

结构损伤在线监测回波信号处理方法研究^{*}

Review on Structural Damage Online Monitoring Based on Ultrasonic Echo Wave Signal Processing

北京航空航天大学自动化科学与电器工程学院 袁梅 董韶鹏
北京全路通信信号研究设计院有限公司 鲍鹏宇

[摘要] 基于超声波回波信号分析的结构损伤在线监测方法具有简单、快速、有效的特点,满足结构损伤在线监测的实时性要求。按照数据分析处理变换域的不同,分别对频率域、时频域和时空域3类损伤信号变换方法的国内外研究发展现状进行了总结和归纳,并着重分析了各类信号处理方法的分类、原理、应用领域,以及在国内外损伤在线监测领域所取得的成果。最后对各类方法的优缺点进行了总结,并针对损伤监测信号处理的具体情况,对目前亟待解决的问题进行了分析和展望。

关键词: 超声波 兰姆波 信号处理 损伤监测

[BSTRACT] Structural damage monitoring signal processing method based on ultrasonic echo wave has the characteristic of simpleness, rapidness and effectiveness, which satisfies the real time damage monitoring requirement. In accordance with the difference of data analysis transform domain, the review on research and development status of three kinds of damage signal transform method, which are frequency, time-frequency and time-space domain, are summarized. The classification, principle, application field and achievement in domestic and international damage monitoring domain of each signal processing method are analyzed emphatically. At the end, the advantage and disadvantage of each method are summarized. And according to the specific condition of damage monitoring signal processing, the problems to be solved urgently are analyzed and prospected.

Keywords: Ultrasonic Lamb wave Signal processing Damage monitoring

结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)是一个联合多种不同学科分支的研究领域,适用于航空航天飞行器、船舶舰艇、高速列车、大型桥梁等与人民生

命财产安全息息相关、服役周期长、造价及维护费用较高的国民基础设施和国防大型武器装备的工作状态的实时监测、预报和评估,可以保障其在服役期内的安全性,从而降低维护费用,延长使用周期。

近20年,随着传感技术、信号采集与处理技术、微处理技术以及无线通信技术的发展,利用超声波的传播特性对发生在结构上的损伤进行识别、定位和定量的方法取得了很大的进展。超声波在结构中的传播特性与其所在介质密切相关,而损伤会使得结构的物理参数发生变化,进而影响到结构中超声波的传播特性。目前,可以使用被动监测与主动激励两种方式来获得结构中传播的超声波信号。通过分析这些超声波所包含的信息,即可识别结构是否存在损伤。由于采用基于超声弹性波回波原理的损伤监测技术具有实时、可靠的特点,因此应用超声波方法对重大工程结构的工作状态及其损伤状态进行长期监测的必要性和有效性正逐渐得到各个领域的认同。

基于超声波回波的损伤监测方法需要对监测的数据进行实时处理,本文根据数据处理方法所在域的不同,将损伤监测方法分为频率域、时频域和时空域3类,并分别综述了这3类损伤监测方法在国内外的的发展情况,最后提出了该领域中有待于进一步深入研究的问题。

1 频率域损伤信号处理方法

常用的损伤信号频域处理方法包括频域滤波和频谱分析两种。当信号和噪声频率范围交叠的部分较少时,可使用频域滤波器进行噪声消除;当结构中存在损伤时,传感器采集到的超声波信号的频谱会随着损伤的不同而产生相应的变化,可通过分析频谱的变化获得结构的损伤信息。下面对这两种方法分别进行介绍。

1.1 频谱滤波法

在损伤信号与噪声信号频谱交叠较少的情况下,基于频谱滤波的信号处理主要使用带通滤波器进行噪声消除,但需要信号满足以下的条件^[1]:

^{*} 国家自然科学基金(51375030)资助。

(1) 信号中 有用部分的频带范围事先已知;

(2) 噪声信号属于窄频带信号,可由带通或高通滤波器消除;

(3) 所处理的信号为平稳信号,不具有奇异部分或突变特性。

由于频域滤波方法的使用条件较为严格,因此在损伤监测应用时受到一定的限制。

1.2 频谱分析法

传感器采集到信号的频率谱中包含了大量与结构相关的信息。结构中存在损伤时,信号的频谱会发生相应的变化。通过分析频谱的特征,可以对结构中产生的损伤进行识别。19 世纪末, Schuster 提出用 Fourier 级数的幅度平方作为函数中功率的度量,这是经典谱估计的最早提法,这种提法至今仍然被沿用。通过计算信号 Fourier 变换 $X(f)$ 模的平方,可获得待分析信号的功率谱 $S_{xx}(f)$ 。通常情况下,为了获得损伤特征,定义功率谱的各阶距 M_n 如下^[2]:

$$M_n = \int_0^{F_{\max}} f^n S_{xx}(f) df, \quad (1)$$

其中, F_{\max} 是最大的幅值非零频率。使用功率谱的各阶距可以获得信号的一系列统计参数,其中最常用的是正过零的估计。

结构的损伤状态和程度可以用频谱的算术平均和几何平均作为损伤指数进行评价^[3]。

为了比较损伤前后损伤指数的差别,可通过均方根匹配滤波器(Matched Filter Root Mean Square, MFRMS)获得两频谱 Fourier 系数之间的差别, MFRMS 定义如下^[3]:

$$M_{fms} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{A_i(ref)} \right)^2 \right), \quad (2)$$

其中, A_i 是当前频率谱的第 i 个 Fourier 系数, $A_i(ref)$ 是参考频率谱的第 i 个 Fourier 系数。

另外一种频谱参数损伤识别方法为频谱差异均方根(Root Mean Square of Spectral Difference, RMSSD)。

Biemans 等^[3] 使用疲劳实验,观察了铝板样件由于裂纹增长而导致的应力的变化。作者使用经典 Fourier 变换,分析了裂纹在不同长度下导致的频谱的变化。同时,分析了非加载、静态加载和动态加载条件下,不同裂纹长度导致的信号的频谱差异均方根(RMSSD)有所不同。研究结果验证了该方法的实用性和有效性。

2 时频域损伤信号处理方法

为同时在时间域和频率域上分析信号,克服单纯分析频率域导致的频带限制、平稳性限制等问题,出现了

基于时频分析的噪声消除方法。大多数时频分析方法可以归纳为^[4]:

$$P(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{\delta} \int_{\tau} \int_{\theta} e^{-i\theta t - i\tau \omega - i\theta \delta} \phi(\theta, \tau) f^* \left(\delta - \frac{\tau}{2} \right) f \left(\delta + \frac{\tau}{2} \right) d\delta d\tau d\theta, \quad (3)$$

其中, $P(t, \omega)$ 是信号在时间 t 和频率 ω 处的能量密度; f 是待处理信号, f^* 是待处理信号的复共轭; $\phi(\theta, \tau)$ 是一个与 f 有关的函数。本方法已广泛应用于旋转机械的损伤监测中,在超声波结构损伤监测领域已经初获成效并且发展迅速。常用的时频分析方法包括短时傅立叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT),小波分析(Wavelet Analysis, WA),希尔伯特—黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT),Wigner-Ville 分布(Wigner Ville Distribution, WVD),Choi-Williams 分布(Choi Williams Distribution, CWD)等等。

2.1 短时傅立叶变换

1946 年 Dennis Gabor 在研究傅立叶变换和快速傅立叶变换处理非平稳信号问题时,提出了短时傅立叶变换(STFT):

$$\text{STFT}_x(t, \omega) = \int f(\tau) \phi(\tau - t) e^{-j\omega \tau} d\tau, \quad (4)$$

其中, STFT 是将 $f(\tau)$ 映射到时频平面 (t, ω) 上的二维函数。STFT 选择一个时频局部化的窗函数 ϕ ,假定分析窗函数 ϕ 在一个短时间间隔内是平稳的,移动窗函数,使变换后的信号在不同的有限时间宽度内是平稳信号。

在使用 STFT 进行信号分析时,需要考虑窗函数的形状、窗长等参数^[5]。窗函数的形状确定了 STFT 的频域分辨率,而窗长直接影响其时域分辨率。廖等^[6]研究了机械故障或损伤所引起的声发射(Acoustic Emission, AE)信号。由于此类声发射信号主要由高频突发脉冲和长周期准平稳信号组成,适合 STFT 进行信号分析处理的特点,可用 STFT 描述其时频特征。针对 STFT 窗函数固定的问题,文章使用理论分析和仿真两种方法,确定了高斯窗函数为滤波函数,同时获得了最佳的参数。该方法在一定程度上克服了 STFT 固定窗分析多尺度信号的缺陷。将改进的 STFT 应用在声发射监测滚动轴承损伤及部件识别中,通过仿真和实验验证了 STFT 是一种提取声发射信号的特征的有效途径。

值得注意的是,由于 STFT 只能使用固定大小的窗函数,无法在时间与频率分辨率同时达到最优。这是 STFT 在实际应用中需要考虑的问题。

2.2 小波分析

1981 年 Morlet 提出了小波分析的概念,其实质是

采用一簇小波函数代替正弦基去逼近被分析信号^[7],小波变换公式如下^[8]:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{\tau - b}{a} \right) dt, (5)$$

其中, Ψ 为一组正交小波基函数; Ψ^* 是 Ψ 的复共轭; $f(t)$ 为传感器采集的信号; a 和 b 是时间和尺度系数。

由于小波函数具有“小”和“波”的特点可以用来逼近非平稳信号,尤其是瞬态信号^[9]。小波分析是一种时频域的信号处理方法。与短时 Fourier 变换相比,小波变换应用多尺度分析的思想,可在高频处提高时间分辨率,在低频处提高频率分辨率,从而消除了 STFT 中时间分辨率与频率分辨率之间的矛盾^[10-11]。

2.2.1 小波阈值消噪

小波消噪技术是信号预处理中噪声消除的常用手段。1992 年和 1995 年 Donoho 等共同提出了基于正交小波变换的阈值降噪方法,并在 2001 年改进了阈值降噪方法。该方法由于建立在 Mallat 快速算法的基础上,得到了广泛的应用。Su 等^[12] 使用小波变换分析对包含分层损伤的 CF/EP 复合材料中传播的 Lamb 波信号进行了消噪处理。

由于传统小波阈值消噪采用的是正交小波变换,而正交小波变换的小波基相互正交且无冗余,这使得信号重建效果对于单个小波系数依赖性很强,令实际小波门限的选取变得很困难。同时由于正交小波变换不具有平移不变性,容易在信号的不连续处产生伪吉布斯现象^[1]。为消除这个问题,在进行小波阈值消噪前常做一些改进再使用^[13-14]。

基于 Coifman 和 Wickerhause 提出的小波包理论,发展出了基于小波包的降噪方法,利用小波包降噪的过程与用小波降噪的过程相似,区别为阈值处理加在了小波树结构上^[7]。这种小波包降噪方法同样存在弊病,当小波包变换分层较多时,最底层的点数变得很少,从而影响到了降噪的精度,也放大了边界效应的影响。

赵等^[15] 提出了卷积型小波包变换方法,该方法进行小波包变换时,没有使用隔二抽一的减采样。因此,无论信号被小波包分解多少层,分解得到的各频段数据长度始终与被分析的信号长度一致。由于这种方法具有一定的冗余性,避免了多层小波变换导致的点数过少的问题,提高了降噪的精度。

2.2.2 小波包特征提取

小波包变换可以将信号按照能量频率谱的分布分解成不同频率范围下的小波包,每个小波包只包含一定频率范围的能量。根据此特点,可在小波包变换的基础

上提取信号的特征,进行损伤识别。

使用小波包变换进行特征提取时,主要分为以下 3 个步骤^[16]:

- (1) 对采集的信号进行小波包分解,得到从低频到高频的 $M=2^N$ 个小波包数据, N 为小波包变换层数。
- (2) 计算各小波包的总能量。
- (3) 构造特征向量。

Bao 等^[16] 研究了基于小波包变换的螺栓松紧度判别方法,监测方法如图 1 所示。由压电传感器 1 激励出 Lamb 波信号,经过待判别螺栓后由压电传感器 2 接收。文中使用小波包变换进行分析,利用小波包变换各波包

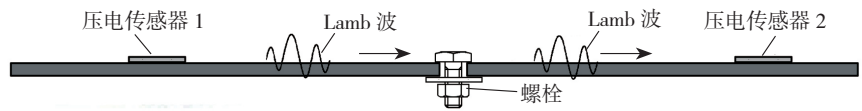


图1 螺栓松紧监测示意图
Fig.1 Bolt elasticity monitoring

与信号子频带对应关系,提出了相对松动因子的概念。研究发现螺栓的松动会引起小波包能量的偏移,此偏移可由相对松动因子来表示。通过使用松动因子监测实际螺栓的松紧度,验证了该方法的有效性。

2.2.3 小波脊线分析

小波脊线是一种应用小波变换分析信号局部时频谱特性的方法,常用于振动信号的在线分析。目前,有多种计算小波脊线的方法,基于渐进小波变换的解析算法是最基本的方法^[17]。除此之外,Nalan 等^[18] 利用奇异值分解的方法计算了信号的小波脊线; Marchesiello 等^[19] 使用 Crazy Climber 迭代算法获得了小波脊线; Hasse 等^[20] 应用直接积分微分方程的方法对小波脊线进行了计算。

通过小波脊线的分析,可以监测振动信号由于损伤而产生的细微变化,常用于旋转机械,如风机、电机、直升机旋翼等损伤的在线监测。Zhang 等^[21] 应用解析方法分析了鼠笼式电机转子信号的小波脊线,并对转子断条故障进行了在线监测。实验表明,应用小波脊线可以屏蔽电力系统的工频干扰,并提高监测精度。除旋转机械的在线监测外,还可使用小波脊线分析结构超声损伤信号。Kim 等^[22] 应用连续小波变换对细长圆柱梁损伤进行了在线监测,使用小波脊线分析了磁致伸缩传感器采集的弯曲波信号,并对损伤程度进行了估计。

2.2.4 小波奇异性分析

当信号在某处有间断点或某阶导数不连续时,则称信号在此处具有奇异性。在数学上,通常使用 Lipschitz 指数描述信号奇异性的大小^[7]。在结构损伤监测领域,信号的奇异性常常包含了损伤信息。由于小波变换具

有时频局部化的性质,可用于分析信号奇异点的位置和奇异性的强弱。理论上已经证明,奇异点的位置可以通过跟踪小波变换在细尺度下的极大模曲线来监测;而信号奇异性的强弱可以由模极大值随尺度的衰减性来确定^[7]。

Peng 等^[23]研究了基于小波模极大值的振动信号奇异值监测方法。作者通过分析每个振动周期信号中异常的 Lipschitz 指数点的数目、信号的平均值以及相对标准差三类损伤参数,对旋转机械的不平衡、油漩涡、耦合错位和冲击摩擦损伤进行了监测。研究表明,冲击摩擦损伤对奇异性的影响最大,耦合错位故障影响次之。同时,实验结果证明提出的三类损伤特征参数对损伤模式具有很好的模式分类能力,可区分上述四类损伤。由此可见,基于小波奇异性分析的损伤监测方法,具有很好的损伤在线监测的能力。

2.3 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(HHT),由美国华裔科学家 Norden E. Huang 在 1998 年提出。HHT 主要包含经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 谱分析(Hilbert Spectrum Analysis, HSA)。与其他信号处理方法相比,HHT 能分析非线性平稳信号,具有完全自适应性,HHT 能够自适应产生“基”,即由“筛选”过程产生的 IMF。HHT 可以同时时间和频率上达到很高的精度,适用于处理非平稳信号和突变信号。与 STFT 和 WA 相比 HHT 的瞬时频率是采用求导得到,求出的是瞬时频率,而 STFT 和 WA 得到的是小区域的平均频率。

2.3.1 HHT 消噪分析

损伤信号往往是非线性和非平稳信号,对于这两类信号频域上通常包含所有的谐波成分。在这种情况下,通过频域滤波方法在消除干扰的同时,势必使得滤波后的信号产生失真。Flandrin 等^[24]发现了 EMD 等价于二阶带通滤波器,并通过仿真与实验验证了 HHT 的滤波特性。EMD 可以将损伤信号分解成有限数目的 IMF 分量。由于 IMF 是在实际的损伤信号基础上进行 EMD 分解而得到的,因此每个 IMF 分量可在某一特定的特征尺度上诠释信号的模态^[25]。通常情况下,有效信号和干扰信号不会在一个 IMF 中同时出现。因此,首先对待分析信号进行 EMD 分解,获得 N 个 IMF 分量;然后选择有效的 IMF 再进行重新叠加即可实现噪声的消除。

单纯基于经验模态分解的滤波方法具有原理上的缺陷,即丢弃的 IMF 函数中有可能包含信号的有效成分,完全抛弃某些 IMF 分量可能会丢失有效信号^[26]。HHT-小波滤波算法可弥补这一缺陷。首先将信号进行 EMD 分解处理,并对前 k 个 IMF 分量进行小波阈值

滤波,然后合成所有 IMF 分量及趋势项。但由于 EMD 分解的不确定性, k 值难以事先确定。Chen 等^[27]提出了一种在希尔伯特域中做信号分解实现信号自适应去噪的方法。仿真结果表明该方法在消除非平稳信号固定频带中噪声上具有独特的效果。

2.3.2 IMF 频谱分析

EMD 分解可将原本非线性、非平稳过程中的数据分解成若干个平稳的 IMF 和残余分量的线性叠加,并保证数据中原有信息的完整性。在结构损伤监测信号中,损伤状态的变化会在传感器采集的信号中得到体现。首先,对损伤信号进行 EMD 分解,信号中包含的损伤信息会分散在分解后的若干个 IMF 分量中。由于 EMD 分解的自适应性,因此该分解能更好地反映损伤的本质。再对 IMF 分量做 Hilbert 变换,得到各分量的瞬时频率、瞬时幅度以及边界谱密度等信息,最终从本质上分析损伤的状态。

Yuan 等^[28]研究了基于 HHT 的螺栓松紧程度的判别方法,提出了两个损伤判别因子:能量频率偏移率和损伤能量估计率。首先对监测信号进行经验模态分解变换,提取第二个固有模态函数 C_2 作为分析对象。经过对 C_2 的希尔伯特谱分析可知,随着螺栓松紧程度的变化,信号的中心频率会发生偏移。该偏移可从两个损伤判别因子中反映出来,即随着螺栓紧固程度的降低,两个因子均逐渐减小。文章最后用实验对所提算法进行了验证。

2.3.3 HHT 奇异性分析

小波变换具有局部分析信号的能力,可以监测信号的局部奇异性。由于 HHT 中的 Hilbert 变换可以分析各 IMF 分量的瞬时频率,因此同样可以实现信号奇异性的检测。结构由于损伤而产生奇异性,等同于在信号中叠加了冲击分量,这个冲击分量会在对信号进行 EMD 分解时,出现在多个 IMF 中。在信号信噪比较高的情况下可以直接分析 IMF 分量的突变点获得信号的奇异性。而在信号信噪比较低时,则需要对 IMF 分量进行 Hilbert 谱分析,获得信号频谱的模极大值曲线进而获得奇异值点产生的时刻。

屈等^[29]利用 HHT 方法,进行了 4 层框架结构损伤的数值仿真。通过分析 IMF 分量的突变,获得了信号的奇异点,从而判定了结构中是否发生损伤以及损伤产生的时刻。

3 时空域损伤信号处理方法

由于 Lamb 波在结构中的传播非常复杂,由此带来的信号混叠,低信噪比等现象无法通过时频谱分析等单路信号损伤处理方法进行很好地消除。随着传感器阵

列引入到 SHM 领域后,多数据阵列式时空域损伤监测方法随之发展起来。使用阵列式时空域损伤监测方法,可通过综合分析多个传感器采集的信号,获得比任何单信号损伤处理方法更多的信息。本文主要介绍两类阵列式损伤信号处理方法,即目前常用的超声相控阵技术和极具潜力的盲源分离技术。

3.1 超声相控阵技术

超声相控阵技术是一种真正意义上的时空域阵列信号预处理方法。如图 2 所示,由压电传感器组成传感器阵列,通过改变每个传感器激励和接收到的传感器信号的相位差 ζ ,形成不同方向 θ 上的主动或被动的干涉信号^[30]。图 2 中共有 M 个压电传感器,坐标为 $(x_i, 0)$, $i=0, 1, \dots, M-1$ 。

$$x_i = \left(i - \frac{M-1}{2}\right)d \quad (6)$$

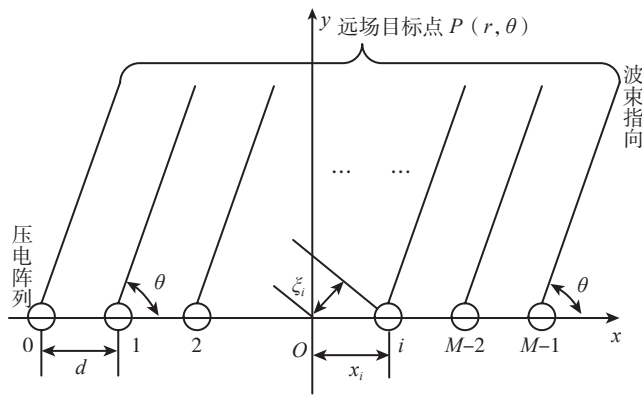


图2 相控阵原理示意图
Fig.2 Phase array principle

传感器阵列发出信号后,被监测点 $P(r, \theta)$ 接收到的信号为各压电传感器激励信号在平板中传播后的叠加,由于传感器位置的不同会产生一定的相位差 ζ ,因而需要改变每个传感器激励的起始时刻,即引入时间差 Δt 。通过相控阵信号处理,与损伤有关的信号由于干涉现象被增强,而与损伤无关的随机信号无法产生干涉而相对被削弱。该方法可以提高信号的信噪比,同时也解决了复杂环境下信号模式混叠的问题。由于超声相控阵技术具有上述优点,近些年来在国内外得到了广泛的关注。

英国布里斯托大学的 P. D. Wilcox 等学者^[31]对基于超声相控阵的结构损伤监测进行了探索,对其原理、过程进行了研究和实验验证。Purekar^[32]研究了基于相控阵技术的复合材料分层损伤识别。搭建了分层损伤监测试验平台,如图 3 所示。使用压电陶瓷激励器(简称 PZT)激励出询问波信号,信号在板中传播后,由分布在板中的 PZT 阵列接收。

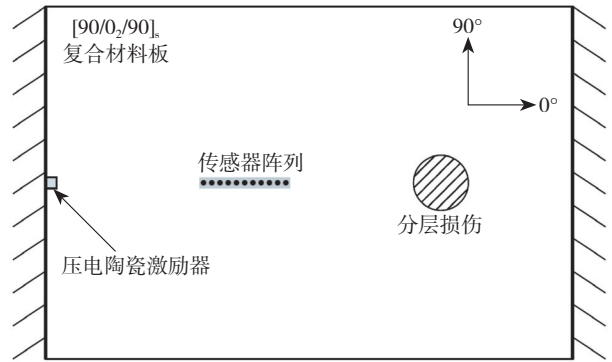


图3 复合材料板分层操作监测平台
Fig.3 Monitoring platform of composites plate delaminating damage

在监测复合材料平板中人工植入分层损伤,并研究了不含损伤的复合材料平板和包含人工植入分层损伤的平板上传感器采集的信号。文章应用相控阵理论分析了结构中传播的超声波信号。当板中存在分层损伤时,PZT 阵列采集的信号经相控阵分析后,会出现由于分层损伤而导致的超声反射信号,该信号的相位与损伤程度成正比关系。由此可见,相控阵信号处理方法可以提高特征信号幅度,减小噪声和反射波等非特征信号的干扰。

上述研究结果表明,相控阵方法对于复杂结构的损伤监测有较好研究前景。但是超声相控阵方法也存在着一些亟待解决的问题,首先使用干涉法的条件是损伤位置较远,因此增大了对较近位置的损伤信号处理的难度。再者,相控阵法对传感器位置要求较高,位置误差会导致干涉效果减弱。这些问题使得该方法在使用中受到了一定的限制^[33]。

3.2 盲源分离技术

盲信号分析技术是一种时空域阵列信号分析方法,主要包括盲源分离(Blind Source Separation, BSS)和盲信号提取(Blind Signal Extraction, BSE)两部分。盲源分离是一种在源信号与混合通道参数均未知的条件下,根据源信号的统计特性,仅通过传感器观测信号来估计源信号和未知混合通道参数的新兴信号处理方法,是人工神经网络、统计信号处理及信息理论相结合产生的方法。其核心问题是寻求分离矩阵的学习算法,可以看成是矩阵的分解。盲源分离主要分为线性混叠和非线性混叠两种情况,目前的盲源分离技术大多在线性混叠的前提下完成,但现实状况中用非线性混叠描述却更为准确。对于线性混叠的盲源分离技术包括基于信息论准则和高阶累积量的方法,非线性混叠包括线性模型扩展法和自组织映射法^[34]。

在结构健康监测中,由于被监测的系统结构复杂,

损伤存在不确定性,通常情况下属于未知系统,这满足盲源分离方法对待分析对象的要求。再者,损伤监测中多信号混叠属于常见问题,这给信号处理带来一定困难,盲源分离技术具有从混杂信号中恢复原始信号的功能,因此适用于结构损伤监测中实现损伤信号的处理。结构损伤监测传感器采集的信号可以假设成多路不可见的源信号,即损伤信号、振动信号、反射波信号和附加噪声信号共同作用的结果,因此,可以用盲源分离卷积混合模型表示信号的传递与叠加。

目前,国内外对线性混叠盲源分离问题的可解性及解决方法已经获得了一定的研究成果,在损伤监测领域也有了一定的应用。

Guillaume^[35]指出,可使用盲源分离方法处理有限多个传感器采集到的数据,在没有任何先验知识的前提下,分析介质中相互独立的源头信号。文献中利用盲源分离技术,从多噪声源的复杂环境中复原了单个机械的振动信息。此外,Theodor^[36]同样使用盲源分离方法分析了振动源信号的变化。上述研究表明,可将盲信号分析方法应用于旋转机械损伤监测领域中,实现损伤信号的分离与获取。

当信号中包含大量噪声时,盲源分离技术的使用在一定程度上受到了限制。为解决此问题,Cichocki等^[37]提出了有噪数据盲源分离的鲁棒技术,开辟了噪声独立量分析(Independent Component Analysis, ICA)的研究方向。但该算法只有在噪声方差已知,且幅值很小的情况适用。当方差未知时,分离性能会显著下降,甚至完全错误。为解决此问题,研究者将带通滤波^[38]、小波^[39]等降噪方法与盲分离算法结合起来。这种方法会对噪声环境下的盲源分离起到一定积极的作用,但是这些方法仍不完善,如小波分析滤波方法是通过阈值去除噪声,如果阈值选择不当会使分离效果变差。此外, Bin等在文献^[40-41]中提出盲逆卷积的信号消噪算法,并使用该方法进行直升机振动信号的处理,得到很好的效果。综上所述,目前使用盲信号分析技术进行损伤监测的研究还处于初步阶段,相关研究文献很少,具有广阔的发展空间。

4 结论与展望

本文从频率域、时频域和时空域三方面,对基于超声回波信号处理的结构损伤监测方法进行了综述。现将这三类方法各自的特点、使用情况及局限性归纳如表1所示。

目前,信号分析结构损伤在线监测技术发展迅速,但大部分研究尚在理论和实验阶段,仍然存在许多问题需要解决。

表1 损伤监测信号处理方法特点

| 信号处理方法 | 算法功能 | 存在问题 |
|--------|-----------------------------|----------------|
| 频域分析 | 研究信号的频谱特征,进行简单的频域滤波和频谱分析 | 无法分析非平稳信号、瞬变信号 |
| 时频域分析 | 通过分析信号的时频谱,研究信号中的瞬变信息和非平稳信息 | 无法分析反射波混叠信号 |
| 时空域分析 | 在时域中处理阵列信号,消除信号的混叠,提高信噪比 | 数据量大,计算复杂 |

(1)信号噪声的消除与奇异值细节保护:信号噪声消除是信号预处理的关键问题,由于在很多问题中,信号和噪声的区分并不明确。从本质上看,消噪和信号细节保护是相互制约的关系,如何更好的在去除噪声的基础上保护信号细节是该问题的关键。

(2)传感器位置误差:损伤特征提取、损伤定位所用的大部分处理方法,要求传感器位置信息具有较高的精度,但是铺设传感器时位置误差却很难消除。因此,设计合适的信号预处理方法,消除位置误差有利于提高损伤监测的精度。

(3)在线监测实时性:实时性是结构健康监测的必要条件,只有实时分析损伤信号,进行损伤识别,健康监测的结果才有意义。然而,在目前理论研究阶段,很多算法虽然有效,但算法较复杂、执行时间较长。因此,在保证算法有效性的前提下提高其实时性是损伤监测信号处理方法需要解决的问题。

(4)高复合材料比结构损伤分类问题:目前损伤监测的研究主要针对已知损伤进行在线监测与识别。随着复合材料的大量使用,损伤种类越来越多,因此,如何通过超声信号分析的方法提取损伤特征,实现损伤分类是损伤监测面临的难题。

(5)超声波回波信号的混叠:在使用超声波进行损伤识别时,由于结构边缘的反射,超声波本身的散射等问题,损伤信号已经完全淹没在反射波中。这种反射波频带与损伤信号频带接近,其处理方法与传统滤波完全不同。目前所存在的信号抗混叠方法尚不成熟,这是超声损伤信号处理领域亟待解决的问题。

参考文献

- [1] 朱启兵. 基于小波理论的非平稳信号特征提取与智能诊断方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [2] Staszewski W J, Boller C, Omlinson G R. Health monitoring of aerospace structures smart sensor technologies and signal processing. USA: John Wiley & Sons, 2004.

本文共有参考文献43篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 日午)