

载荷影响下的机电阻抗协整结构损伤识别方法^{*}

揭小落, 肖黎, 屈文忠

(武汉大学工程力学系 武汉, 430072)

摘要 高频机电阻抗 (electromechanical impedance, 简称 EMI) 方法利用粘贴在结构表面的压电传感器 (piezoelectric transducer, 简称 PZT) 进行主动激励, 通过连续监测和分析 PZT 机电导纳信号的变化评估结构的健康状态; 然而 EMI 方法容易受到环境工况变化的影响, 导致结构损伤的误报。针对此问题, 采用时间序列协整方法处理及消除结构工作载荷对阻抗谱特征信号的影响。该方法是基于结构动荷载作用下 PZT 阻抗谱导纳信号的非平稳特征, 将动荷载影响下的阻抗谱非平稳时间序列经线性组合变换成平稳时间序列, 根据得到的协整余量序列有效判断结构的健康状态。为验证该方法的有效性, 开展了动应力影响下铝梁结构的螺栓松动损伤识别实验。结果表明, 协整消除了动态应力对 EMI 方法的影响, 当铝梁内存在持续变化的应力时, 仍可以准确识别螺栓松动。机电阻抗协整方法能够消除结构健康监测中荷载作用的影响, 及时准确地进行结构损伤识别。

关键词 结构健康监测; 高频机电阻抗技术; 荷载影响; 协整; 螺栓松动

中图分类号 O346.5; O347.1; TH69

引言

EMI 方法是一种基于智能压电材料阻抗分析的结构健康监测方法, 其通过连续监测和分析粘贴于主体结构上 PZT 机电导纳 (阻抗倒数) 信号的变化来评估结构的健康状态, 并采用损伤指标量化表征结构状态变化程度。该方法最早由 Liang 等^[1-2]提出, 由于其具有对微小损伤敏感、不依赖结构物理模型、对边界条件要求不高以及成本低等优点, 成为结构健康监测领域关注的热点。PZT 的机电导纳是由主体结构刚度、质量、阻尼和边界条件等参数组成的函数, 同时也与压电片尺寸和方向相关^[3-5]。当 PZT 的物理性质和各参数保持固定时, 机电导纳信号的变化主要是由结构状态变化引起的, 如结构损伤、环境温度变化和荷载变化等。因此, 可以通过观察机电导纳信号的变化来评估结构的状态变化。

作为一种结构损伤识别方法, EMI 方法的应用范围非常广泛, 比如多种结构的裂纹和疲劳损坏、金属结构的螺栓松动、复合材料层的脱粘以及混凝土的固化监测等。Soh 等^[6]证明了 EMI 方法可用于监测铝梁疲劳裂纹扩展过程以及结构寿命预测, 并建立了一种用于疲劳寿命估算的概念验证半分析损

伤模型。Zuo 等^[7]将 EMI 方法进行调整后用于裂缝检测, 并采用损伤指标量化表征以确定管道中裂缝损伤的程度和位置。Liu 等^[8]证明了基于嵌入式压电传感器的机电阻抗技术可以有效地监测混凝土的开裂和发展。Kuznetsov 等^[9]利用机电阻抗方法成功识别直升机机翼的螺栓松动, 实验过程中结构温度和应力保持不变。粘合层材料的脱粘监测也是 EMI 技术的一个重要应用领域。文献^[10-11]分别研究了使用 EMI 方法检测航空结构和玻璃环氧树脂材料板的粘合层脱粘。此外, EMI 技术还能够用于监测混凝土固化过程中的应力和强度变化^[12-15]。Wong 等^[16]总结了关于应用 EMI 方法进行各种结构健康监测的研究。

在实际应用时, 服役中的结构如桥梁、铁轨和火箭发动机等通常承受动态荷载, 荷载作用影响 EMI 方法进行结构损伤识别的准确性, 需要消除荷载影响。Ong 等^[17]研究了过应力对结构逐点动态刚度的影响, 并使用 EMI 方法确定铝梁中的原位应力。Annamdas 等^[18]研究了横向荷载对粘结于铝梁表面的 PZT 机电导纳信号的影响, 发现导纳特征曲线随着荷载的增加逐渐向右上偏移。Lim 等^[19]研究了固定边界条件下不同轴向荷载对导纳信号的影响, 并深入研究了边界条件的硬化效应。Scalea

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51378402, 51975581)
收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2019-01-10

等^[20]研究了 EMI 方法用于监测铁轨健康状态时的温度和轴向应力影响。Yang 等^[21]研究了轴向拉伸荷载对钢梁导纳信号的影响,并提出用人工智能神经网络方法补偿荷载影响。然而,使用人工神经网络方法进行补偿没有物理内在规律的可行性,而且需要足够数量的数据才能运行。

目前,针对横向载荷尤其是压载荷对 EMI 方法的影响,以及动载荷影响 EMI 的补偿问题研究较少。笔者对于拉压应力如何影响 EMI 方法进行了理论、数值和实验研究。在动态载荷的影响下,导纳信号不仅发生峰值偏移,而且存在较复杂的局部变化,包括波峰的出现和开裂等,用于补偿温度影响的有效频率偏移方法^[22]不再适用。笔者采用协整方法处理动载荷对 EMI 方法的影响,并开展动应力下铝梁螺栓松动损伤检测实验来验证该方法的有效性。

1 EMI 方法损伤检测技术基本原理

EMI 方法是一种基于智能压电材料阻抗分析的结构损伤识别方法。由于压电智能材料具有压电效应,它能够实现机械能和电能之间的相互转化,因此可以同时作为传感器和驱动器。PZT 是一种应用广泛的压电材料,当沿 PZT 极化方向施加交流电场时,可以测得耦合系统的机电导纳信号。由于压电材料与结构之间存在耦合作用,耦合系统的机电导纳信号直接与主体结构的机械阻抗相关。当系统保持固定时,假设 PZT 的属性不随时间变化,则系统导纳信号的变化只与结构机械阻抗的变化有关。结构机械阻抗的变化正是由于损伤等因素引起的,因此,通过系统导纳信号的变化可以判定结构的健康状态。

笔者应用如图 1 所示的一维机电耦合阻抗模型来阐述 EMI 方法的基本原理。对于上述阻抗模型,PZT 的机电导纳函数是与主体结构机械阻抗、PZT 机械阻抗和激励频率相关的复变量函数,该函数由电导 G (导纳实部)和电纳 B (导纳虚部)两部分组

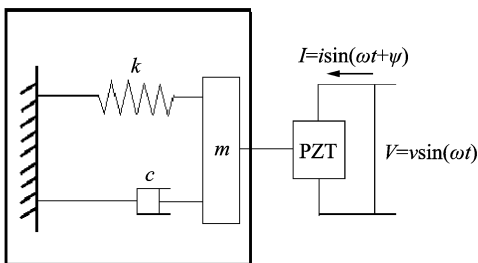


图 1 一维耦合机电阻抗模型

Fig. 1 1-D coupled electromechanical impedance model

成^[3-5],如式(1)所示

$$Y = I/V = G + jB =$$

$$j\omega \frac{\omega_A l_A}{h_A} \left(\bar{\epsilon}_{33}^e - \frac{Z_S}{Z_S + Z_A} d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (1)$$

其中: j 为虚数单位; ω 为施加在 PZT 上交流电压的角频率; ω_A, l_A, h_A 分别为压电片的宽度、长度、高度; $\bar{\epsilon}_{33}^e = \epsilon_{33}^e (1 - \delta j)$ 为压电片在应力为零或常数时的复介电常数, δ 为介电损耗因数; $\bar{Y}_{22}^E = Y_{22}^E (1 + j\eta)$ 为压电片在电场为零或常数时的复弹性模量, η 为 PZT 的机械损耗因数; d_{32} 为压电常数; Z_S 为主体结构的机械阻抗; Z_A 为压电片的机械阻抗。

由式(1)可知,系统机电导纳信号与 PZT 和主体结构的机械阻抗有关;当系统环境不变时 PZT 自身的机械阻抗 Z_A 一般保持不变,则主体结构的机械阻抗 Z_S 对系统导纳信号的影响较大;当结构的机械阻抗发生变化时,结构的动力特性随之改变,就表示了结构可能出现损伤。通过监测和分析 PZT 传感器机电导纳信号的变化,能够实现对结构健康状态监测的目的。

为了更准确地判断结构的健康状态,需要引入损伤指标量化损伤前后所测得导纳信号的差异。由于系统的导纳信号为复数,相应的损伤指标也分为实部和虚部。大量研究表明,导纳的实部比虚部对结构损伤更敏感,同时外界条件对导纳虚部的影响也更大,所以一般采用导纳实部信号构造损伤指标来判断结构的健康状态。笔者采用相关系数偏差 (correlation coefficient deviation, 简称 CCD) 作为损伤判定指标,算法如下

$$CCD = 1 - CC = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2)$$

其中:CC 为相关系数; X_i 为基准状态的导纳实部数据; Y_i 为待判定状态下的导纳实部数据; \bar{X}, \bar{Y} 分别为 X, Y 的平均值; σ_X, σ_Y 分别为 X, Y 的标准差。

2 EMI 载荷影响理论分析

以轴向载荷作用下梁的横向振动来简要说明载荷对 EMI 影响的机理。考虑如图 2 所示的梁结构模型,两端沿轴向施加拉荷载 T 。假设振动过程中梁截面上的张力保持不变,梁的弹性势能包括弯曲应变能和轴向拉力引起的应变能。根据力平衡条件得到梁的横向自由振动方程为

$$(EIY'')'' - \omega^2 \rho A Y = 0 \quad (3)$$

其中: E 为材料弹性模量; I 为截面对中性轴的惯性

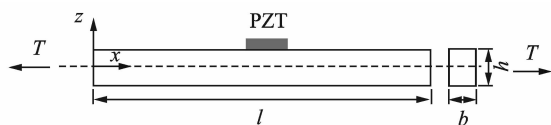


图2 施加轴向荷载的梁结构模型

Fig. 2 Beam structure model axially loaded

矩； A 为梁的横截面积； ρ 为梁的密度； Y 和 ω 分别为梁的振型函数和固有频率； Y'' 表示在空间上对振型函数求2阶导数。

梁的最大弹性势能和最大动能分别为

$$U_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^l EI (Y'')^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l T (Y')^2 dx \quad (4)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l \rho A Y^2 dx \quad (5)$$

其中： l 为梁的长度； T 为轴向荷载。

由能量守恒得到固有频率的泛函为

$$\omega^2 = \text{st} \frac{\int_0^l EI (Y'')^2 dx + \int_0^l T (Y')^2 dx}{\int_0^l \rho A Y^2 dx} \quad (6)$$

由式(3)和边界条件所确定的特征值 ω^2 和相应的特征函数 $Y(x)$ 等价于上述泛函所取的驻值及相应的自变函数，具体的证明过程见文献[23]。对于等截面梁和两端简支的简单边界条件： $Y(0) = 0$ ， $Y''(0) = 0$ ， $Y(l) = 0$ ， $Y''(l) = 0$ ，解出固有频率为

$$\omega_i = \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \sqrt{1 + \frac{Tl^2}{i^2 \pi^2 EI}} \quad (7)$$

其中： i 为振动阶数。

可以看出， $T=0$ 时即为没有轴向力作用时简支梁的固有频率。由于轴向拉力的存在使梁的挠度减小，相当于增加了梁的刚度，使得固有频率提高。如果是轴向压力，可用 $-T$ 代替 T ，这时固有频率降低。当 ω_i 是高阶固有频率时， i 很大，各高阶固有频率之间呈线性相关。

式(1)中结构自身的机械阻抗为

$$Z_s = c - m \frac{\omega_i^2 - \omega^2}{\omega} j \quad (8)$$

其中： j 为虚数单位； c 为阻尼系数； m 为质量； ω_i 为系统谐振频率； ω 为激振频率。

荷载作用引起结构固有频率的变化，进而导致系统谐振频率发生改变，结构的机械阻抗随之变化，最终表现为导纳曲线的波峰发生偏移。EMI方法通过分析导纳曲线的变化判断结构的健康状态，则荷载作用会影响EMI方法进行结构健康监测的准确性，因此有必要处理荷载作用的影响。

3 EMI 载荷影响的处理方法

3.1 基于协整的结构损伤检测

协整理论是计量经济学中处理非平稳时间序列问题的基本方法[24]，其基本思想是将原本非平稳的几个时间序列经过线性组合后变成平稳的时间序列，这种线性组合被称为协整方程。

一个时间序列 $x(t)$ 通过 d 次差分成为一个平稳序列，而 $d-1$ 次差分却不平稳，则称这个序列 x 是 d 阶单整序列，记为 $x \sim I(d)$ 。如果序列本身是平稳序列，则称为零阶单整序列，记为 $x \sim I(0)$ 。对于一组 d 阶单整时间序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^n$ ，若能够找到协整向量 $\alpha^T = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ 使得式(9)成立

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = \varepsilon \quad (9)$$

其中： ε 为余量序列，说明序列 X 有长期稳定关系。

如果这种均衡关系能够描述非稳态变量之间的长期均衡关系，则余量序列为稳态序列，即 $\varepsilon \sim I(0)$ 。协整分析的目的就是找到协整向量使得余量序列平稳。通过协整检验可以得到协整向量，因为协整检验只适用于同阶非平稳随机变量，进行协整检验之前，必须确定各随机变量的非平稳阶数，此处采用增广迪基-福勒检验(augmented Dickey-Fuller test, 简称 ADF 检验)。当变量确定为同阶非平稳时，就可以进行 Jonhansen 协整检验获得协整向量。ADF 检验和 Jonhansen 协整检验的具体过程见文献[25]。

当损伤发生时，协整变量序列变成非平稳时间序列，它们之间构造的协整余量产生明显的跳跃。在实际应用时，导致协整变量发生变化的因素很多，其中包括荷载、温度、潜在损伤等。协整余量法可以消除除损伤外其他因素的改变对协整变量的影响，则可通过协整余量突变判断损伤的发生。

3.2 协整处理动荷载影响 EMI 的分析

考虑到温度、荷载等环境工况变化造成导纳时间序列的不平稳，各时间序列有着共同的变化趋势。在导纳时间序列之间如果能够找到平稳的线性组合，就可以利用协整处理环境工况如动荷载变化引起的非平稳性问题。

进行协整之前，需要确定合适的协整变量时间序列。对于图1所示的阻抗模型而言，输入的激励是线性扫频信号，则在扫频频率范围中，各频率点的能量值相同。但对于PZT片上的电压而言，由于结构共振频率的存在，该电压将在这些频率点处产生

能量集中,从而在导纳曲线中显现波峰。导纳曲线波峰位置的频率代表了结构的固有频率,因此,选取 EMI 导纳谱的波峰频率(结构的高阶固有频率)作为协整变量。下面从理论上分析动荷载影响下梁的任意 4 阶高固有频率时间序列进行协整的可行性。根据式(7)得到轴向力作用下梁的第 i, k, p 和 q 阶固有频率的比值为

$$\begin{cases} \omega_i : \omega_k : \omega_p : \omega_q = f(i) : f(k) : f(p) : f(q) \\ f(x) = x \sqrt{x^2 \pi^2 EI + Tl^2} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)变形可得

$$\omega_i f(k) - \omega_k f(i) + \omega_p f(q) - \omega_q f(p) = 0 \quad (11)$$

EMI 方法中一般采用高频(30 kHz~400 kHz)进行扫频^[26],因此 $\omega_i, \omega_k, \omega_p$ 和 ω_q 均是高阶固有频率。经过仿真模态分析发现,对尺寸为 600 mm × 120 mm × 2 mm 的铝梁,30 kHz 频率对应的振动阶数约为第 280 阶,代入相关参数可得 $x^2 \pi^2 EI \gg Tl^2$,其中 x 为 30 kHz 以上频率对应的振动阶数。则式(11)可简化成

$$k^2 \omega_i - i^2 \omega_k + q^2 \omega_p - p^2 \omega_q = 0 \quad (12)$$

当结构处于荷载随时间变化的工况序列中,式(12)可推广为

$$a_1 \omega_i + a_2 \omega_k + a_3 \omega_p + a_4 \omega_q = \epsilon \quad (13)$$

其中: ϵ 为相互独立高斯随机变量,且均值为零,方差为 σ^2 。

此时式(13)正是协整式(9), a_1, a_2, a_3 和 a_4 是相应的协整系数,它只与频率所处的阶次有关,而与荷载变化无关,因此可以消除荷载变化的影响,说明动荷载作用下结构的任意 4 阶高固有频率之间存在协整关系。当损伤发生时,原有的协整系数不再适用,此时将高阶固有频率代入协整关系式中,协整余量发生突变,即可判断结构出现损伤。

提取导纳实部曲线 4 个峰值位置的频率,即代表了结构的 4 阶高固有频率。由于荷载作用对峰值位置和大小存在影响,为了保证频率时间序列的一致性,要注意峰值位置的选取,确保整个荷载变化过程中所选取的峰值始终较为明显地存在。

动荷载作用下基于 EMI 方法和协整的结构健康监测分为两个阶段,分别是协整模型学习构造阶段和损伤识别阶段。如图 3 所示,其中阻抗测试系统由美国国家仪器公司(National Instrument, 简称 NI)的数据采集模块组成,在实验部分具体介绍。

4 荷载影响导纳信号的仿真研究

为了研究拉压荷载对导纳信号的影响,笔者进

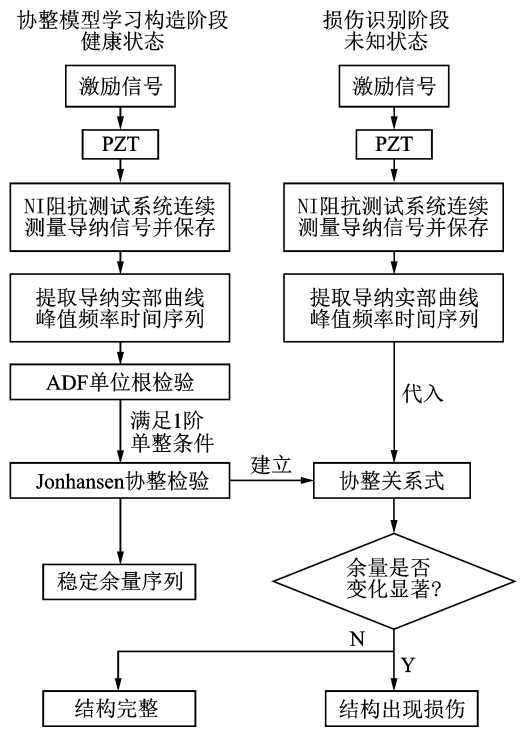


图 3 基于 EMI 协整方法的结构健康监测流程图

Fig. 3 Flow chart of SHM based on EMI co-integration method

行了相关仿真计算。利用通用有限元软件 ANSYS 建立压电片-铝梁三维模型,如图 4 所示。铝梁采用实体单元 Solid45,尺寸为 600 mm × 120 mm × 2 mm,铝梁为无约束自由状态。压电片采用耦合场单元 Solid5,尺寸为 10 mm × 10 mm × 0.2 mm,压电片中心距离铝梁右端 150 mm。图 4(a,b)所示分别为对铝梁模型施加拉荷载和压荷载的过程。计算过程分为两步:①在梁自由端施加轴向荷载,进行静力分析;②在静力分析的基础上进行预应力状态下的谐响应分析。

图 5(a,b)分别为沿铝梁轴向施加拉压荷载后仿真计算得到的导纳实部信号,选择信号频率范围为 20 kHz~40 kHz。为了更清楚地观察信号的变化情况,分别将图 5(a,b)中 33 kHz~34.6 kHz 频段的信号放大,结果如图 5(c,d)所示,其中 0 代表无荷载的基准状态。由图 5(c)可以看到,随着轴向拉力的增大,导纳实部信号的波峰均向右偏移,且偏

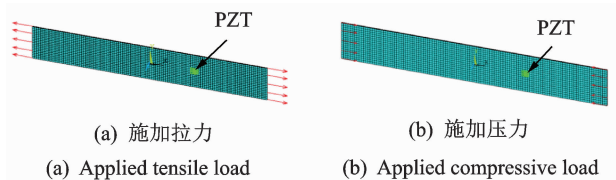


图 4 压电片-铝梁有限元模型

Fig. 4 Finite element model of PZT-aluminum structure

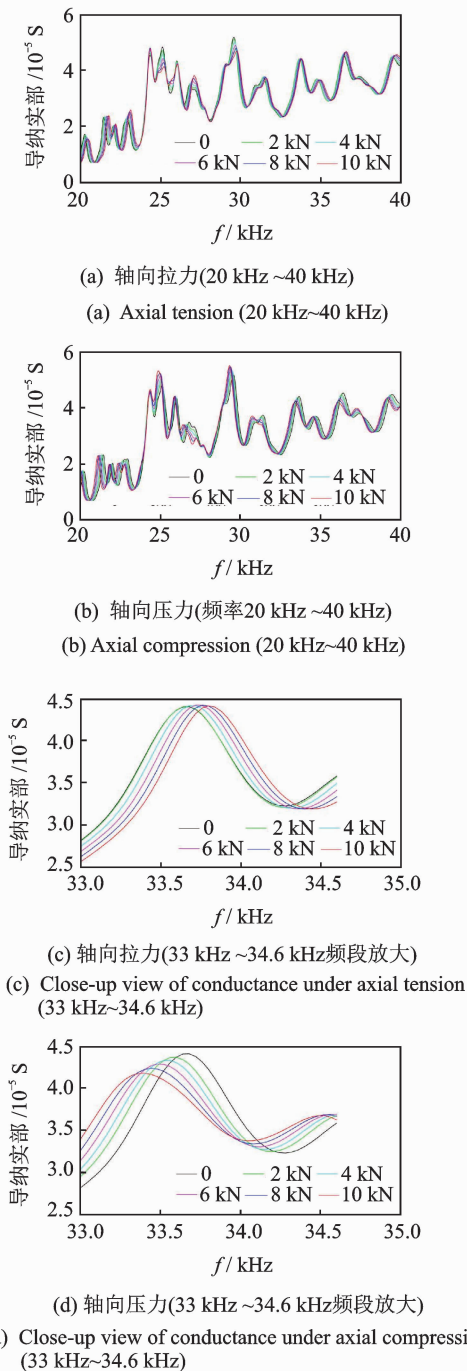


图5 铝梁导纳实部信号的仿真结果

Fig. 5 Numerical results of conductance signals acquired from PZT surfaces bonded on the aluminum beam

移程度与拉力大小呈正相关,这与上面的理论分析相符合,轴向拉力使得梁的固有频率提高,导致导纳曲线共振峰向右偏移,偏移程度与拉力大小成正比。由图5(d)可以看到,施加轴向压力使得导纳实部信号波峰向左偏移,且偏移程度与压力大小呈正相关,这是因为施加轴向压力降低了梁的固有频率。另外,图5(a,b)中24 kHz右边的第1个共振峰的位置和峰值大小几乎保持不变,这是因为该共振峰为

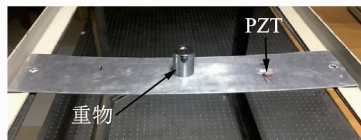
纵向振动峰,不受轴向荷载的影响。

从上述仿真结果可知,载荷作用会导致导纳曲线的波峰发生偏移,造成导纳时间序列的不平稳,而且各波峰变化方向一致,即各波峰频率间有着共同的变化趋势。因此,考虑在各波峰频率组成的时间序列之间构造平稳的线性组合,利用协整处理荷载工况变化引起的非平稳性问题,则可消除荷载对EMI方法的影响。

5 荷载影响导纳信号的实验研究

在仿真计算的基础上,笔者进行了荷载作用影响导纳信号的相关实验研究。实验装置如图6(a)所示,图中铝(型号为6061-T6)梁尺寸为600 mm×120 mm×2 mm,两端为简支边界条件。用丙烯酸酯结构胶将2个PZT(直径为12 mm,厚度为1 mm,型号为SMD12T06R412WL)分别粘贴在距离铝梁右端150 mm的上、下表面中心处。图6(b)所示为铝梁下表面粘贴PZT处的局部放大图。在铝梁中部依次放置不同质量的重物,即沿厚度方向施加线性荷载,从0 N(基准状态)到50 N,间隔为10 N,则铝梁上表面受压,下表面受拉。整个实验在室温25℃下进行。

实验所采用的导纳信号采集设备如图7所示,NI阻抗测试系统包含PXIe-1071机箱、PXIe-8840控制器、PXIe-6124高速数据采集卡以及BNC-2120屏蔽式接线盒等硬件搭建,并借助LabVIEW软件编程控制信号发射和采集。该套系统可以代替安捷伦4294A阻抗仪进行导纳信号采集,并实现EMI



(a) 静载下两端简支铝梁

(a) Aluminum beam simply supported under static load



(b) 铝梁下表面粘贴PZT处

(b) Close-up view of PZT bonded on the lower surface of the aluminum beam

图6 铝梁加载装置示意图

Fig. 6 Setup of aluminum beam under load

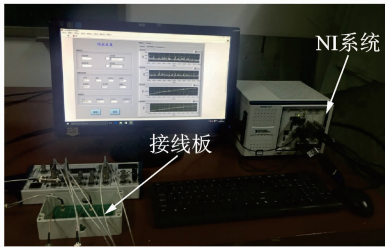


图 7 NI 阻抗测试系统
Fig. 7 NI EMI test system

的连续监测和信号处理等功能。实验中将 2 个 PZT 接入 NI 阻抗采集系统的自制电路中,施加荷载前与各次荷载施加并待稳定后,选择频率范围 30 kHz~40 kHz,利用 NI 阻抗采集系统采集各状态下铝梁上、下表面 PZT 的电导纳信号。为了得到稳定的导纳信号,每种状态进行 50 次重复测量后平均作为结果信号。

根据欧拉-伯努利梁理论可知,梁横截面上任一点处的弯曲应力为

$$\sigma_s = My/I \quad (14)$$

其中: M 为横截面上的弯矩; I 为横截面对中性轴的惯性矩; y 为所求应力点到中性轴的距离。

根据式(14)可计算得到施加不同荷载时梁上 PZT 处的弯曲应力。将各参数代入式(14)后计算可知,荷载为 50N 时铝梁上表面 PZT 处弯曲应力为 -46.9 MPa,相应的下表面 PZT 处弯曲应力为 46.9 MPa,低于该铝梁的弹性极限。因此,整个实验过程中铝梁处于弹性状态,不会由于荷载作用而引起结构的损伤,结构的健康状态是不变的,在温度不变的情况下荷载是唯一的影响因素。

图 8 所示为不同荷载状态下测得的导纳实部信号,为便于观察,此处只展示 39 kHz~40 kHz 频段的曲线图。可以观察到,随着荷载增大,铝梁上下表面产生的应力随之增大,拉应力作用使得导纳曲线

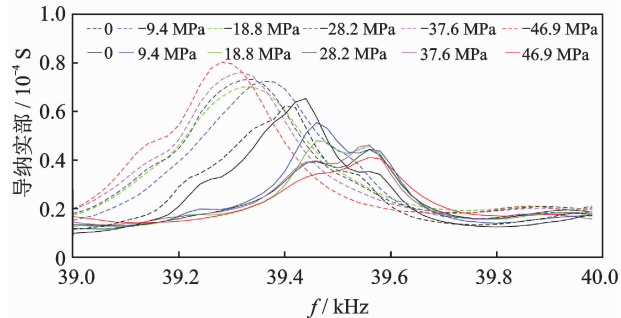


图 8 不同拉压荷载下铝梁的实验导纳实部信号对比
Fig. 8 Experimental results of admittance signals acquired from PZT transducers surfaced bonded on the aluminum beam under varying tensile and compressive loads

波峰向右偏移,而压应力作用导致导纳曲线波峰向左偏移,且偏移程度与应力大小呈正相关。这与上面的理论分析以及仿真结果相吻合,这些变化均是由于应力作用影响了结构的固有频率导致的。从图 8 还可以看出,导纳曲线波峰的峰值大小也发生了变化,产生这一变化的原因是由于附加的质量块使得结构的机械阻抗发生了变化。观察图 8 还发现,未施加荷载(0N)时,同一基准状态下 2 个 PZT 的导纳信号没有完全重合,这是由于 2 个 PZT 传感器的材质与所处位置存在微小差异。

6 协整处理动态应力影响 EMI 实验

6.1 实验设备及过程

通过以上研究发现,结构内应力的存在确实对 PZT 电导纳信号有较大影响,进而影响 EMI 方法进行结构健康监测的准确性,容易引起误判,因此需要消除应力对 EMI 导纳信号的影响。笔者采取协整方法处理这一问题,设计了动态荷载作用下铝梁的螺栓松动识别实验,验证该方法的可行性。

实验装置如图 9 所示,其中,铝(型号为 6061-T6)梁尺寸为 600 mm×120 mm×2 mm,两端用 4.8 级普通螺栓固定在框架上,用丙烯酸酯结构胶将 PZT(直径为 12 mm,厚度为 1 mm)粘贴于铝梁上表面距右端 150 mm 处。距离铝梁右端 290 mm 处放置 1 个 4.8 级普通螺栓,实验中通过松动该螺栓来引入损伤。利用信号发生器(Agilent33522A)输出随机激励信号,经过功率放大器(MB Dynamics MB500VI)放大后输入激振器(MB Dynamics MODAL 50AMB),由激振器带动铝梁振动。PZT 电导纳信号由图 7 所示的 NI 阻抗测试系统连续测量并保存。

首先,将螺栓拧至全紧状态,采集此时压电片上 40 kHz~50 kHz 频率段的电导纳信号作为无荷载下的基准信号,共采集 10 组信号;其次,通过激振器激励铝梁振动,并以 0.1 s 为时间间隔,持续采集此

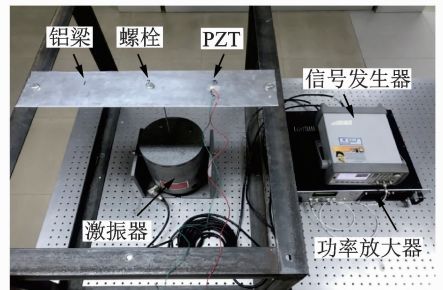


图 9 实验装置示意图
Fig. 9 Pictorial illustration of experimental setup

时 PZT 上的导纳信号,作为螺栓拧紧并施加动荷载工况下的信号;200 s 后,松动螺栓,采集螺栓松动、应力变化工况下的导纳信号,共持续采集 200 s;最后,再重新拧紧螺栓,采集最后 100 s 的导纳信号。整个实验过程总共采集得到 5 000 组导纳信号。分为螺栓拧紧无荷载基准状态、螺栓拧紧施加动荷载、螺栓松动施加动荷载以及螺栓再次拧紧施加动荷载 4 个阶段。

6.2 实验结果及讨论

选取前 3 个阶段的导纳实部曲线进行对比,结果如图 10 所示。从图中可以看出,螺栓拧紧并施加动荷载工况下采集的导纳实部曲线相比于基准状态下的曲线波峰数量更少,共振峰峰值普遍降低,曲线整体有向左偏移的趋势。这是因为压应力使得铝梁刚度减小,从而降低其固有频率,导致曲线共振峰向左偏移。从图 10 中还可观察到,相比于螺栓拧紧时,螺栓松动后的导纳实部曲线在局部存在比较复杂的变化,波峰数量有所增加。其原因是螺栓松动使得铝梁的局部刚度改变,从而影响铝梁的高阶振动特性。在应力和螺栓松动的耦合影响下,导纳曲线的变化并不是两种因素的简单叠加,而且并无明显的规律。因此,仅仅通过观察导纳实部曲线的变化很难判断铝梁是否出现螺栓松动,需要引入损伤指标来量化表征变化程度。

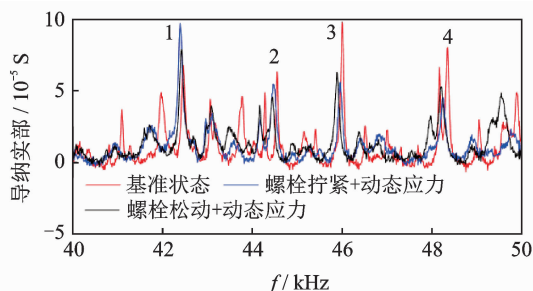


图 10 铝梁施加荷载和螺栓松动前后的导纳实部曲线对比
Fig. 10 Comparison of admittance signals before and after applying load and loosening the bolt

根据式(2)计算其他工况下测得导纳实部信号与基准信号间的损伤指标值如图 11 所示,损伤指标无量纲,横坐标表示测量次数。其中:A 点表示对铝梁施加振动的时间点;B 点与 C 点分别表示松动螺栓与拧紧螺栓的时间点。由图 11 可以看出:从 A 点开始,即铝梁内出现变化的应力后,损伤指标明显增大,从 10% 以下增大到 30%;其后 CCD 值主要在 30%~90% 范围内变化,表明应力对 EMI 方法中测得的电导纳信号有显著影响;而从 B 点之后,铝梁处于应力和螺栓松动的耦合影响下,此时损伤指标

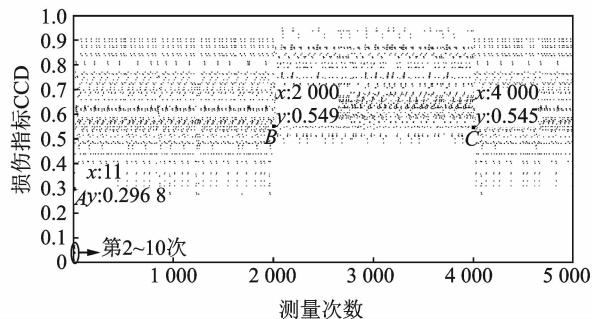


图 11 动态应力和螺栓松动影响下的损伤指标 CCD
Fig. 11 Damage metric CCD under the influence of dynamic stress and bolt loosening

在 50%~95% 之间波动;当从 C 点再次拧紧螺栓后,损伤指标大小又回到 30%~90% 之间。由此可知,在动态应力影响下,螺栓拧紧与松动状态下测得导纳信号计算所得损伤指标值的变化范围存在大部分重合,无显著区分。因此,在动态应力影响下无法通过损伤指标的变化来判断铝梁是否出现螺栓松动。这表明动态应力影响下用 EMI 方法不能准确识别出铝梁的螺栓松动,需要对信号进行协整处理以排除动态应力对铝梁螺栓松动识别的干扰。

6.3 信号后处理及分析

提取导纳实部曲线的峰值频率,形成频率时间序列,峰值位置如图 10 中的 1,2,3,4 所示。在整个测试过程中这 4 个峰值始终较为明显地存在,分别用 f_1, f_2, f_3, f_4 表示对应位置的频率。4 个频率时间序列如图 12 所示,其中:竖直虚线表示螺栓松动时间点;竖直实线表示螺栓拧紧时间点。由图 12 可以看出,螺栓松动后,高阶固有频率 f_1 和 f_4 轻微下降, f_3 明显下降,这是由于螺栓松动引起了结构固有频率的降低。但是 f_2 部分值增大,其原因是结构内存在变化的动应力,结构的不同频率范围对于应力的敏感性不同,应力对此阶固有频率的影响大于螺栓松动带来的影响,致使 f_2 部分值反而上升。

根据上面的理论分析,可以利用协整处理动态应力引起的铝梁频率特征参数的非平稳性问题。首先,对 f_1, f_2, f_3, f_4 在螺栓松动之前部分的时间序列分别进行 ADF 检验,检验结果表明,上述 4 个时间序列均是 1 阶非平稳时间序列,可以进行 Johansen 协整检验,通过协整检验后得到 2 个协整向量,即存在 2 组协整关系,选取任意一组协整关系建立协整方程,得到均值为 0 的稳态时间序列协整余量 ϵ ;其次,将螺栓松动之后部分由 4 个频率组成的时间序列代入已经建立的协整方程中,得到螺栓松动后的协整余量序列 ϵ_d 。两组协整关系得到的协

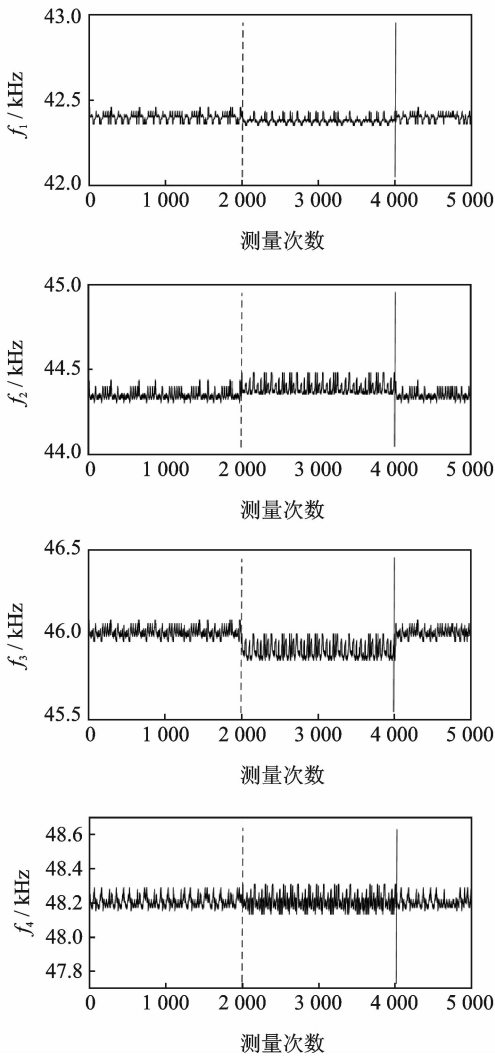


图 12 铝梁的 4 个高阶固有频率时间序列

Fig. 12 Four high natural frequency time series of the aluminum beam

整余量值虽然不完全相等,但变化趋势一致,此处只展示其中一组结果,如图 13 所示,协整余量无量纲。从图中可以看到,螺栓松动后, ϵ_d 明显大于 ϵ , 协整余量突然增大,重新拧紧螺栓后,协整余量有所降低,但是仍然大于螺栓松动之前的协整余量值。

当损伤出现时,此处即铝梁的螺栓松动,结构的高阶固有频率发生变化,其相互之间的协整关系随

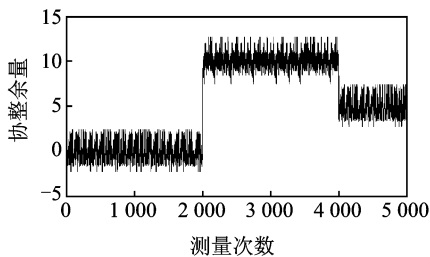


图 13 螺栓松动前后的协整余量序列

Fig. 13 Residual series of the co-integration model before and after loosening the bolt

之改变,原本的协整系数不再适用,此时若将损伤后结构同位置的高阶固有频率代入已经得到的协整关系式中,将会产生均值非 0 的协整余量序列跳跃,所以可以通过协整余量的突变来判定结构出现损伤。由图 13 可以看出,在测量次数为 2 000 时,协整余量发生了跳跃,即可判断此刻铝梁出现了螺栓松动。再次拧紧螺栓后,协整余量均值仍不为 0,这是因为和初次螺栓拧紧的程度不相同,变量之间的协整关系不一致。因此,协整消除了动态应力对 EMI 方法的影响,当铝梁内部的应力持续变化时,仍可以准确识别螺栓松动。

7 结 论

1) 研究了荷载对 EMI 结构损伤识别方法的影响,从理论上分析了轴向拉压荷载对 PZT 导纳实部信号的影响,并通过仿真计算和实验予以验证。结果表明:拉应力使梁的固有频率提高,系统谐振频率随之增大,导纳实部曲线的波峰向右偏移;反之,压应力降低结构的固有频率,导纳实部曲线波峰向左偏移,偏移程度与应力大小成正相关。同时,由于拉压荷载改变了结构的机械阻抗,波峰峰值大小也随之改变。

2) 使用协整处理动荷载对 EMI 方法的影响,从理论上分析了动荷载影响下铝梁的 4 阶高阶固有频率时间序列进行协整的可行性,总结了动荷载作用下 EMI 协整方法进行结构损伤识别的步骤,开展了动应力影响下铝梁结构的螺栓松动损伤识别实验,验证了该方法的有效性。

3) 采用的协整方法能够成功消除结构损伤识别中荷载作用的影响,但实际工程中结构处于复杂多变的环境工况中,可能存在多项因素的耦合影响,其中温度和荷载作为最普遍存在的影响因素,如何应用协整处理温度和荷载对 EMI 方法的耦合影响需要进一步深入的研究。

参 考 文 献

[1] LIANG C, SUN F P, ROGERS C A. Electro-mechanical impedance modeling of active material systems [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 21(3): 232-252.

[2] LIANG C. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems determination of the actuator power consumption and system energy transfer [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1997, 8(4): 335-343.

[3] SUN A F P, CHAUDHRY Z A, ROGERS C A, et

- al. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego, California:[s. n.], 1995:236-247.
- [4] PARK G, SOHN H, FARRAR C R, et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward[J]. Shock & Vibration Digest, 2003, 35(6):451-463.
- [5] WETHERHOLD R, MESSER M, PATRA A. Optimization of directionally attached piezoelectric actuators[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2003, 125(2):148-152.
- [6] SOH C K, LIM Y Y. Fatigue damage diagnosis and prognosis using electromechanical impedance technique [M]// Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures. Sawston Cambridge: Woodhead Publishing, 2016:429-446.
- [7] ZUO C, FENG X, ZHANG Y, et al. Crack detection in pipelines using multiple electromechanical impedance sensors[J]. Smart Material Structures, 2017, 26(10): 104004.
- [8] LIU P, WANG W, CHEN Y, et al. Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique [J]. Construction & Building Materials, 2017, 136: 450-455.
- [9] KUZNETSOV S, PAVELKO I, PANIDIS T, et al. Bolt-joint structural health monitoring by the method of electromechanical impedance[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2014, 86(3):207-214.
- [10] ROTH W, GIURGIUTIU V. Adhesive disbond detection using piezoelectric wafer active sensors[C]// Society of Photo-optical Instrumentation Engineers Conference Series. San Diego, California:International Society for Optics and Photonics, 2015:94370S.
- [11] NA W S. Low cost technique for detecting adhesive debonding damage of glass epoxy composite plate using an impedance based non-destructive testing method [J]. Composite Structures, 2018, 189:99-106.
- [12] LIM Y Y, ZEE KWONG K, LIEW W Y H, et al. Non-destructive concrete strength evaluation using smart piezoelectric transducer—a comparative study [J]. Smart Material Structures, 2016, 25(8):085021.
- [13] WANG D, SONG H, ZHU H. Embedded 3D electromechanical impedance model for strength monitoring of concrete using a PZT transducer[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(11):115019.
- [14] CHOI S K, TAREEN N, KIM J, et al. Real-time strength monitoring for concrete structures using EMI technique incorporating with fuzzy logic[J]. Applied Sciences, 2018, 8(1):75.
- [15] AI D, LUO H, WANG C, et al. Monitoring of the load-induced RC beam structural tension/compression stress and damage using piezoelectric transducers[J]. Engineering Structures, 2018, 154:38-51.
- [16] WONGI S N A, BAKE J. A Review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures [J]. Sensors, 2018, 18(5):1307.
- [17] ONG C W, NAIDU A S K. Application of the electromechanical impedance method for the identification of in-situ stress in structures[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Melbourne, Australia:[s. n.], 2002:503-514.
- [18] ANNAMDAS V, YANG Y, SOH C. Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers[J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16(5):1888.
- [19] LIM Y Y, SOH C K. Effect of varying axial load under fixed boundary condition on admittance signatures of electromechanical impedance technique[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2012, 23(7):815-826.
- [20] SCALEA F L D. Temperature and axial stress effects in electromechanical-impedance-method-based structural health monitoring[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. San Diego, California:[s. n.], 2014:90641O.
- [21] YANG J, ZHU H, WANG D, et al. The compensation technique of tensile force effect on the electromechanical impedance method for structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2015, 26(18): 2477-2488.
- [22] BAPTISTA F, BUDOYA D, ALMEIDA V, et al. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring[J]. Sensors, 2014, 14(1):1208-1227.
- [23] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1989: 367-376.
- [24] ENGLE R F, GRANGER C W J. Co-integration and error correction; representation, estimation, and testing[J]. Econometrica, 1987, 55(2):251-276.
- [25] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 154-157, 272-274.
- [26] MADHAV A V G, KIONG S C. Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2010, 21(1):41-59.



第一作者简介:揭小落,女,1994年5月生,博士生。主要研究方向为基于机电阻抗的结构健康监测。

E-mail: jie_xiaolu@whu.edu.cn

