

金属-非金属结构累积损伤概率诊断方法*

张赛男, 胡伟伟, 鲍 峤, 王 强

(南京邮电大学自动化学院人工智能学院 南京, 210023)

摘要 围绕金属-非金属结构区域性损伤诊断机理和损伤概率诊断方法展开研究, 首先, 采用压电阻抗理论, 基于机电耦合原理提取结构-传感器机电阻抗的特征参数, 设计稀疏传感阵列获得损伤累积程度与特征参数之间的对应关系; 其次, 构建损伤累积程度的高斯概率诊断模型; 最后, 通过少量传感器, 判定损伤区域和损伤累积程度。实验结果表明, 损伤特征参数随损伤的发展变化显著, 概率诊断模型较好地反映了损伤区域和损伤累积程度。

关键词 结构健康监测; 金属-非金属结构; 累积损伤; 压电阻抗; 概率诊断

中图分类号 TH825; TB52⁺⁷

引 言

随着航空航天、机械制造及建筑等领域的发展, 形式多样的复杂结构件被广泛应用于各行各业。例如在大型武器装备中, 导弹发动机部位的孔洞结构在导弹发射、飞行和级间分离中, 要承受多种载荷(加速度载荷、温度载荷、发动机作业时的燃气内压等)的极大冲击, 常发生基体裂纹、大面积脱粘等损伤情况; 直升机发动机进气净化器装置^[1], 作为典型的金属与非金属复合结构件装置, 其长期暴露在尘雾弥漫的环境中, 高速转动的含尘空气进入发动机并产生高速冲击, 导致发动机进气净化装置受损, 严重影响直升机的寿命, 发生安全事故。因此, 对金属与非金属结构存在的结构缺陷检测至关重要, 也是无损检测和结构健康监测领域一个重要的研究课题。

目前, 用于损伤结构的无损检测方法有红外检测法、CR 射线检测法、超声 C 扫描法、激光剪切散斑法及激光全息检测法等。由于红外检测技术是根据被测件温度变化的差异来判别结构件的损伤, 因此对材料的导热系数、厚度有一定的要求, 复杂情况下会影响检测灵敏度。CR/X 射线对空气层不敏感、检测周期长、费用高及设备庞大, 并且对人体不安全, 因此不适合进行在线实时操作。激光检测方法受穿透性、设备稳定性及实时性的影响, 目前尚无法

做到现场检测。

机电阻抗技术是近十多年兴起的一种非参数结构健康监测方法, 其核心思想是利用超声导波来测得阻抗信息。由于超声波具有传播距离长、检测范围大及对结构局部损伤敏感等优点, 因此机电阻抗能有效监测局部区域的损伤并对损伤进行评估。彭博等^[2]利用导波在蜂窝模型夹层板中传播的频散和多模态特性研究板结构的脱粘损伤的定位。陈玉等^[3]基于小波分解重构的基本原理对粘接结构的回波信号进行处理, 提取重构信号的功率谱估计结果作为特征参数来研究损伤脱粘。李剑等^[4]采用一发一收双探头法, 利用 Lamb 波的 S0 和 A0 两种模式对钢/橡胶结构中的脱粘缺陷进行检测研究。上述研究反映出机电阻抗监测技术在研究复杂结构件损伤监测和检测方面表现出一定的优势, 尤其是不易受结构复杂度影响这一特点, 对于解决复杂结构件的损伤监测与损伤累积程度诊断提供可行的路径。

针对金属与非金属复杂结构件的累积损伤, 基于机电耦合原理, 研究了结构累积损伤的概率监测与评估方法, 采用均方根偏差法提取损伤特征值, 借助于概率思想构建损伤评估模型, 并针对典型工程结构复杂结构件, 对上述方法和模型进行了应用实验验证, 探索金属与非金属结构损伤区域和损伤程度的诊断方法。

* 江苏省基础研究计划资助项目(BK20190739); 南京邮电大学科研基金资助项目(NY217070); 江苏省六大人才高峰高层次人才资助项目(2015-ZNDW-006)

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-09-08

1 结构累积损伤监测机理

1.1 区域性累积损伤表现

金属与非金属复杂结构件在长期服役过程中,在交变载荷、环境等内外部作用下,结构件之间容易产生脱粘、复合材料撕裂等损伤,而且缺陷或损伤易呈现区域性扩展,损伤程度不断累积后,严重的会造成结构突然失效。与此同时,受结构形式复杂的影响,常规损伤监测和检测技术手段实现的难度大。

1.2 机电阻抗方法监测机理

结构的机械阻抗反映了结构由于形状、连接状态等改变引起的结构状态变化。由于远场载荷、刚度和边界条件的改变对机械阻抗的影响可以忽略,因此阻抗方法不需借助结构模型,可适用于复杂结构。同时该原理具有局部灵敏度高、传感器便于安装及无需模型分析等优点,有利于利用其进行区域性累积结构损伤监测。

结构机械阻抗可采用机电阻抗^[5-9]测量来获取。利用压电陶瓷片的机电耦合特性和压电陶瓷片与结构的相互作用测得结构件的机电阻抗。压电片(piezoelectric transducer,简称PZT)^[10]与结构的机电耦合原理如图1所示。

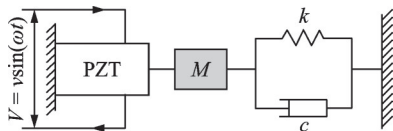


图1 PZT与结构的机电耦合模型图

Fig.1 Electromechanical coupling model of PZT sensor and structure

基于局部高频激励,利用PZT作为传感器和驱动器,对结构局部激励测得结构机电阻抗以及隐含结构性能变化的信息,从而分析结构的状态变化,包括损伤情况。其具体工作过程:首先,由正压电效应对压电传感器施加一个交变电场,改变输出电场;其次,由逆压电效应产生一个周期性交变电磁力,通过压电传感器和结构之间胶质层的弹性力和阻尼力向结构发出激励^[11];最后,结构反馈响应后,响应通过胶质层反馈给压电传感器,使压电传感器产生新形变。结构损伤引起的机械阻抗的变化反映压电传感器的电阻抗变化,利用结构机电阻抗信息就可以对结构损伤进行监测。

实际实施和应用时,采用低功率的压电陶瓷片(PZT)作为驱动器和传感器固定在金属与非金属板

上,利用压电陶瓷的机电耦合特性以及压电陶瓷与结构的相互作用,将结构的机电阻抗通过压电陶瓷与结构结合以后的电阻抗反映出来^[12]。在简谐交变电压下,在被测结构件表面粘贴的PZT模拟为1根仅考虑轴向振动的细杆(一端与简化为单自由度的系统基体结构相连,另一端固定)。

在系统中,PZT在工作频率为 ω 的电导纳 $Y(\omega)$ 为

$$Y(\omega) = I/V = i\omega\alpha(\bar{\epsilon}_{33}^T(1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{xx}^E) \quad (1)$$

其中: i 为加载在PZT上的电流; α 为PZT的几何系数; δ 为PZT的介电损耗因子; $Z_s(\omega)$ 和 $Z_a(\omega)$ 分别为主体结构和PZT在工作频率 ω 的机械阻抗; \bar{Y}_{xx}^E 为PZT的复弹性模量; d_{3x}^2 和 $\bar{\epsilon}_{33}^T$ 分别为PZT的压电系数和介电系数。

由式(1)可以看出,若保持压电材料的参数及性能恒定,与其相粘接的PZT的电导纳就能被唯一确定。电导纳的变化反映结构机械阻抗的变化,从而机电阻抗技术可以对结构的缺陷损伤等物理变化进行监测。由于机电阻抗工作频率较高(一般为20~400 kHz)^[13],远场作用如载荷、刚度和边界条件的改变将被隔离,因此机电阻抗适用于金属与非金属复杂结构的健康状况监测,适用小区域性损伤诊断。

2 区域性损伤概率评估方法

2.1 损伤概率评估基本原理

金属与非金属复杂结构件的损伤一般呈区域性扩展发生,由于机电阻抗敏感性随着与压电片的距离增加而衰减,因此在待测结构上按照监测区域,布置分布式压电传感阵列,测试获得结构和压电片的阻抗信息。代表性的金属与非金属复杂结构件损伤监测原理如图2所示。

根据电压电流法,通过串联的分压电阻 R_m 测量PZT压电陶瓷片的阻抗。采用均方根偏差

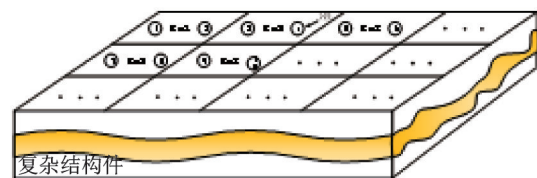


图2 金属与非金属复杂结构件损伤监测原理

Fig.2 The principle of the damage monitoring for metal and non-metal structure

(root-mean-square deviation, 简称 RMSD)^[14-16] 来分析处理数据, 标定其损伤程度。

RMSD 作为损伤指标, 其数学表达形式为

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

其中: x_i 为第 i 次被测结构健康时压电片的阻抗; y_i 为第 i 次被测结构损伤时压电片的阻抗; N 为测量次数。

由于导纳值实部对于结构的完整性更为敏感^[17], 因此在研究中以采集到的实部信息作为分析研究的主要目标, 以此作为损伤特征参数来进行损伤概率评估的指标。

$$\text{RMSD}_{\text{Re}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Re}(y_i) - \text{Re}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Re}(x_i))^2}} \quad (3)$$

其中: $\text{Re}(x_i)$ 为第 i 次被测结构健康时压电片阻抗的实部; $\text{Re}(y_i)$ 为第 i 次被测结构损伤时压电片阻抗的实部; N 为测量次数。

2.2 损伤累积概率评估模型

损伤评估以欧氏距离为基础, 判定结构件是否出现损伤和评估损伤累积程度, 即损伤距 PZT 压电片距离越小, 其损伤特征值越大; 在损伤距离一定的情况下, 损伤特征值越大, 则损伤累积程度越深。根据大量的实验验证, 在误差允许范围内实际损伤特征值与拟合理论损伤特征值之间误差在一定数值范围内的波动, 发现 RMSD_{Re} 与损伤脱落个数之间虽无线性关系^[18], 但存在一定的幂函数关系。损伤特征值与损伤区域扩展之间的幂函数公式为

$$D(\text{RMSD}_{\text{Re}}) = K\Delta^a - \gamma \quad (4)$$

其中: $D(\text{RMSD}_{\text{Re}})$ 为幂指数模型的损伤特征值; K, a, γ 为幂函数方程参数; Δ 为实际累积损伤程度。

采用高斯概率分布数学思想: 某事件发生的概率越大, 则该事件发生的可能性越大。研究设计判定损伤区域概率模型和表征系数, 即区域准确度 $\eta(i)$ 为

$$\begin{cases} \eta(i) = \frac{\text{RMSD}_{\text{Re}}}{D(\text{RMSD}_{\text{Re}})} & (|D(\text{RMSD}_{\text{Re}}) - \text{RMSD}_{\text{Re}}| \leq H) \\ \eta(i) = 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

其中: i 为压电片的编号; H 为误差允许范围的边界值。

通过比较不同压电片下的 η , η 越大则该压电片所对应的区域损伤的概率越大。

同上, 根据 1 维高斯概率模型分布的原理, 在确定损伤区域的基础上, 设计判定损伤累积程度扩展的概率模型和表征系数, 即累积损伤概率 $\epsilon(j)$

$$\epsilon(j) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\text{RMSD}_{\text{Re}} - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (6)$$

其中: j 为累积损伤程度; μ_j 为 $(\text{RMSD}_{\text{Re}})_j$ 的均值; σ_j 为 $(\text{RMSD}_{\text{Re}})_j$ 的标准差。

ϵ 越大则该压电片所对应的累积损伤的程度率越大。

根据上述分析, 可以确定复杂结构累积损伤的概率诊断评估过程为:

- 1) 在待测结构上安装机电阻抗测量传感器, 利用电压电流法获取复杂结构的阻抗信息;
- 2) 基于机电耦合原理提取结构-传感器机电阻抗的特征参数;
- 3) 通过稀疏传感阵列计算获得损伤累积程度与特征参数之间的对应函数关系;
- 4) 计算损伤区域的概率诊断模型参数;
- 5) 构建损伤累积程度的高斯概率诊断模型, 并进行损伤诊断。

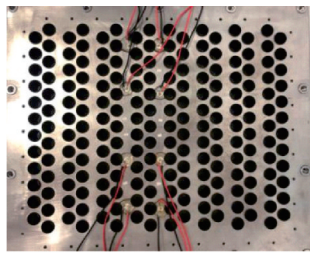
3 实验验证

3.1 实验条件

实验采用直升机进气净化结构件为对象, 该结构件是典型的金属-非金属(塑料)连接结构。其结构特征为: 金属板结构作为基础结构, 非金属结构作为功能结构, 二者粘合成为复杂结构。有限元模型呈蜂窝状, 整体呈稀疏阵列排布。

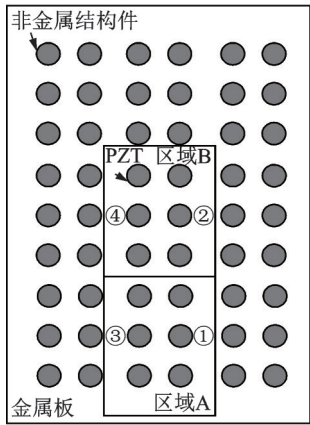
按照前文所述的方法, 将实验结构件按区域划分, 将压电传感器(PZT)编号后对称布置, 其中 1 个监测区域由若干个非金属构件和 2 个压电片组成, 如图 3 所示。

实验中采用敲击非金属塑料件模拟高速转动的含尘空气进入发动机产生的高速冲击, 结构件损伤表现为成片脱落的形式, 实现累积损伤。实验硬件选用 NI USB-6366 进行信号发生和采集, 软件部分用 LabVIEW 设计。参照图 3 所示的实验结构件分区图和图 4 所示的实验实物图, 安装传感器如图 5 所示。根据已有研究成果及实验测定, 确定实验中的激励信号频率的范围在 20~120 kHz, 正弦激励信号的固定幅值为 9 V, 每次频率扫描间隔量为 1 kHz, 总共测量 101 个点, 设置相邻两个频率的激励信号的间隔时间为 20 ms, 电阻大小为 10 k Ω 。



(a) 金属与非金属试件

(a) Metal and non-metal specimen



(b) 传感器布置方案

(b) Sensor array layout

图3 实验结构件

Fig.3 Experimental specimen

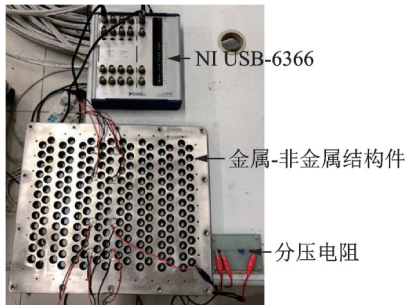


图4 实验实物图

Fig.4 Experimental setup

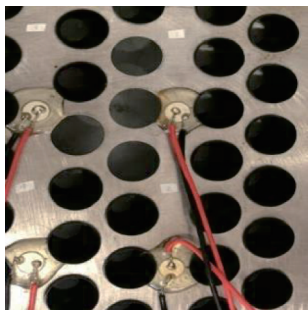


图5 压电阵列细节排布图

Fig.5 Detailed arrangement of piezoelectric array

3.2 实验数据与结果分析

验证先选定一个待测区域累积损伤的机电阻抗特征参数 $RMSD_{Re}$, 并针对其中1个压电片的累计损

伤下的 $RMSD_{Re}$ 进行曲线拟合数据等处理, 然后再展开对整体结构件的测试验证。经过前期测试, 取式(4)中 $K=21.15$, $a=0.8307$, $\gamma=16.23$; 式(5)中取 $H=1.5$ 。

3.2.1 损伤区域判定

如图4所示, 在实验中对待测A区域的塑料件进行人为破坏造成4处完全脱落。分别记录A,B区域1,2,3,4号压电片在4种不同程度损伤状态下的 $RMSD_{Re}$ 值。将A,B区域4种累积损伤状态和健康状态下4个压电片的 $RMSD_{Re}$ 值进行对比, 如图6所示。由于损伤的发生, 各个压电片的特征参数值明显增大, 并且随损伤程度的加深不断增大。

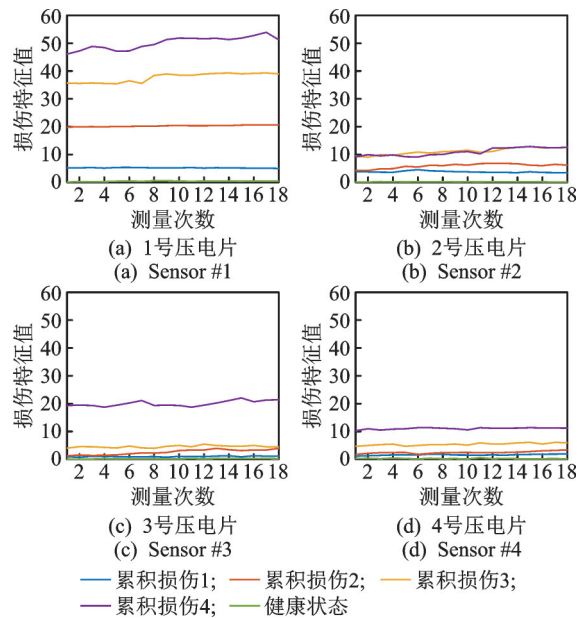


图6 不同累积损伤下1~4号压电片 $RMSD_{Re}$ 变化

Fig.6 Variation of $RMSD_{Re}$ for sensor #1~#4 under different cumulative damage

根据式(5), 分别计算多种累积损伤程度下的4个压电片的 η 值。在式(4)拟合的幂函数方程下, 同种损伤程度下传感器输出对应的 η 均表现最大, 则该传感器所在区域发生损伤的概率最大。图7分别显示了多种累积损伤程度下压电片的 η 分布, 其中1~4为压电片编号。根据这一结果, 并基于数学欧几里得原理, 确定为1号压电片 η 分布值最大, 因此判定1号压电片临近的区域存在损伤。判定结果与实际情况吻合, 从而实现损伤区域的判定。

3.2.2 损伤累积程度判定

根据结构件的实际损伤发生情况, 设定1个塑料件脱落为轻微损伤, 2个塑料件脱落为轻中度损伤, 3个塑料件脱落为中重度损伤, 4个以上塑料件脱落为重度损伤。

4种损伤情况下, 对比实际测得的数据和式(4)理论值下损伤特征值与累积损伤程度之间的关系。

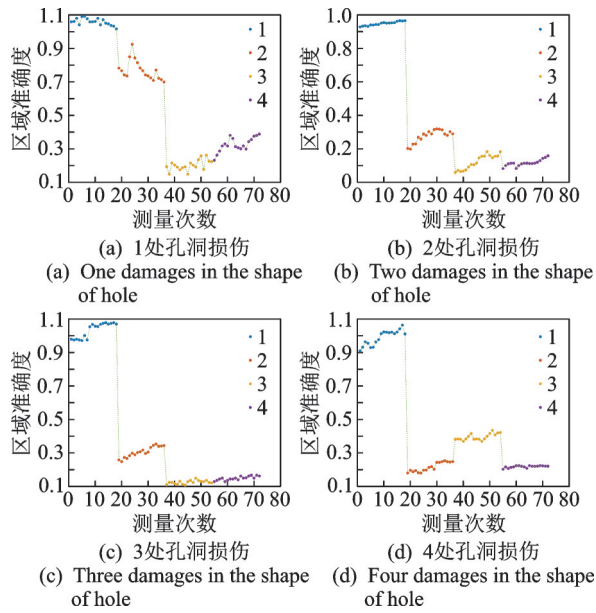


图7 不同累积损伤程度下1~4号压电片的 η 分布

Fig.7 η of sensor #1~#4 under different cumulative damages

累积损伤程度与 $RMSD_{Re}$ 之间的对应关系如图8所示,其中1~4为压电片编号。根据图8显示结果,在累积损伤程度表现第1种状态时,由于累积损伤程度较小,因此损伤特征表现较弱,各个压电片之间的区分度较弱;但随着累积损伤程度的加深,累积损伤程度与 $RMSD_{Re}$ 之间的对应关系与式(4)曲线重合较好,从而验证了式(4)幂指数模型的准确性。

根据式(4)和式(6),并结合实验测得数据,可得到不同累积损伤程度下均值和标准差,经过修正整理后的高斯概率分布的参数如表1所示。进一步,确定待测区域损伤特征值与累积损伤概率分布之间的高斯概率分布诊断模型,如图9所示。

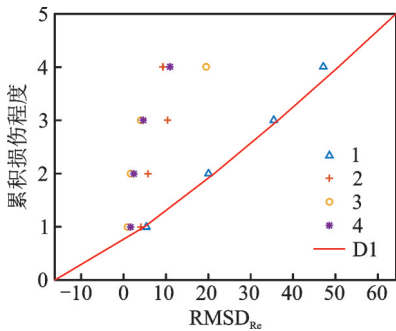


图8 累积损伤程度与 $RMSD_{Re}$ 之间的对应关系

Fig.8 Correspondence between cumulative damage and $RMSD_{Re}$

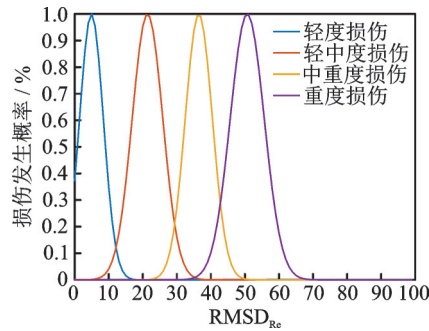


图9 累积损伤程度的概率分布

Fig.9 Probability distribution of cumulative damage

表1 高斯概率分布的参数

Tab.1 Parameters of the Gaussian probability distribution

参数	损伤程度			
	轻度损伤	轻中度损伤	中重度损伤	重度损伤
均值	4.920	21.386	36.451	50.672
标准差	3.5	4.5	4.0	5.0

在相同的 $RMSD_{Re}$ 下,对照不同程度累积损伤概率模型,得到的诊断概率值越大,则表明对应的损伤累积程度发生的概率越高。如图10所示,当塑料件脱落个数为3、测得的 $RMSD_{Re}$ 为35时,带入4个诊断模型获得的损伤发生概率分别为: 1.02×10^{-15} , 0.019 672, 0.828 822 17, 0.003 851,可见中重度损伤附近的特征值最大,因此判定此时发生的损伤程度为中重度损伤程度,与实际结果一致。

根据建立的概率模型,重复上述实验验证,累计36组实验数据的损伤区域和累积损伤程度概率判定结果正确率统计如表2所示。

表2 损伤诊断正确率统计

Tab.2 Accuracy of damage diagnosis %

统计项目	损伤程度			
	轻度损伤	轻中度损伤	中重度损伤	重度损伤
损伤区域	75	95	90	90
损伤程度	70	90	83	83

根据上述诊断结果,在轻度损伤时,由于累积损伤较小,损伤特征较弱,因此诊断正确率相对较小一些;随着累积损伤程度的加深,损伤特征值不断提高,在轻中度损伤附近,损伤区域和累积损伤程度的判定准确率提高并趋于稳定;当损伤为中重度、重度损伤开始时,由于损伤值变化率较小,因此损伤程度的判定正确率降低。

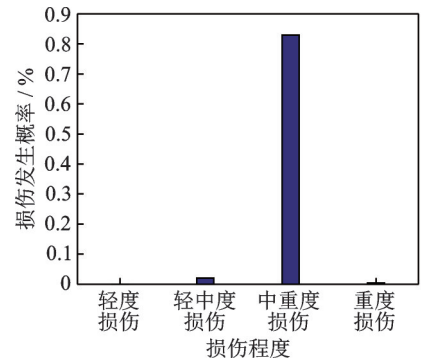


图10 $RMSD_{Re}$ 为35时的不同损伤程度概率分布

Fig.10 Probability distribution of different damage levels when $RMSD_{Re}$ is 35

4 结论

1) 金属与非金属复杂结构发生累积损伤时,损伤

特征参数随损伤扩展变化较为明显,可有效监测到损伤区域和损伤程度,损伤概率判定的正确率较高。

2) 由于不借助于结构自身模型,受结构复杂度

的影响较小,该方法还有望适用于复合材料结构件。

3) 由于传感器和损伤之间的距离对损伤特征值同样会造成一定的影响,在此1维高斯概率诊断模型的基础上,通过引入量化后的损伤距离,研究建立2维高斯概率诊断模型,将有助于提高监测的精度。

参 考 文 献

- [1] KNOTH F, BREITSAMTER C H. Flow analysis of a helicopter engine side air intake [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(5): 1230-1244.
- [2] 彭博, 税国双, 汪越胜. 蜂窝夹层板结构中导波的传播特性及其脱粘损伤的检测[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(12): 140-147.
PENG Bo, SHUI Guoshuang, WANG Yueheng. Properties of guided waves propagating in honeycomb sandwich plates and the detection of disbonding damage using ultrasonic waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12): 140-147. (in Chinese)
- [3] 陈玉, 王召巴, 陈友兴, 等. 复合粘接结构电磁超声脱粘检测实验研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(7): 816-819, 815.
CHEN Yu, WANG Zhaoba, CHEN Youxing, et al. Study on the detection of adhesive structure interface debond by electromagnetic ultrasonic [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(7): 816-819, 815. (in Chinese)
- [4] 李剑, 刘松平. 钢/橡胶胶接结构中脱粘缺陷的 Lamb 波定量检测[J]. *无损检测*, 2009, 31(7): 525-527.
LI Jian, LIU Songping. Quantitative evaluation of disbonding in steel/rubber adhesive bonding structures by using lamb waves [J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(7): 525-527. (in Chinese)
- [5] NI Y Q, KIM J T. Wireless impedance sensor node and interface washer for damage monitoring in structural connections [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(6): 871-886.
- [6] BHALLA S, PANIGRAHI R. Damage assessment of tensegrity structures using piezo transducers [J]. *Mecanica*, 2013, 48(6): 1465-1478.
- [7] GUANGHSU C, JIEH-SHIAN Y, WIRACHMAN W. Damage detection in structures using electromechanical impedance and finite element analysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2016(799/800): 971-975.
- [8] WANG D, SONG H, ZHU H. Numerical and experimental studies on damage detection of a concrete beam based on PZT admittances and correlation coefficient [J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 49(1): 564-574.
- [9] YU F, MANUEL C, MOHAMED I, et al. Wave electromechanical coupling factor for the guided waves in piezoelectric composites [J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1406.
- [10] LEE U, KIM D, PARK I. Dynamic modeling and analysis of the PZT-bonded composite Timoshenko beams: spectral element method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(6): 1585-1609.
- [11] NGUYEN K D, HO D D, KIM J T. Damage detection in beam-type structures via PZT's dual piezoelectric responses [J]. *Smart Structures and Systems*, 2013, 11(2): 217-240.
- [12] 惠德畅, 魏汉, 张万飞, 等. 结构压电机电阻抗谱测试方法 [J]. *信息化研究*, 2013, 39(5): 26-29.
HUI Dechang, WEI Han, ZHANG Wanfei, et al. Structural piezoelectric E-M impedance spectroscopy test method [J]. *Information Research*, 2013, 39(5): 26-29. (in Chinese)
- [13] SOHN H, FARRAR C, INMAN D J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward [J]. *Shock & Vibration Digest*, 2003, 35(6): 451-463.
- [14] HU X, ZHU H, WANG D. A study of concrete slab damage detection based on the electromechanical impedance method [J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 19897-19909.
- [15] KIM J, YI N H, PHAN D H, et al. Development of performance based resistance capacity evaluation method for RC compression member under vehicle impact load [J]. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2010, 22(4): 535-546.
- [16] NAVARRO H, MARULANDA D J, ROBLEDO-CALLEJAS L, et al. Damage detection in plates using the electromechanical impedance technique based on decoupled measurements of piezoelectric transducers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 384: 146-162.
- [17] 严刚, 周丽. 基于 Lamb 波的复合材料结构损伤成像研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 583-589.
YAN Gang, ZHOU Li. Study on damage imaging for composite structure using Lamb wave [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 583-589. (in Chinese)
- [18] 张东山, 张志忠, 刘瑜, 等. 基于压电阻抗方法的油气管道裂纹损伤定量研究 [J]. *工程力学*, 2016, 33(1): 232-237.
ZHANG Dongshan, ZHANG Zhizhong, Liu Yu, et al. Piezoelectric impedance-based quantitative study on oil and gas pipeline crack damage [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(1): 232-237. (in Chinese)



第一作者简介: 张赛男, 女, 1996年6月生, 硕士生。主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: 1511176526@qq.com