基于 ADALINE 网络的导波载荷 影响补偿方法



王熠,邱雷*,袁慎芳

南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘 要:载荷对导波传播有显著影响,给基于导波的结构健康监测技术带来了不确定性。为提高基于导波的损伤诊断方法的可靠性,提出了一种基于自适应线性神经元(Adaptive Linear Neuron, ADALINE)网络的载荷补偿方法。通过建立载荷补偿标准,对最优补偿网络参数及载荷梯度范围进行设计,有效减少基准信号存储,实现大范围载荷补偿。通过开展碳纤维复合材料结构载荷影响下的损伤监测试验,验证了该方法的有效性,载荷补偿范围达0~100MPa,补偿间隔20MPa,补偿精度达到-25dB,提高了载荷影响下的损伤诊断可靠性。

关键词:结构健康监测,载荷影响,载荷补偿,ADALINE网络,导波

中图分类号:TB553

文献标识码:A

随着航空科学技术的飞速发展,轻质、高可靠性、高机 动性、高生存力及服役时间长的结构设计目标对传统飞行 器的安全评定及维护保障提出了挑战,这也促进了结构健 康监测(Structural Health Monitoring, SHM)技术的产生与 发展^[1-6]。基于导波的结构监测方法,对小损伤敏感,可实 现区域监测,被视为一种很有前景的损伤监测方法^[7-13]。由 于结构边界条件的复杂性,导致直接分析接收信号实现损 伤监测存在一定的难度,因此通常将基准信号与监测信号 对比或相减,分析信号前后的差别或特征参数变化,实现对 结构的损伤评估。然而导波对环境因素的变化也较为敏 感,导致结构服役环境的复杂性限制了其应用。

载荷作为影响导波传播的主要因素之一。近年来,在结构健康监测领域也逐渐关注载荷对导波的影响。Michaels等在载荷影响机理上进行了较为深入的探讨,对导波在单向0~120MPa准静态载荷下的声弹性效应进行了理论分析,其研究发现当导波传播方向与载荷作用方向相同时,高频导波S。模式相速度随载荷的增大而呈线性减小,且同一载荷大小的作用下,导波在各个方向上的传播速度不同^[14-16]。Amjad等

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2020.01.002

通过试验方法对板结构中传播的导波受载荷影响情况进行 了定量化的统计,*A*₀模式在低频情况下,相速度随载荷增大 而变快的,高频*A*₀和*S*₀模式的相速度是随载荷增大而变慢 的^[17]。Kang、Roy和Chang等学者将压电影响考虑在内,建立 了压电常数*d*₃₁随载荷变化的线性模型,认为导波信号幅值受 载荷影响主要是由于*d*₃₁的变化,飞行时间则是由于结构声弹 效应引起^[18-20]。邱雷等将载荷引起的声弹效应和*d*₃₁变化均 考虑在内,进行了载荷影响下的压电导波多物理场仿真,得 到单轴拉伸载荷下的仿真结果,与试验得到的载荷影响下的 速度和幅值变化结果吻合^[21]。

针对导波信号补偿方法研究主要集中于温度影响,研究者们提出了包括最优基准扩展(BSS)和最优基准选择法 (OBS),基于信号处理以及理论建模的补偿方法^[22-25]。而 针对导波的载荷补偿方法研究较少,Roy和Chang等在其 提出的载荷影响理论模型基础上,通过单向载荷拉升试验 获取实测数据来训练模型的参数,从而获得一个完整的数 值参数用于后续监测中的载荷补偿^[20]。卿新林等采用有限 元法对压电传感器获得的结构中导波的载荷效应进行了分

*通信作者.Tel.: 025-84892254 E-mail: lei.qiu@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2019-10-30; 退修日期: 2019-11-20; 录用日期: 2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金(51635008,51921003,51975292);教育部霍英东青年教师基金(161048);江苏高校优势学科建设工程

引用格式: Wang Yi, Qiu Lei, Yuan Shenfang.Compensation method for load effect on guided wave propagation based on ADALINE network [J].Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(01):17-24. 王熠,邱雷,袁慎芳.基于ADALINE 网络的导波载荷影响补偿方法[J]. 航空科学技术, 2020, 31(01):17-24.

析,发现幅值和相位随载荷的变化是线性的,并且在此基础 上,建立了一种基准信号与补偿信号之间的线性数字模型, 对信号添加幅值因子与相移,并通过获得多个路径导波信 号幅值相位随载荷变化的斜率,代入到其建立的数字模型 中,以此对传感网络中的监测信号进行载荷补偿^[26]。

综上所述,载荷对于导波的影响是显著的,目前的载荷 补偿方法研究较少,已有方法需要进行理论建模且计算量 大。针对上述问题,本文提出了一种基于 ADALINE 网络的 载荷补偿方法。该方法在不需要进行载荷影响理论建模的 基础上,通过构建目标载荷下导波响应信号和基准载荷下导 波响应信号的数学模型,通过训练神经网络,得到基准信号 附近载荷的信号补偿参数,能显著减少温度补偿所需基线, 实现大范围温度的导波补偿,并且具有较高的计算效率。

1 基于 ADALINE 网络载荷补偿方法

1.1 补偿原理

图1为载荷作用下的导波传播示意图,从信号与系统的角度将正逆压电效应、胶层的作用、结构的作用都考虑为传递函数。对于这样一个包含PZT₄和PZT_B两个传感器的激励传感通道,PZT₄作用了激励电压信号V_a,则相应的PZT_B的响应信号在频域的表达式为:

 $V_{AB}(\omega) = K_s(\omega)G_{AB}(\omega)K_a(\omega)V_a(\omega)$ (1) 式中: $K_s(\omega)$ 和 $K_a(\omega)$ 分别为压电片在激励和传感过程中考 虑了胶层耦合作用的电机和机电耦合系数。 $G_{AB}(\omega)$ 表示导 波在结构中从输入端 PZT_A到输出端 PZT_B这一过程中与应 变相关的传递函数。





当载荷发生变化时, $K_s(\omega)$ 、 $K_a(\omega)$ 和 $G_{AB}(\omega)$ 都会受到 载荷的影响。因此得到在 L_1 和 L_2 载荷作用下响应信号可以 分别表示为式(2)和式(3):

$$V_{AB}(\omega, L_1) = K_s(\omega, L_1)G_{AB}(\omega, L_1)K_a(\omega, L_1)V_a(\omega)$$
(2)

$$V_{AB}(\omega, L_2) = K_s(\omega, L_2)G_{AB}(\omega, L_2)K_a(\omega, L_2)V_a(\omega)$$
(3)

$$V_{AB}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{L}_2) = H(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{L}_1, \boldsymbol{L}_2) V_{AB}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{L}_1)$$
(4)

$$\vec{\mathbf{x}} \div : H(\boldsymbol{\omega}, L_1, L_2) = \frac{K_s(\boldsymbol{\omega}, L_2)G_{AB}(\boldsymbol{\omega}, L_2)K_a(\boldsymbol{\omega}, L_2)}{K_s(\boldsymbol{\omega}, L_1)G_{AB}(\boldsymbol{\omega}, L_1)K_a(\boldsymbol{\omega}, L_1)}$$

由式(4)可以知道,存在一个系统,其输入为 $V_{AB}(\omega,L_1)$, 输出为 $V_{AB}(\omega,L_2)$,传递函数为 $H(\omega,L_1,L_2)$ 。通过构建 ADALINE网络模拟这样一个线性输入输出系统,通过数据 库的训练来模拟载荷对导波信号的影响。训练完成后,只 需要少量的基准来实现大载荷段内的补偿。

1.2 补偿流程

基于上述载荷补偿方法原理,给出了基于 ADALINE 网络的载荷补偿方法流程,分为以下三部分。

(1) 获取数据库

在结构各受载状态下,获取导波响应信号数据库。

(2) 网络训练

根据载荷补偿范围以及补偿标准进行网络训练,获得 目标载荷下的网络权值,此时只需要存储少量的基准信号 及网络权值。图2为ADALINE网络训练示意图,以 L_0 载荷 下的导波信号作为基准,以 L_0, L_1, \dots, L_N 载荷下的导波信号 作为参考,通过网络训练获得网络权值。



图2 ADALINE 网络训练示意图 Fig.2 Schematic diagram of ADALINE network training

(3) 网络使用

根据实测结构受载情况,调用存储的目标载荷下的基准信号及网络权值,进行载荷补偿,获得此载荷下的基准信号。图3为ADALINE网络使用示意图,在实际监测过程中,测得结构受L_N载荷,调用L_N载荷对应的L₀载荷下的导波信号,结合其对应的网络权值,计算得到补偿后的L_N载荷对应的基准信号,与实际在L_N载荷下获得的监测信号对比,实现损伤诊断。

1.3 网络参数设计

)

ADALINE 网络在数字信号处理领域可以看作是有限 长的单位冲击响应滤波器(Finite Impulse Response, FIR), 它可以在保证任意幅频特性的同时具有严格的线性相频特 性,同时其单位抽样响应是有限长的,因而滤波器是稳定的 系统。根据这种特性,可以用于补偿载荷变化对导波信号 造成的幅值、相位变化。





自适应滤波器 ADALINE 网络的结构包含输入层和 ADALINE 层两层,如图4所示。输入层是由抽头延迟线构成,ADALINE 层传递函数是线性传递函数。输入信号f(t) 为基准载荷下的导波信号,在抽头延迟线的输出端得到*M* 维的矢量,包含当前时刻的输入信号和抽头延迟1到*M*-1 时间步长的信号,*M*代表抽头延迟线的阶数。



图4 自适应滤波器 ADALINE 网络的结构 Fig.4 Structure of ADALINE network with adaptive filter

网络的输出可以表示为:

$$a(t) = \sum_{m=1}^{M} w_m f(t - M + 1)$$
(5)

式中:*a*(*t*)为目标载荷下获得的导波信号,*w*_m是可随载荷变化 自适应调节的滤波器参数,即网络权值。将其表示为矩阵形式:

$$a = w z$$

$$w = [w_1 w_2 \cdots w_m]^{\mathrm{T}}$$

$$z = [f(t)f(t-1)\cdots f(t-M+1)]^{\mathrm{T}}$$
(6)

本文综合考虑训练精度以及训练效率,设计了2阶抽 头延迟线自适应滤波器 ADALINE 网络,即*M*=2。则L载荷 下的基准信号经抽头延迟后为:

$$\boldsymbol{z}_{b} = \begin{bmatrix} f_{b}(t) \\ f_{b}(t-1) \\ f_{b}(t-2) \end{bmatrix}$$
(7)

将另一载荷下的基准信号f(t)作为参考信号:

 $t = f(t) \tag{8}$

采用神经网络中常用的均方误差(Mean Square Error, MSE)进行ADALINE网络训练:

$$F(\boldsymbol{w}) = E(e^2) = E[(t-a)^2] = E[(t-\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}_b)^2]$$

= $E[t^2] - 2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}E[t\boldsymbol{z}_b] + \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}E[\boldsymbol{z}_b\boldsymbol{z}_b^{\mathrm{T}}]\boldsymbol{w}$ (9)

将式(9)写成矩阵形式:

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{w}) = \boldsymbol{c} - 2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h} + \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{w}$$
(10)

式中: $c = E[t^2]$ 为基准信号t的自相关矩阵, $h = E[tz_b]$ 为网 络输入输出的互相关矩阵, $R = E[z_b z_b^{T}]$ 为网络输入的自相 关矩阵。采用梯度法求函数F(w)的最小值,得到式(11):

$$-2h + 2Rw = 0 \tag{11}$$

因此,如果自相关矩阵*R*是正定的,则将有一个唯一的 驻点,并且是一个强极小点,即网络的权值可以计算为:

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{h} \tag{12}$$

完成上述过程后,在实际的监测过程中,通过测得当前 结构状态下所受载荷,选择与之匹配的补偿基准信号及权 值矢量,即可获得补偿后当前载荷下的基准信号,结合基于 导波的损伤诊断方法即可实现对结构的状态监测。

1.4 补偿精度

网络训练完成后,依然会存在一些误差,而基于导波的 结构损伤诊断方法通常会用到基准与监测信号作差得到的 散射信号,因此本文选择归一化最大误差作为补偿精度的 标准,即参考与补偿后信号差信号最大幅值的绝对值除以 参考信号的最大绝对峰值,定义:

$$\operatorname{Er} = 20 \operatorname{lg} \left(\frac{\operatorname{max} \left(\left| a(t) - f(t) \right| \right)}{\operatorname{max} \left(\left| f(t) \right| \right)} \right)$$
(13)

本文通过在结构中粘贴模拟损伤,分析损伤发生前后 信号的归一化误差,研究发现:当结构中没有损伤时的归一 化最大误差在-30dB左右,有损伤时为-5dB左右。因此将 补偿精度设置为-25dB,即补偿后精度Er<-25dB。

1.5 网络训练过程

基于上述对补偿网络结构参数设计,以及确定的补偿精 度,得到如图5所示的基于ADALINE网络的训练过程。具 体步骤如下:(1)当结构处于健康状态时,获取结构各受载 状态下的基准信号;(2)选择补偿载荷范围;(3)以某一载荷 下的基准信号作为网络输入,另一载荷下的基准信号作为网 络输出,对网络权值进行训练;(4)通过最小均方误差进行参 数优化;(5)利用获得的网络权值与输入的基准信号计算补 偿后的基准信号;(6)计算补偿后的信号与参考信号的误差, 若满足补偿精度存储此时的输入基准信号、权值以及载荷补 偿范围,若不满足则调整补偿载荷范围重复步骤(3)。



Fig.5 Process and using of load condition

2 载荷补偿方法的试验验证

为验证本文提出的载荷补偿方法的有效性,在碳纤维 复合材料板上,开展了载荷影响下的损伤监测试验验证,实 现了大载荷段的补偿,提高了损伤诊断可靠性。

2.1 试验设置

试验选择了一块尺寸为250mm×40mm×2.2mm的碳纤 维板复合材料板,如图6所示,在其表面粘贴了两枚压电 片,压电片间距为150mm,其中PZT₁用作激励压电片,PZT₂ 用作传感,组成传感通道,两枚压电片距离上下边界为 20mm、距离左右边界为50mm,如图7所示。



图6 带有压电片的碳纤维板 Fig.6 Carbon fiber plate with piezoelectric transducers



图7 试件尺寸及压电片位置

Fig.7 Specimen size and position of piezoelectric transducers

试验系统如图8所示,包括用于提供载荷的拉伸机及 其控制系统,用于激励采集导波信号的集成导波SHM系 统,以及一台动态应变仪。试验中采用正弦调制五波峰信 号作为激励信号,振幅为±70V,其中心频率设置为60kHz, 采样率设定为10MSPS。载荷范围设置为0~100MPa,步进 5MPa。试验过程分为两部分:(1)在结构处于健康状态时, 利用拉伸机提供各级载荷条件,在各级载荷保载状态下重 复采集两次导波信号;(2)在试件中心粘贴10mm×10mm吸 波材料用于模拟损伤,重复步骤(1),获取结构损伤状态下 的导波信号,采集信号一次。



图8 载荷影响导波试验 Fig.8 Guided wave experiment under load condition

2.2 载荷对信号的影响

图9为不同载荷级别下的导波原始信号,对直达波峰 值部分进行放大,可以看出,载荷对信号的影响是显著的, 相位出现了明显的前移,且幅值变大。

为了定量分析信号随载荷的变化,图 10 及图 11 给出了 信号直达波峰幅值(绝对值)以及相位统计结果,并进行了线 性拟合。可以看出信号幅值随着载荷的增大而增大,相位则 是减小,且两特征参数随着载荷的增大基本呈线性变化。

表1给出了线性拟合优度及拟合斜率。幅值变化率为 1mV·MPa⁻¹,相位变化率为-5.57×10⁻⁵ms·MPa⁻¹,变化均较 大。表中还给出了两种参数的线性拟合优度,其中信号幅 值拟合优度大于0.96,信号相位的拟合优度大于0.98,表明 信号特征与载荷之间存在较好的线性关系。

2.3 载荷补偿结果

本节将基于自适应滤波器 ADALINE 网络的载荷补偿 方法,应用于复合材料平板上进行导波信号的载荷补偿。

图 12 为以 50MPa 应力下的导波信号直达波段作为网 络输入,其余载荷下的导波信号作为参考,得到的补偿信号 与参考信号的归一化误差值,可以看出在没有进行补偿时, 归一化最大误差均大于补偿精度-25dB,经过补偿后的误 差 40MPa、45MPa、55MPa 以及 60MPa下的误差均小于-



Fig.9 Guided wave signals under different load condition



图 11 载荷对信号相位的影响 Fig.11 The influence of load on signal phase

.。 应力/MPa 60

80

100

40

25dB。由此将载荷补偿范围设置为20MPa。

20

0

为验证载荷补偿范围设置的合理性,分别以10MPa、30MPa、50MPa、70MPa以及90MPa为网络输入,对其余载



荷下的导波信号进行补偿,补偿后的归一化最大误差如图 13所示。可以看出,0~100MPa下的信号均得到补偿,且经 过补偿后,所有载荷下的补偿误差均小于-25dB,表明补偿 载荷范围设置是合理的。





以60MPa下获得的导波信号为例,如图14所示,相比 于结构未受载荷时,信号差别较大,差信号幅值接近2V。 若结构在此受载状态下产生损伤,再以结构未受载时的信 号作为基准,用于损伤监测,必然会产生较大误差。

图 15 为将 50MPa 下的信号补偿到 60MPa 后得到的补 偿信号,可以看出与实际获得的 60MPa 下的基准信号差别



图 14 0MPa与60MPa下信号对比 Fig.14 Comparison of signals under 0MPa and 60MPa



Fig.15 Comparison of signals between monitoring and compensation under 60MPa

较小,且作差得到的差信号幅值仅0.05V左右。若以此时 的补偿信号作为基准用于损伤诊断,能有效提高损伤诊断 精度。

2.4 载荷补偿方法用于损伤诊断

本节为了验证本文提出的载荷补偿方法的有效性,与基于 损伤因子的损伤诊断方法结合,实现碳纤维复合材料受载状态 下的损伤评估。损伤因子选用反映信号之间相关性的互相关 损伤因子,计算方法如式(14)所示:

$$\mathrm{DI}(H,D) = 1 - \sqrt{\frac{\left\{\int_{t_1}^{t_2} H(t) D(t) \mathrm{d}t\right\}^2}{\left\{\int_{t_1}^{t_2} H^2(t) \mathrm{d}t \int_{t_1}^{t_2} D^2(t) \mathrm{d}t\right\}}}$$
(14)

式中:H(t)为健康信号;D(t)为损伤信号;t₁,t₂分别为信号截取 起始和截止时间。

图16为在未对信号进行补偿,直接以结构未受载状态 下的信号为基准,提取损伤因子的结果,可以看出在载荷为 10~50MPa区间时,损伤因子小于损伤阈值0.1,则应判别结 构未发生损伤,而此时结构中已经有损伤产生,表明载荷的 存在导致了损伤误判。而在应用了本文提出的载荷补偿方 法后,利用补偿得到的各级载荷下的基准信号提取损伤因 子结果如图17所示,可以发现在载荷为0~100MPa的区间, 损伤因子均大于0.1,判别此时结构有损伤产生,实现了对 结构中的损伤监测。



图16 没有补偿的损伤监测结果







3 结论

本文针对载荷对导波的影响,对基于导波的结构健康 监测技术带来不确定性问题,建立了基于 ADALINE 网络 的载荷补偿方法,研究了方法基本原理及补偿流程,并对网 络参数进行设计,最后在碳纤维复合材料结构上进行了试 验验证。得到以下结论:

(1)本文方法能有效实现载荷补偿,补偿范围 0~100MPa,补偿间隔20MPa,且补偿后误差小于-25dB。

(2)将载荷补偿方法与基于损伤因子的损伤诊断方法 结合,实现了对结构在载荷影响下的损伤诊断,提高了损伤 监测可靠性。

参考文献

 [1] 袁慎芳.结构健康监控[M].北京:国防工业出版社,2007.
 Yuan Shenfang. Structural health monitoring[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

- [2] 王利恒.复合材料飞机结构健康监测系统的若干问题探讨
 [J].航空科学技术, 2011(5):63-66.
 Wang Liheng. Discussion on composite structural health monitoring system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(5):63-66. (in Chinese)
- [3] 曲帆, 邢晨光, 郭鑫. 国外老龄化飞机结构健康监控方法[J]. 航空科学技术, 2014, 25(9):1-5.

Qu Fan, Xing Chenguang, Guo Xin. Study on foreign aging airframes structural condition monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(9):1-5. (in Chinese)

- [4] 陈伟, 罗华. 多传感器信息融合技术与无人机 PHM 系统[J].
 航空科学技术, 2009(6):6-7,16.
 Chen Wei, Luo Hua. The multisensory data fusion technology and the UAV PHM system[J]. Aeronautical Science &
- Technology, 2009(6):6-7,16. (in Chinese)
 [5] 孙侠生,肖迎春.飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J]. 航空学报, 2014, 35(12):3199-3212.
 Sun Xiasheng, Xiao Yingchun. Opportunities and challenges of aircraft structure health monitoring technology[J]. Acta Aeronautia et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3199-3212. (in Chinese)
- [6] 刘晓明, 王国才, 熊峻江. 飞机结构健康监控中的信息获取技术[J]. 航空科学技术, 2012(3):56-60.

Liu Xiaoming, Wang Guocai, Xiong Junjiang. Information acquisition technology in aircraft structure health monitoring [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(3): 56-60. (in Chinese)

- [7] Su Z, Ye L, Lu Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3):753-780.
- [8] Qiu L, Yuan S, Zhang X, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 105014.
- [9] Chen X, Michaels J E, Michaels T E. A methodology for estimating guided wave scattering patterns from sparse transducer array measurements[J]. IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62 (1): 208-209.
- [10] Qing X, Li W, Wang Y, et al. Piezoelectric transducer-based

structural health monitoring for aircraft applications[J]. Sensors, 2019, 19(3): 545.

- [11] 刘国强,肖迎春,张华,等.复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法 [J].复合材料学报,2018,35(2):311-319.
 Liu Guoqiang, Xiao Yingchun, Zhang Hua, et al. Probabilistic imaging method for damage identification of reinforced composite panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 311-319. (in Chinese)
- [12] Shen Y, Giurgiutiu V. Wave form revealer: an analytical framework and predictive tool for the simulation of multimodal guided wave propagation and interaction with damage [J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(5):491-511.
- [13] Zeng L, Lin J, Huang L, et al. Amplitude dispersion compensation for damage detection using ultrasonic guided waves[J]. Sensors, 2016, 16(10):1623.
- [14] Gandhi N. Determination of dispersion curves for acoustoelastic lamb wave propagation[D]. Georgia Institute of Technology, 2010.
- [15] Lee S J, Gandhi N, Michaels J E, et al. Comparison of the effects of applied loads and temperature variations on guided wave propagation[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 2011.
- [16] Gandhi N, Michaels J E, Lee S J. Acoustoelastic lamb wave propagation in a homogeneous, isotropic aluminum plate[C]// AIP Conference Proceedings. AIP, 2011.
- [17] Amjad U, Jha D, Tarar K S, et al. Determination of the stress dependence of the velocity of lamb waves in aluminum plates [C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2011. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [18] Kang L H, Lee D O, Han J H. A measurement method for piezoelectric material properties under longitudinal compressive stress-a compression test method for thin piezoelectric materials [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(6): 065701.
- [19] Roy S, Ladpli P, Lonkar K, et al. Structural damage detection using ultrasonic guided waves under varying ambient temperature and loading environments[D]. Stanford University, 2014.
- [20] Roy S, Ladpli P, Chang F K. Load monitoring and compensation strategies for guided-waves based structural health monitoring using piezoelectric transducers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 351: 206-220.
- [21] Qiu L, Yan X, Lin X, et al. Multiphysics simulation method of

lamb wave propagation with piezoelectric transducers under load condition[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5):18-33.

- [22] Lu Y, Michaels J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. Ultrasonics, 2005, 43(9): 717-731.
- [23] Konstantinidis G, Drinkwater B W, Wilcox P D. The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(4): 967-976.
- [24] Roy S, Lonkar K, Janapati V, et al. Physics based temperature compensation strategy for structural health monitoring[C]//The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2011.
- [25] Marzani A, Salamone S. Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors[J].

Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30: 204-217.

[26] Sun H, Zhang A, Wang Y, et al. Numerical modeling of the load effect on PZT-induced guided wave for load compensation of damage detection[C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017. International Society for Optics and Photonics, 2017. (责任编辑 皮卫东)

作者简介

王熠(1995-)男,硕士研究生。主要研究方向:基于压电-导波的载荷补偿方法。 邱雷(1983-)男,教授。主要研究方向:智能材料与结构、 结构健康监测研究与先进传感技术。 Tel: 025-84892254 E-mail: lei.qiu@nuaa.edu.cn 袁慎芳(1968-)女,教授。主要研究方向:智能材料与结 构、结构健康监测研究与先进传感技术。

Compensation Method for Load Effect on Guided Wave Propagation Based on ADALINE Network

Wang Yi, Qiu Lei*, Yuan Shenfang

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Load condition has a significant effect on guided wave propagation, which brings uncertainty to the structural health monitoring technology based on guided wave. In order to improve the reliability of guided wave based damage diagnosis method, a load compensation method based on Adaptive Linear Neuron (ADALINE) network is proposed. By establishing the load compensation standard and designing the optimal compensation network parameters and load gradient range, this method can effectively reduce the storage of reference signal and realize large-scale load compensation. Then the effectiveness of the method is verified during the damage monitoring experiment of carbon fiber composite structure under the influence of load. The compensation range of the load compensation interval is 20MPa, and the compensation accuracy is -25dB, which improve the reliability of damage diagnosis under the influence of load.

Key Words: structural health monitoring; load effect; load compensation; ADALINE network; guided wave

Received: 2019-10-30; Revised: 2019-11-20; Accepted: 2019-12-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51635008, 1921003, 51975292); The Fok Ying Tung Education Foundation of China (161048); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions of China ***Corresponding author.Tel. :** 025-84892254 **E-mail:** lei.qiu@nuaa.edu.cn