

基于 EMD 的声发射管道泄漏检测研究

孙立瑛^{1,2}, 李一博², 曲志刚², 王伟魁²

(1. 天津城市建设学院 能源与机械工程系, 天津 300384; 2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 针对管道泄漏声发射检测信号的非平稳特征, 该文提出了基于经验模态分解(EMD)的声发射信号分析方法。该信号分析法将管道泄漏产生的复杂声发射信号分解成有限个固有模态信号(IMF), 使 Hilbert-Huang 变换(HHT)的瞬时频率具有了实际物理意义, 提高了管道泄漏检测的定位精度。结果表明, HHT 法能准确描述声发射波形信号的非线性、非平稳时变特征, 是声发射信号时频分析的有效工具。

关键词: 经验模态分解(EMD); 声发射; 管道泄漏检测; 相关分析

中图分类号: TP274+.2

文献标识码: A

Study on Acoustic Emission Pipeline Leakage Detection Based on EMD Signal Analysis Method

SUN Li-ying^{1,2}, LI Yi-bo², QU Zhi-gang², WANG Wei-kui²

(1. Dept. of Energy Technology and Mechanical Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2. State Key Lab. of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A signal analysis method based on EMD (Empirical Mode Decomposition) is proposed aiming at extracting the non-stationary characteristic of the acoustic emission (AE) signal from pipeline leakage. The detected leakage signal can be decomposed into a finite intrinsic mode functions (IMF) by EMD, as a result, it makes the instantaneous frequency of Hilbert-Huang transform have some physical significance and the location accuracy of the leakage detection is increased. It is demonstrated that Hilbert-Huang transform is an effective tool for demonstrating the non-stable and non-linear characteristic of acoustical emission signals.

Key words: acoustic emission; pipeline leakage detection; empirical mode decomposition; cross-correlation

当材料或结构受到外力或内力作用时, 由于其微观结构的不均匀, 以及内部缺陷的存在, 会导致局部应力集中, 造成不稳定的应力分布。这种不稳定应力分布状态下的应变能积累到一定程度时, 不稳定的高能状态会向稳定的低能状态过渡, 以弹性波的形式释放出应变能, 这种现象叫做声发射(AE), 也称应力波发射^[1]。AE作为一种动态无损检测法, 可在不停产的状况下对压力管道的活性缺陷和泄漏情况进行快速检测及判断, 且其对管道特殊结构的形状不敏感^[1], 因此, 对AE管道检测技术的研究具有重要的意义。

经验模态分解(EMD)是近年来信号分析领域的一个突破, 它基于时间尺度将信号分解为若干个固有模态函数(IMFs)之和, 分解出的各分量突出了信号的局部特征, 因此非常适用于非平稳信号的分析。管道泄漏产生的AE信号具有强烈的非平稳特征, 采用EMD法对其进行分析, 可以更准确、有效地把握AE源信号的特征信息。

1 检测原理

管道运行一段时间后, 由于材料的腐蚀老化或

在其他外力作用下, 可能产生裂纹或腐蚀孔, 由于管道内外压差的存在, 管道内的流体会向外部泄漏。管道泄漏激发的应力波携带着泄漏源的信息(如泄漏的大小、位置等)并沿管壁传播, 利用AE传感器采集该应力波信号, 并分析处理, 就能获得管道泄漏信息, 并对缺陷产生的位置及严重程度做出判断^[2]。

对管道进行AE检测时, 可采用AE的时差法定位法对管道缺陷或泄漏点进行定位。管道AE检测至少需两个AE传感器, 其定位原理^[3]如图1所示。

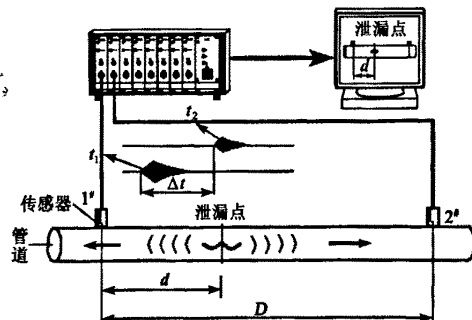


图1 管道泄漏的声发射检测原理

收稿日期: 2007-01-09

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534050); 天津市高等学校科技发展基金资助项目(2007-1103)

作者简介: 孙立瑛(1973-), 女, 黑龙江省哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要研究方向为测试技术及仪器。

假设泄漏点发生在1*、2*传感器之间,管道泄漏(AE源)产生的AE信号到达1*传感器的时间为 t_1 ,到达2*传感器的时间为 t_2 。因此,泄漏信号到达两传感器间的时差为 $\Delta t = t_2 - t_1$,泄漏点距1*传感器的距离 d 为

$$d = (D - v\Delta t) / 2 \quad (1)$$

式中 D 为两个传感器间的距离; v 为声波在管道中的传播速度。

时差定位技术的关键是确定 v 和 Δt 。其中, v 可通过查阅工程手册或实测波速的方法来获得。

AE信号分突发型和连续型两种,突发型信号是指在时域上可分离的信号,其上升段较迅速,下降段则呈指数衰减振荡的现象。而连续型AE信号的单个脉冲则在时域上不可分辨。当AE信号为突发型时, Δt 可通过多通道声发射仪记录的信号到达各通道的时间来确定。由于管道泄漏产生的信号为连续型声发射信号,且声发射信号在管道中传播过程中发生的衰减、频散及多模态现象^[4],因此,一般无法直接提取到两传感器接收泄漏信号的时差。

相关分析^[5]是时域中描述信号特性的一种重要方法,通过对两传感器接收到的两个性状相近的声发射信号的波形进行相关运算,可获得两个信号间的时间差。在实际检测中,两传感器接收的管道泄漏声发射信号分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$,经A/D转换后成为离散信号 $x(n)$ 和 $y(n)$,其中 n 为整数。取两个AE信号在相同时段、采样点为 N 的有限数据段进行相关运算, $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相关系数

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n)]^{1/2}} \quad (2)$$

在对两信号的波形进行相关计算后,相关结果最大时对应的采样点即为 Δt 。获得两传感器接收信号的时差后,利用式(1)可确定位于两传感器间的泄漏点的位置。

2 基于经验模态的信号分析方法

经验模态信号分析法是将源于数据并由数据导出的模式函数组作为分解的基函数,使数据分解为一组IMFs,分解唯一,且分解得到的IMFs间具有正交性。分解得到的IMFs必须满足以下两个条件^[6-7]:

(1) 曲线的极值点和零点的数目相等或至多相差1。

(2) 在曲线的任意一点,包络的最大极值点和最小极值点的均值等于零。

万方数据

管道AE检测中获得的是较复杂的信号,并不一定满足本征模态函数的条件。事实上,我们获取的很多信号都是如此。因此,Norden E. Huang进行了如下假设^[8-9],即任何信号都是由一些不同的固有模态组成的;每个模态可以是线性的,也可以是非线性的;其局部极值点数和零点相同,且上下包络线关于时间轴局部对称;任意时刻,一个信号都可以包含许多固有模态信号,如果模态之间互相重叠,便形成复合信号。

在上述假设条件下,可以用EMD将信号的本征模态筛选出来,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{imf}_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中 $r_n(t)$ 为信号的平均趋势,即原始数据序列可表示为IMFs分量和一个余项之和。

3 AE管道检测实验及信号分析结果

3.1 管道检测实验

利用一条管径为 $\varnothing 154$ mm的普通低碳钢管道进行气体泄漏实验, D 为24.50 m, d 为8.35 mm。图2、3为检测现场1*、2*传感器采集到的管道泄漏AE信号。实验时管道内压力为0.7 MPa,采样频率为1 MHz,数据采集时间为30 ms,采样点数为 (30×1024) 个。

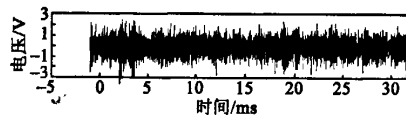


图2 1*传感器采集的信号波形

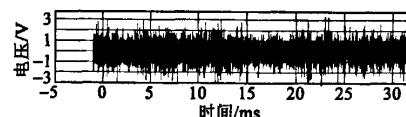


图3 2*传感器采集的信号波形

对1*和2*传感器采集的AE信号直接进行互相关分析,相关系数为0.712, $\Delta t = 1.98$ ms。由式(1)可知,利用实测波速计算出 $d = 5.37$ m。可见,对原始信号直接进行互相关分析,定位误差明显偏大。

3.2 现场噪声的影响分析

管道泄漏AE信号属于连续型AE信号,不过,当管道内流体发生泄漏时(尤其是高压气体泄漏时),由于流体与管壁间的摩擦,泄漏信号中也会包含具有冲击性质的声源,即呈突发型AE信号的特点。只是,在管道泄漏检测的工程应用中,AE信号多伴随着干扰噪声(如振动噪声、环境噪声、电子仪器带来的噪声等),这类噪声在时域表现出的主要特征是随机地分布在整个采样时间范围内(见图4)。

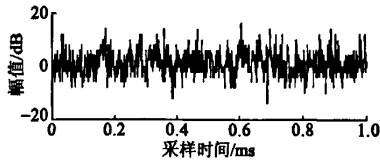


图 4 管道泄漏现场常见的噪声信号

因此,传感器现场采集的信号 $A(t)$ 通常是 AE 源信号 $S(t)$ 和噪声 $n(t)$ 的混合信号,即

$$A(t) = S(t) + n(t) \quad (4)$$

由于噪声信号的普遍存在,管道泄漏信号的真实特征往往会被模糊掉。

3.3 管道泄漏信号的 EMD 分析结果

IMFs 代表了信号的内在波动模式,因此对分解后的 IMF 进行分析可获得信号中更丰富的波动信息。由于 EMD 法总是将信号中最主要的成分先提取出来,因此可以利用分解得到的前几个 IMF 分量来恢复被干扰的真实信号,而对于后几个 IMF,如果干扰的成分较突出,可以直接将其滤除。再把所有处理后的 IMF 与趋势项重新构造,就得到没有干扰的数据。采用 EMD 法对管道泄漏的原始 AE 信号分解,分解结果如图 5、6 所示。图中两传感器采集的 AE 信号经 EMD 分解后得到 9 个不同的

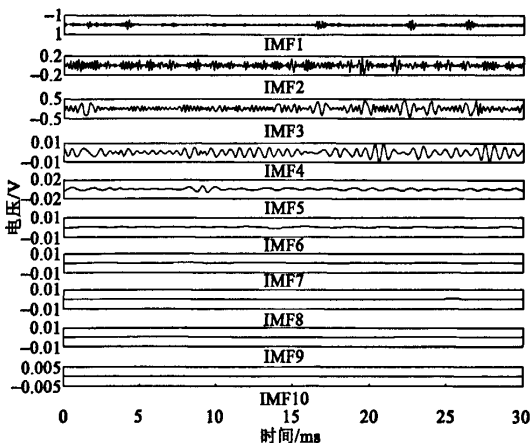


图 5 1# 传感器信号的 EMD 分解结果

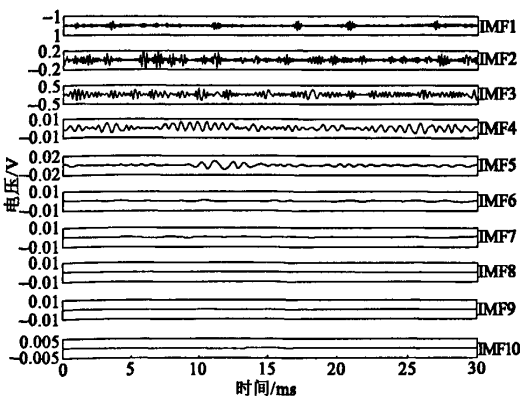


图 6 2# 传感器信号的 EMD 分解结果

IMFs, 以及一个表征趋势的残余分量。由于残余分量是单调的,幅值也较小,故对 AE 信号的分析作用不大,因此可不考虑残余分量的影响。根据管道泄漏 AE 信号的特点,分解出的 IMFs 分量中,包含管道泄漏 AE 信号特征的分量称为有效分量。

有效的 IMF 分量应满足:

- (1) 分解出的 IMF 分量在时域上应具有突发性 AE 信号的特点,即信号在时域上可分,且上升段较迅速,下降段呈指数衰减振荡的特征;
- (2) 其频率集中在管道泄漏 AE 信号的典型频率范围内(30~60 kHz)。

在分解得到的 IMFs 中(见图 5、6),IMF7 及其以后的分量幅值已很小,对 AE 信号的分析影响较弱,故在提取有效分量时可不考虑。在 6 个有效 IMF 分量中,分量 IMF1~IMF3 呈具有冲击性质的 AE 信号的典型特征,且其频率主要集中在典型的泄漏 AE 信号频率范围内,即 30~45 kHz;而 IMF4~IMF6 信号相对平缓,与图 4 所示的噪声信号之间存在较多类似,而且,其频谱范围较宽,均匀分布在 10~250 kHz 内。因此,IMF1~IMF3 为有效的 IMFs 分量。选取两组信号中的 IMF1、IMF2 和 IMF3 三个固有模式分量进行重构,重构后的信号如图 7、8 所示。

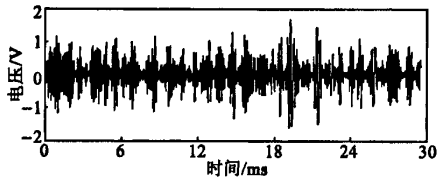


图 7 1# 传感器采集 AE 信号的重构波形

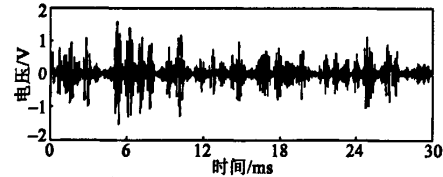


图 8 2# 传感器采集 AE 信号的重构波形

对重构后的信号进行相关分析,计算出 $\Delta t = 1.243 \text{ ms}$, $d = 7.93 \text{ m}$, 实验的相对误差为 5%。通过改变 D , 可得到多组实验数据。本文进行的 6 组实验中,测量值与真实值间的平均相对误差为 5.47%。考虑到传感器的布置也可能产生一定的误差,故该误差是可以接受的。可见,采用 EMD 法对管道泄漏 AE 信号进行分析,有利于提取到原始泄漏信号的本质特征并提高泄漏点的定位精度。

4 结束语

经验模态分解法将信号自适应地分解为若干个

(下转第 245 页)

表1 仿真结果总结表

	$\ v_{\max}\ $	$\ v_{\min}\ $	$\ v_{\max}\ \cdot \ v_{\min}\ $	$\ v_{\max}\ $	$1/\kappa$	F
最大值	1.506	1.000	1.127	1.000	0.584	
最小值	0.948	0.749	0.899	0.497	0.475	
平均值	1.124	0.896	1.001	0.809	0.529	

基于这些优化设计结果,设计的高速高精度定位平台样机如图6所示。

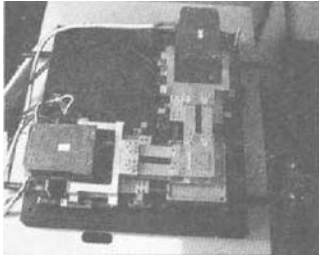


图6 定位平台实验样机

6 结束语

提出一种高速高精度平面并联定位机构,基于雅可比条件数进行了结构构型优化设计,并采用全局性能指数得到了最佳的工作空间位置和形状。最后,同时考虑速度、精度及结构的紧凑型,提出一种尺寸优化目标函数,并利用此函数进行了结构参数的优化设计。

(上接第241页)

IMF分量之和,使瞬时频率具有了实际的物理意义,同时也使这种新的时-频分析法不同于用很多谐波分量来表示复杂的非线性与非平稳信号的传统方法,如傅里叶方法,也不同于小波或小波包分析中尺度的频率定义法,而是同频率的经典定义法相一致,从而可精确的给出信号的能量随频率和时间的联合分析情况。

实验及信号分析结果表明,基于经验模态分解得到的固有模式函数分量中包含了管道泄漏原始AE信号的特征信息,通过提取包含AE信号典型特征的IMF分量进行信号重构,并进行相关运算,可获取具有较高精度的管道泄漏声发射事件的定位结果。

参考文献:

- [1] HUO Zheng, CHENG Chui-mei, ZHU Ren-xiang. Acoustic emission inspection of pipeline leakage [J]. Non-destructive Testing Journal (in Chinese), 1997, 19(4): 105-107.
- [2] ROBERTS R A, REWERTS L E, AMANDA C M. The role of propagation characteristics in acoustic emission pipeline leak location[J]. Renew of Progress

参考文献:

- [1] GOSELIN C, ANGELES J. The optimal kinematic design of a planar three-degree-of freedom parallel manipulator[J] ASME J Mech Tran Automat, 1988, 110(1): 35-41.
- [2] GOSELIN C, ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulator[J] ASME J Mech Des, 1991, 113(3): 220-226.
- [3] LOU Y L, LIU G F, LI Z X. A general approach for optimal kinematic design of parallel manipulators[C]. New Orleans, LA; IEEE Proc Int Conf on Robot Automat. 2004; 3 659-3 664.
- [4] KIM H S, TSAI L W. Design optimization of a cartesian parallel manipulator [J]. ASME J Mech Des, 2003, 125(1): 43-51.
- [5] HUANG T, LI M, LI Z X, et al. Optimal kinematic design of 2-DOF parallel manipulator with well shaped workspace bounded by a specified conditioning index [J]. IEEE Trans Robot Automat, 2004, 20(3): 538-543.
- [6] 马晓丽, 马履中, 周兆忠, 等. 3T_1R 并联平台的工作空间分析与优化设计[J]. 中国机械工程, 2006, 17(18): 1 938-1 943.
- [7] in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17(5): 501-508.
- [3] SAMOILOV B V. In-line inspection, repairs used on ageing russian product lines[J]. Oil & Gas Journal, International Petroleum New & Technology, 1998, 32(2): 42-46.
- [4] ZHONG Cao. Chemical acoustic emissions from gas evolution processed recorded by a piezoelectric transducer[J]. Sensors and Actuators, 1998, 50(1): 27-37.
- [5] GAO Y, BRENNAN M J, JOSEPH P F, et al. A modal of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 277(1): 133-148.
- [6] 陈 隽, 徐幼麟. HHT 方法在结构模态参数识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3): 383-388.
- [7] 谭善文, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang 变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(2): 9-12.
- [8] SOUZA N E P, CUSTAUD M A, CEJKA C J, et al. Assessment of cardiovascular autonomic control by the empirical mode decomposition[C]. Como, Italy; 4th Int Workshop on Biosignal Interpretation, (I), 2002; 123-126.
- [9] HUANG Da-ji, ZHAO Jin-ping, SUN Ji-lan. Practical implementation of Hilbert-Huang transform algorithm [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 22(1): 1-14.

基于EMD的声发射管道泄漏检测研究

作者: [孙立瑛](#), [李一博](#), [曲志刚](#), [王伟魁](#), [SUN Li-ying](#), [LI Yi-bo](#), [QU Zhi-gang](#), [WANG Wei-kui](#)

作者单位: [孙立瑛, SUN Li-ying\(天津城市建设学院, 能源与机械工程系, 天津, 300384; 天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津, 300072\)](#), [李一博, 曲志刚, 王伟魁, LI Yi-bo, QU Zhi-gang, WANG Wei-kui\(天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津, 300072\)](#)

刊名: [压电与声光](#) **ISTIC|PKU**

英文刊名: [PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS](#)

年, 卷(期): 2008, 30(2)

引用次数: 2次

参考文献(9条)

1. HUO Zheng, CHENG Chui-mei, ZHU Ren-xiang [Acoustic emission inspection of pipeline leakage](#) 1997(04)
2. ROBERTS R A, REWERTS L E, AMANDA C M [The role of propagation characteristics in acoustic emission pipeline leak location](#) 1998(05)
3. SAMOILOV B V [In-line inspection, repairs used on ageing russian product lines](#) 1998(02)
4. ZHONG Cao [Chemical acoustic emissions from gas evolution processed recorded by a piezoelectric transducer](#) 1998(01)
5. GAO Y, BRENNAN M J, JOSEPH P F [A modal of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes](#) 2004(01)
6. 陈隽, 徐幼麟 [HHT方法在结构模态参数识别中的应用](#)[期刊论文]-[振动工程学报](#) 2003(03)
7. 谭善文, 秦树人, 汤宝平 [Hilbert-Huang变换的滤波特性及其应用](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(02)
8. SOUZA N E P, CUSTAUD M A, CEJKA C J [Assessment of cardiovascular autonomic control by the empirical mode decomposition](#) 2002
9. HUANG Da-ji, ZHAO Jin-ping, SUN Ji-lan [Practical implementation of Hilbert-Huang transform algorithm](#) [期刊论文]-[Acta Oceanologica Sinica](#) 2003(01)

相似文献(3条)

1. 期刊论文 [孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 靳世久, 周琰, SUN Li-ying, LI Yi-bo, QU Zhi-gang, JIN Shi-jiu, ZHOU Yan](#) [EMD信号分析方法的声发射管道泄漏检测研究](#) -[振动与冲击](#)2007, 26(10)
 针对管道泄漏声发射检测信号的非平稳特征, 提出了基于经验模态分解(EMD)的信号分析方法. 该信号分析方法将管道泄漏产生的声发射信号通过EMD分解为多个平稳的固有模式函数(IMF)之和, 选择包含声发射特征的若干IMF分量进行重构, 可以提取到管道泄漏声发射信号的本质特征, 消除噪声信号的干扰. 通过对重构后的信号进行互相关分析计算, 使基于声发射方法的管道泄漏检测的定位精度得到较大提高, 验证了Hilbert-Huang变换是表征声发射信号的非平稳特征及信号参数提取的有效工具.
2. 期刊论文 [孙立瑛, 李一博, 靳世久, 曲志刚, 李俊霖](#) [基于小波包和HHT变换的声发射信号分析方法](#) -[仪器仪表学报](#) 2008, 29(8)
 针对声发射管道泄漏检测过程中的噪声干扰问题, 对基于小波包和经验模态分解(EMD)的声发射信号处理方法进行了研究. 采用小波包分解算法和经验模态分解可以对管道泄漏声发射信号进行分解, 但分解结果却存在一定区别. EMD是近年来非平稳信号分析领域的一个突破, 对管道泄漏声发射信号进行EMD分解后, 选择包含声发射特征的若干固有模式函数(IMF分量)进行重构, 可以提取到管道泄漏声发射信号的本质特征, 消除噪声信号的干扰. 相对小波包分解方法而言, 对根据IMF分量重构的声发射信号进行相关分析计算, 得到的管道泄漏点的位置更为精确.
3. 期刊论文 [崔建国, 郑新起, 邱楠, 王明卓, 徐长君, 徐光延, CUI Jian-guo, ZHENG Xin-qi, QIU Nan, WANG Ming-zhuo, XU Chang-jun, XU Guang-yan](#) [基于EMD包络谱的飞行器健康诊断](#) -[压电与声光](#)2009, 31(6)
 针对飞行器结构系统声发射信号的非线性与非平稳特征, 为实现飞行器结构部件的有效健康监测, 提出了基于经验模态分解包络谱的飞行器健康诊断方法. 该方法首先对由声发射传感器募集到的飞行器关键部件原始声发射信号进行经验模态分解(EMD), 提取其固有频率段的固有模式函数(IMF)信息, 然后运用Hilbert变换对其进行处理得到各IMF的包络信号, 由此可得其包络谱. 通过包络谱的特征信息便可实现对飞行器结构部件的健康诊断. 将该方法应用于某飞机真实水平尾翼疲劳试验所募集的声发射信号, 结果表明, 该法可监测出飞行器水平尾翼的健康状态, 适用于飞行器结构部件的健康监测.

引证文献(2条)

1. [姚晓山, 张永祥, 明廷涛](#) [基于经验模态分解的齿轮裂纹声发射检测](#) [期刊论文] - [无损检测](#) 2009 (6)
2. [崔建国, 李明, 陈希成, 吕瑞, 徐长君, 刘建民, 徐心和](#) [基于支持向量机的飞行器健康诊断方法](#) [期刊论文] - [压电与声光](#) 2009 (2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ydysg200802037.aspx

下载时间: 2010年6月2日