时在线检测。

### 1 压电阻抗技术介绍

用于结构健康监测的压电阻抗(EMI)技术是利用全局振动理论来检测结构局部损伤的新技术。其基本原理是<sup>[2]</sup>: 结构损伤引起结构机械阻抗的变化, 利用压电材料的机电耦合效应, 当对主体结构粘结的

压电片施加交流电场时, 压电材料由于逆压电效应产生机械振动, 并带动主体结构产生振动; 主体结构的机械振动又传递到压电材料上, 通过正压电效应使压电片产生电响应, 表现为电阻抗的变化, 在压电材料的电阻抗信号中就包含结构损伤状态的信息, 通过与结构在无缺陷时压电片的电阻抗谱比较, 可以确定结构内部损伤发展情况, 由此可对结构进行健康监测与损伤诊断。该技术最初被应用于尖端武器运载工具的研制并取得很大成功, 目前已在各个工业部门得到广泛应用并逐步发展成一种常规方法。

EMI 技术的优点有: ①采用的工作频率较高(10 kHz~2 MHz, 即为 PZT(压电陶瓷)的驱动电场频率), 故其对初始阶段的损伤及结构整体的微小变化非常敏感, 便于及时采取有效措施。②敏感范围限于压电陶瓷附近的一定区域, 远场作用将被隔离, 使之可准确地识别损伤位置。③压电陶瓷在正常工作条件下呈现出良好的性质: 线性范围大、反应

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275517, 51105364)

作者简介: 张玉祥(1963—), 男, 博士生导师, 主要从事动力系统检测与故障诊断、系统综合性能分析与评估方面的研究工作。

快、重量轻、效费比高、长期稳定性好。④既可作为驱动器也可作为传感器<sup>[3]</sup>。

## 2 EMI 检测理论模型

EMI 检测理论建模与分析是 EMI 技术应用于损伤检测的理论基础,很多学者对 EMI 检测模型开展了研究。1994 年美国弗吉尼亚工学院和州立大学的 LIANG 等<sup>[4]</sup>首次建立了压电片电阻抗与被测结构机械阻抗的解析关系,即一维结构的 EMI 检测模型。随后 ZHOU 将 LIANG 的模型扩展到二维模型<sup>[5]</sup>,但利用该二维模型很难从试验或计算得到的电阻抗谱(EMI 信号)中提取反映结构振动特性的机械阻抗。BHALLA 等<sup>[6]</sup>提出了有效阻抗的概念,按照有效阻抗建立的二维检测模型便于提取被测结构的机械阻抗,更适合于损伤检测。当压电片厚度较大时,二维模型不能很好地预测 EMI 响应信号,ANNAMDAS 等<sup>[7]</sup>提出了考虑 PZT(钛锆酸铅陶瓷)三维振动的压电阻抗模型。以上几种模型建立了压电片的电导纳与结构机械阻抗的关系,从压电片的电阻抗变化就能判断结构机械阻抗发生了改变,即结构可能出现了损伤,但是并不能得出具体损伤类型、损伤位置和损伤物理参数。为了通过反问题求解的方法得到结构具体的损伤物理参数,有学者通过对特定对象进行研究,建立了包含结构损伤参数的压电阻抗检测理论模型。王丹生等<sup>[8]</sup>考虑单压电片驱动下钢梁的纵向振动和弯曲振动,得到了两端自由的压电智能梁的机械阻抗解析式,由此可以建立压电片电阻抗信号与结构的物理参数之间的解析模型。严蔚等<sup>[9-11]</sup>通过将含损伤的杆、梁结构处理为节段均匀结构,采用传递矩阵法和回传矩阵法建立了含损伤参量的压电阻抗模型。徐福后等<sup>[12]</sup>将压电片的横向和纵向惯性力均加以考虑,采用了传递矩阵法建立了含裂纹损伤的 Timoshenko 梁结构检测模型。上述方法的特点是,即使在较高频率范围时仍能保持较高的计算精度,但目前只能应用于一维结构,对于板壳结构还有待进一步研究,为此很多学者采用近似解析法:XU 等<sup>[13]</sup>利用 p-Ritz 法建立了梁、板结构的含损伤参数的压电阻抗检测模型;YANG 等<sup>[14]</sup>采用 p-Ritz 法建立了薄壳结构损伤检测的压电阻抗模型。采用 p-Ritz 法在频率较低(小于 20 kHz)时,模型预测与试验较吻合,随着频率增大,预测精度随之降低,另外,p-Ritz 法不适用于复杂弹性边界条件下的结构。徐福后

等<sup>[15]</sup>研究了适用于任意弹性边界条件下的势函数,利用 Rayleigh-Ritz 法建立了任意边界条件下损伤梁、板结构的 EMI 检测模型。以上研究主要集中在梁、杆、板、壳结构,对复杂结构还不能通过解析的方法得到含损伤参数的检测模型。

复杂结构的压电阻抗建模分析通常采用数值方法。YANG 等<sup>[16]</sup>通过有限元软件 ANSYS 进行了压电阻抗响应分析,验证了有限元方法分析的可行性和有效性。蔡金标等<sup>[17]</sup>建立了由压电片-黏结层-主体结构组成的耦合系统的三维有限元模型,数值模拟结果与试验结果吻合。张玉祥等<sup>[18]</sup>利用有限元方法建立了复杂橡胶结构的有限元模型,并对橡胶老化过程进行了仿真研究,结果表明 EMI 技术可以用于橡胶老化监测。虽然有限元方法可以对复杂结构进行 EMI 响应分析,但当频率较高时,需要将网格划分很细,导致计算量大、耗时长。采用解析法与数值法相结合的方法对复杂结构 EMI 响应进行分析,不需要对整个压电智能结构进行有限元分析,只需要对其中的被测结构进行有限元分析,因而显著地减少了计算量、提高了计算效率,该方法已经成功应用于多孔板结构压电阻抗法建模与分析<sup>[19]</sup>,为复杂结构的损伤检测模型的建立和快速分析提供了可能。

## 3 结构损伤的识别

航空航天单位对复合材料的无损检测都十分重视,其中重要的一项就是材料的界面脱粘损伤检测<sup>[20]</sup>。常用的界面脱粘检测技术包括超声波检测、X 射线检测、激光检测、CT 检测、红外和微波等检测方法<sup>[21]</sup>,甚至有些单位用到了中子探测技术,但由于中子探测技术要求较高、条件苛刻、费用昂贵、操作不便,因此很少普及。

目前最常用的超声波检测方法仅能用于多层界面的表层界面检测而不能检测深层缺陷,且该技术可检测的缺陷较少,不能全面反映结构的质量状况,也无法实现在线检测。X 射线检测对于操作人员要求较高,同时设备体积庞大、价格昂贵,另外 X 射线属于高能射线,对人体也有极大危害。CT 检测对于剥离度小于 0.01 mm 的脱粘检测比较困难<sup>[22]</sup>。激光全息检测技术应用的主要障碍是物体的刚性运动和温度对检测的影响,而我国在这方面的技术尚不成熟,设备稳定性和实时性都比较差,还处于实验室阶段<sup>[23]</sup>;国外的技术虽然先进,但发达国家的军

工技术对我国是封锁的。红外检测技术在检测粘接结构方面,对面板的厚度和材料的导热系数都有一定的要求,面板太厚或材料的导热系数太高都会影响检测灵敏度,因此在检测某些粘接结构时受到了限制<sup>[24]</sup>。微波检测能实现非接触测量,能快速连续工作,设备也较简单,但是由于集肤效应,微波检测不能深入到金属或其他导电材料,因而不能检测以金属或碳纤维等导电材料为外层的复合结构的内部缺陷;再者,微波检测局部缺陷的灵敏度还被微波的波长限制,小于波长的缺陷检测不出来<sup>[25]</sup>。

王召巴等利用相控阵技术实现了不等厚金属非金属复合构件的脱粘检测。他通过板波诱发波超声检测技术,采用一收一发两个探头在金属(钢)基体的外侧检测内部多界面脱粘,有效解决了声波穿过高声阻抗钢板进入低声阻抗非金属材料时呈现出的反射率大、透射率小的问题<sup>[26]</sup>。屈文忠等采用试验与仿真相结合的方法,研究了钢板结构易出现的损伤状况,初步建立了导纳谱与损伤间的关系;并进行铝板结构受冲击时的损伤检测,识别出了冲击的大致位置。苏众庆将压电片深埋于高铁每节车厢转向架中,用超声导波的方法实现在线检测疲劳或应力裂纹。美国 Giurgiutiu 教授采用压电片进行了多项试验,为今后的各种复杂结构损伤检测奠定了基础。

#### 4 基于 EMI 技术的损伤识别

如何通过实测的电阻抗信号谱准确识别损伤位置和损伤程度一直是压电阻抗法研究的重点内容。

有学者在含损伤参数的 EMI 检测模型的基础上,结合实测 EMI 信号谱,通过反问题求解的方法得到了结构的损伤物理参数:XU<sup>[13]</sup>等结合实测的 EMI 信号谱,利用遗传算法求解出相应的物理损伤参数值,徐福后等<sup>[27]</sup>在建立含损伤参数的物理模型的基础上,采用粒子群算法从实测 EMI 信号谱中反向求解出结构的物理参数。上述基于模型的损伤识别方法可以准确地识别出结构损伤参数,但由于对含损伤参数的 EMI 检测模型研究较少,目前只能用于简单结构处于特定边界条件时的损伤检测。

针对复杂结构系统,EMI 技术通常需要结合有限元方法,对损伤物理参数进行定量识别,NAIDU 等<sup>[28]</sup>采用 EMI 技术和有限元分析相结合的方法用高阶模态进行了损伤位置识别研究。TSENG 等<sup>[29]</sup>提出了一种参数优化算法更新结构的有限元模型,并结合 EMI 技术进行损伤定位。但是根据所谓的

“大拇指法则”(即一个波长范围内至少需划分 7~10 个单元才能获得有意义的结果),在高频分析中,需要划分大量的单元,导致节点数目增多,在损伤识别过程中,需要多次迭代计算,每计算一次,都需要对结构重新离散,从而极大影响损伤识别效率,如何提高复杂结构系统的定量损伤识别效率需要进一步研究。

上述方法需要建立解析模型或者有限元模型,对于实际的复杂结构精确建模通常比较困难,为此有不少学者对不依赖具体物理模型的损伤识别方法进行了研究。LOPES 等<sup>[30]</sup>采用阻抗法结合人工神经网络分析在损伤定量识别方面作了一些探讨,通过试验验证能够较准确识别损伤程度和多处损伤。危玉蓉等<sup>[31]</sup>采用 BP 神经网络和 EMI 技术相结合的方法成功检测了铝板中的裂纹。沈星等<sup>[32]</sup>将 BP 神经网络应用于 EMI 检测技术中,利用训练后的 BP 神经网络快速并精确地判断出松动的螺栓位置。采用神经网络方法可以识别结构损伤的位置和程度,但针对不同的结构、不同的损伤都需要有大量样本,而实际结构的样本往往不易获得,因此阻碍了该方法在基于 EMI 技术的损伤识别中的广泛应用。

还有一种常用的方法是通过分析损伤前后压电阻抗信号谱的偏离程度对损伤程度进行判别,偏离度通常采用数学统计量衡量,统计量越大,表示损伤越严重,常用的统计量包括均方差<sup>[33]</sup>(RMSD)、平均绝对偏差<sup>[34]</sup>(MAPD)、协方差<sup>[35]</sup>(COVARIANCE)、相关系数<sup>[36]</sup>(CCD)等,TAWIE 等<sup>[37]</sup>对上述几种统计量进行了比较研究。采用这种方法简单易于操作,能快速判断结构损伤,却不能得到结构损伤的具体物理参数,在判别损伤发展趋势时也有可能得到与事实相违背的结论,这通常与所选取的检测激励频率是否合适有关,采用不同的激励频率获得的压电阻抗信号谱进行损伤程度判别有可能得到不同的结果,只有采用对损伤敏感的激励频率才能够正确判别损伤发展趋势,如何确定对损伤敏感的频率还需要进一步研究<sup>[36-38]</sup>。

快速准确地判别结构有无损伤、损伤发展趋势<sup>[39]</sup>,高效地定量识别复杂结构损伤参数,将损伤识别方法推广应用于实际工程结构是基于 EMI 技术的损伤识别的发展方向<sup>[40]</sup>。

#### 5 基于 EMI 的结构脱粘损伤研究进展

在航空航天领域,CHAUDHRY 等<sup>[41-42]</sup>将压



电陶瓷驱动器/传感器粘贴在飞机的尾部,应用压电阻抗法对远场损伤和局部损伤进行了检测,研究表明压电阻抗法对远场损伤不敏感,但能够有效地检测局部区域小损伤。蔡金标等通过建立有限元模型,研究了在测量结构脱粘时粘贴层特性的变化对压电信号阻抗测量的影响。SEELEY 等<sup>[43]</sup>通过试验研究了驱动器部分脱粘对智能复合材料层合结构响应的影响。TONG 等<sup>[44]</sup>提出了一个含有部分脱粘的压电智能梁模型,并分析了脱粘对结构驱动和传感的影响。SUN 等对闭合回路下压电驱动器脱粘进行了研究,发现控制结构很容易发生脱粘并且驱动器/传感器的脱粘会非常明显地降低控制效率。郑世杰<sup>[45]</sup>提出了一个新的加强假定应变压电固体单元,采用相同坐标值但不同节点号的方法模拟脱层,利用该单元分析了传感器、驱动器脱开对结构动力学特性的影响。周勇等<sup>[46]</sup>提出了一个压电层板矩形单元,对压电驱动器和基体部分脱粘后对结构变形的影响进行了初步的研究。YAN 等通过内聚力单元研究了 PZT 薄膜和基体之间的界面脱粘<sup>[47]</sup>。考虑到在机械载荷和电载荷共同作用下,界面脱粘可能会扩展,导致压电片传感精度或控制效率进一步降低,甚至完全失效,大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室白瑞祥等采用三维有限元模型,建立了基于虚裂纹闭合技术的界面断裂单元,并且通过有限元软件 ABAQUS 的用户自定义单元 UEL 功能实现,对部分脱胶的压电复合材料梁在电压作用下的脱胶前缘的能量释放率进行了模拟分析,所得结论对界面脱粘损伤扩展模式的判定提供了参考依据<sup>[48]</sup>。张玉祥等建立了基于压电阻抗法的脱粘损伤检测模型,并利用小型检测仪初步对于普通金属的脱粘情况进行了试验,试验效果良好;艾春安等也对固体火箭发动机粘接结构研究较为深入,用不同方式开展了对结构黏接质量的研究<sup>[49]</sup>。

## 6 发展前景及应用展望

根据 EMI 技术的原理可知,其可检测范围包含裂纹、疏松、气泡、砂眼、孔洞、夹渣、脱粘和未焊透等缺陷,是在不损坏材料和制品情况下进行内部和表面的各种缺陷检测及材料评价的一种无损检测技术。它的应用将会大大提高结构损伤检测的效率,使检测设备朝着小型化、图像化、智能化、清洁化的方向发展,并推广应用至工业领域的多层结构和复

合材料的损伤在线检测。结合其他方法,如量子粒子群算法(QPSO)使检测脱粘等结构损伤的精度得到进一步提高。

(1) 选择检测设备,寻找最合适的元器件、最优化的传感器布置,如将现在的 AD5933 更换为开发板,扩大检测频域范围。

(2) 加入环境因素,如温度、湿度、光照等,确保恶劣复杂环境时的适应性。

(3) 改进检测方法,实现由现场接触式向远程监控式的转变。

(4) 优化检测模型,使复杂的大型系统中任一损伤都能得到及时、敏感、准确检测。

## 参考文献:

- [1] 李宏男.结构健康监测[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
- [2] 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.
- [3] GYUHAE P, HARLEY H C, DANIEL J I. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures [J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 2001,30:1463-1474.
- [4] LIANG C, SUN F P, ORGERS C A. Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(1):12-20.
- [5] ZHOU S W, LIANG C, ROGERS C A. An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1996,118(3):323-331.
- [6] BHALLA S, SOH C K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. I. Modeling [J]. Journal of Aerospace Engineering,2004,17(4):154-165.
- [7] ANNAMDAS V G M, SOH C K. Three-dimensional electromechanical impedance model for multiple piezoceramic transducers-structure interaction [J]. Journal of Aerospace Engineering,2008,21(1):35-44.
- [8] 王丹生,朱宏平,金柯,等.压电智能梁的阻抗分析与损伤识别[J].固体力学,2008,29(4):402-407.
- [9] YAN W, LIM C W, CHEN W Q, et al. Modeling of EMI response of damaged Mindlin-Herrmann rod[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(12):1355-1365.
- [10] 严蔚,陈伟球,林志华,等.基于高频电阻抗信号的结

- 构损伤监测[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(1):6-11.
- [11] 严蔚,袁丽莉.基于回传射线矩阵法的含裂缝智能梁的动态特性[J].振动与冲击,2010,29(6):109-114.
- [12] ZHANG Yu-xiang, XU Fu-hou, CHEN Jia-zhao, et al. Electromechanical impedance response of a cracked timoshenko beam[J]. Sensors, 2011,7:7285-7301.
- [13] 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.
- [14] YANG Y, HU Y. Electromechanical impedance modeling of PZT transducers for health monitoring of cylindrical shell structures[J]. Smart Materials and Structures, 2008,17(1):11-12.
- [15] ZHANG Yu-xiang, XU Fu-hou. Electro-mechanical impedance modeling for health monitoring of a damaged thin plate[C]. IEEE The Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai, 2011,1:22-28.
- [16] YANG Y, 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 [J]. Numerical Verification Smart Mater Struct, 2008, 17:35-37.
- [17] 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.
- [18] ZHANG Yu-xiang, XU Fu-hou. Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online aging monitoring of rubber [J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2012,18(8):1101-1109.
- [19] ZHANG Yu-xiang, XU Fu-hou, ZHOU Yun. Electromechanical impedance response of a thin plate with holes[J]. Smart Materials and Structures,2011, 2:22-28.
- [20] ZWIJNENBURG A, APAOG K, REITSMA H J. On the possibility of detecting case/liner and liner/propellant debond in a rocket motor by means of the ultrasonic multiple reflection pulse echo technique[J]. Propellant, Explosives, Phyrotechnics, 1983, 8: 40-45.
- [21] 吴庆刚.多界面脱粘超声检测技术研究[D].太原:华北工学院,2002.
- [22] SAWANT A M, HERBERT Z, DIANE M, et al. An adaptive median filter algorithm to remove impulse noise in X-ray and CT images and speckle in ultrasound images[J]. SPIE, 1999,36:1263-1274.
- [23] LI M X. Principles of an acoustic impedance method for detection and location of non-bonds in adhesive-bonded multilayered joints [J]. NBT International, 1982,15:129-176.
- [24] GNYOTT C H. The ultrasonic vibration characteristics of adhesive joints [J]. J. A. S. A., 1988,83(2):632-640.
- [25] 李媛,王召巴.不等厚金属非金属复合构件的相控阵超声脱粘检测技术研究[D].太原:中北大学,2008.
- [26] 王召巴,金永.复合材料多界面脱粘超声检测技术[J].太原师范学院学报,2007,2(1):45-47.
- [27] ZHANG Yu-xiang, XU Fu-hou. Vibration-based crack identification of generally supported beam structures[J]. Advances in Structures, 2011, 163: 2723-2726.
- [28] NAIDU A, SOH C K. Identifying damage location with admittance signatures of smart piezo-transducers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004,15:627-642.
- [29] TSENG K K, WANG L S. Impedance-based method for nondestructive damage identification[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,13(1):58-64.
- [30] LOPES V J, PARK G, CUDNEY H H, et al. Impedance based structural health monitoring with artificial neural network [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2000,11(3):206-214.
- [31] 危玉蓉,郭少华.基于神经网络方法的 EMI 结构损伤识别[J].四川建筑,2010,30(3):76-79.
- [32] 沈星,吕娟,章建文,等.基于压电阻抗技术和 BP 网络的结构健康监测[J].南京航空航天大学学报,2010, 42(4):418-422.
- [33] SEUNGHEE P, KIM J W, CHANGGIL L, et al. Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures [J]. NDT&E International, 2011,44:232-238.
- [34] RUCKLI J L, CAMELIO J A. Damage detection in assembly fixtures using non-destructive electromechanical impedance sensors and multivariate statistics[J]. Int J Adv Manuf Tech, 2009,42(9/10):1005-1015.
- [35] MIN Ji-young, PARK S, YUN C B. Impedance-based structural health monitoring using neural networks for autonomous frequency range selection[J]. Smart Mater Struct, 2010,19:10-11.
- [36] HAI Y Q, LI J C, LI L. Quantitatively, characterizing damages on steel beams by using PZT impedance method[C].[S.l]:[s.n.],2010.
- [37] TAWIE R, LEE H K. Monitoring the strength

- development in concrete by EMI sensing technique construction and building materials[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(9):1746-1753.
- [38] YANG Yao-wen, BAHADOR S D. Sub-frequency interval approach in electromechanical impedance technique for concrete structure health monitoring[J]. Sensors, 2010, 10:11644-11661.
- [39] KIM M K, KIM E J, AN Y K, et al. Reference free impedance based crack detection in plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330:5949-5962.
- [40] AN Yun-kyu, HOON S. Integrated impedance and guided wave based damage detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28:50-62.
- [41] CHAUDHRY Z, JOSEPH T, SUN F, et al. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches[C]. [S.l]:[s.n.], 1995.
- [42] SEELEY C E, CHATTOPADHYAY A. Modeling of adaptive composites including debonding [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(12):1823-1843.
- [43] TONG L, SUN D C, ATLURI S N. Sensing and actuating behaviors of piezoelectric layers with debonding in smart beams[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(4):713-723.
- [44] SUN D C, TONG L, ATLURI S N. Effects of piezoelectric sensor/actuator debonding on vibration control of smart beams[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(50/51):9033-9051.
- [45] ZHENG Shi-jie. Finite element analysis of smart structures with piezoelectric sensors/actuators including debonding [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2004, 17(4):246-250.
- [46] 周勇, 王鑫伟, 孙亚飞, 等. 压电复合材料层合板弯曲变形及脱粘损伤的有限元分析[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(2):180-184.
- [47] YAN Ya-bin, SHANG Fu-lin. Cohesive zone modeling of interfacial delamination in PZT thin films [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(13):2739-2749.
- [48] 白瑞祥, 王亮, 陈浩然. 界面脱粘压电复合材料层合梁能量释放率研究[C]. [S.l]:[s.n.], 2010.
- [49] 艾春安, 刘瑜, 赵文才, 等. 固体火箭发动机结构粘接质量的声-超声检测[J]. 无损检测, 2009, 31(12):974-976.

(上接第9页)

注意的是, 采用标准木校核时, 木材阻力仪钻入点应距离标准木边缘 20 mm 以上, 并与已有探针路径相距应不小于 10 mm, 以免发生与已有路径的重叠导致曲线出现显著偏差。

#### 4 结语

(1) 提出了木构件检测的一般规定和缺陷评定方法, 为规范钻入阻抗法进行木材缺陷检测提供了必要的技术支撑。

(2) 通过针叶材、阔叶材和复合材的对比试验, 确定了国产意杨作为精度校核的标准木, 并规定了采用标准木进行木材阻力仪校准的基本方法。

#### 参考文献:

- [1] FRANK R. Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from resistograph micro-drillings[R]. [S.l]:[s.n.], 1993:61-67.
- [2] FRANK R. Resistographic inspection of construction timber, poles and trees [J]. Pacific Timber Engineering Conference, 1994(2):468-478.
- [3] PAUL M W, WEI W, RUPERT W. Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels [J]. Composites & Manufactured Products, 1995, 45(6):90-93.
- [4] LAURENCE R C, STEPHEN L Q. Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the resistograph and the portable drill [J]. Journal of Arboriculture, 1999, 25(6):331-337.
- [5] 段新芳, 李玉栋, 王平. 无损检测技术在木材保护中的应用[J]. 木材工业, 2002, 16(5):14-16.
- [6] 张晓芳, 李华, 刘秀英, 等. 木材阻力仪检测技术的应用[J]. 木材工业, 2007, 21(2):41-43.
- [7] 安源, 殷亚方, 姜笑梅, 等. 应力波和阻抗仪技术勘查木结构立柱腐朽分布[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(4):457-463.
- [8] 黄荣凤, 王晓欢, 李华, 等. 古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结构的定量分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6):167-171.
- [9] 廖春晖, 张厚江, 黎冬青, 等. 古建筑圆柱形木构件内部缺陷筛查方法研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1):123-126.
- [10] 李华, 陈勇平, 黎冬青, 等. 古建筑木构件阻力仪检测中影响阻力值的因素探讨[J]. 木材加工机械, 2011, 22(1):19-21, 26.