

基于非本征型光纤传输声发射 局部损伤监测系统

丁克勤¹, 赵娜¹, 许蕾²

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013; 2. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 基于光纤传输技术, 设计并开发了一种新型的非本征型光纤传输声发射局部损伤监测系统, 并对试样进行了声发射信号的监测试验。结果表明, 带光纤的传感器具有传输距离远、抗干扰能力强等优点, 可较好地满足大型设备局部损伤监测的要求。

关键词: 局部损伤; 声发射; 光纤

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)04-0042-03

Local Damage Monitoring System Based on Extrinsic Fiber Optic Acoustic Emission Technology

DING Ke-Qin¹, ZHAO Na¹, XU Lei²

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, the local damage monitoring system which is based on extrinsic fiber optic acoustic emission is designed and developed. Some experiments have been done in laboratory. It is shown that the new system is capable of long distance transmission, and has high anti-interference etc. It can meet the demand of local damage monitoring about the large equipment.

Keywords: Local damage; Acoustic emission; Optical fiber

大型设备如球罐、起重机械等是国民经济中重要的工业设施, 确保其安全运行具有十分重要的意义。由于承受疲劳载荷作用, 加上工况恶劣, 极大地增加了设备产生疲劳裂纹损伤的可能性, 严重影响结构安全运行。为避免事故发生, 对这些设备开展局部损伤监测就显得十分重要。声发射技术是检测大型设备活性缺陷(如裂纹扩展等)的主要手段, 但传统的声发射技术受传输电缆固有的物理特性影响, 具有传输距离有限、易受干扰等缺点, 这就给大型设备的声发射监测带来了困难。因此, 笔者提出了光纤传输声发射技术的局部损伤监测方法。

1 声发射检测原理

声发射又称为应力波发射, 是材料或零部件受外力作用产生变形、断裂或内部应力超过屈服极限而进入不可逆的塑性变形阶段, 以瞬态弹性波形式释放应变能的现象^[1]。声发射检测原理如图 1 所示。从声发射源发射的弹性波最终传播到材料的表面, 引起可以用声发射传感器探测的表面位移, 这些探测器将材料的机械振动转化为电信号, 然后再被放大、处理和记录, 人们根据观察到的声发射信号进行分析与推断, 以了解材料损伤情况^[2]。

与其他无损检测方法相比, 声发射技术具有以下优点:

(1) 声发射是一种被动检验方法, 探测到的能量来自被测试物体本身, 而不像超声检测需要提供激励信号。

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 质检公益性行业科研专项资助项目(201010031)

作者简介: 丁克勤(1968—), 男, 研究员, 主要从事结构健康监测诊断与管理技术研究工作。

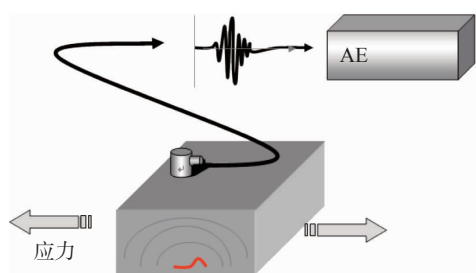


图1 声发射检测原理

(2) 可提供活性缺陷随载荷、时间、温度等外变量而变化的实时或连续信息,因而适用于工业过程在线监控及早期或临近破坏预报,对于受力情况复杂的金属结构,相比超声、磁粉检测效果更好、更真实,同时可以减少检验中不必要的停机^[3]。

尽管声发射技术有很多优势,但也有其应用局限性,受传输电缆固有的物理特性影响,声发射信号传输距离短,抗干扰能力弱,使得传统的声发射检测系统无法满足远距离监测的要求。基于非本征型光纤传输声发射的局部损伤监测技术将声发射传感器采集到的信号采用光纤进行传输,既有声发射技术对活性缺陷比较敏感,对被测结构的形状、尺寸要求不高和能够进行在线监测的优点,又具有光纤技术传输距离远、抗干扰能力强等优点,为开展大型设备局部损伤远程健康监测提供了有力的技术手段。

2 基于非本征型光纤传输声发射的局部损伤监测系统设计

该监测系统包括声发射传感器、数据采集模块、光纤传输模块和软件系统四部分,系统组成如图2所示。声发射传感器用于监测被测物体的声信号以及将声信号转换为电信号,传感器输出的电信号由数据采集模块进行放大、滤波、模数转换、特征参数提取等处理,由光发射模块进行协议转换、电光转换后调制成光信号,通过光纤长距离传输至接收端。接收端的光接收模块将光信号还原为电信号并送至计算机进行数据处理。软件系统对现场采集的声发射信号进行数据分析,拾取损伤信息,显示、存储等操作。

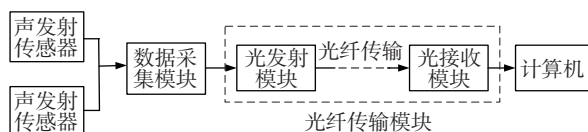


图2 监测系统组成

2.1 声发射传感器

声发射传感器是影响系统整体性能的重要因素,其工作频率在 50~200 kHz,中心频率在 150 kHz,峰值灵敏度大于 -63 dB,其灵敏度、可靠性和稳定性等方面表现良好,满足局部损伤监测的要求^[4]。

2.2 数据采集模块

数据采集模块实现信号放大、滤波、调理、模数转换和特征参数提取等功能。由于传感器采集的信号比较微弱,首先对其进行放大、滤波等处理,然后将模拟信号转换为数字信号,最后由 FPGA 控制完成实时声发射特征提取及波形采集等工作。

2.3 光纤传输模块

光纤传输模块由光发射部分、光纤传输部分和光接收部分组成。数据采集模块输出的信号是 USB 接口的,而电光转换部分的输入是网口的,所以光发射部分首先将 USB 协议的信号转换为 RJ45 协议的信号,转换后的 RJ45 协议的电信号被调制成光信号,为信号的光纤传输做准备。经光纤长距离传输后的微弱光信号在接收端经过光接收部分将光信号还原为电信号,送至计算机进行数据的显示、分析、存储等处理。该子系统可以方便有效地实现远距离局部损伤监测的目的。

2.4 软件系统设计

软件系统包括参数设置模块、数据采集模块和数据分析模块,主要完成对声发射监测信号的采集、处理、显示和存储等,直观展现大型设备的局部损伤状况。软件系统设计方案如图3所示。

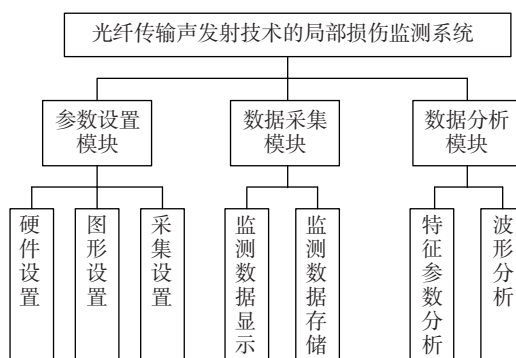


图3 基于非本征型光纤声发射的局部损伤监测软件系统

参数设置模块包括硬件设置、图形设置和采集设置。硬件设置用来设置传感器和光纤传输模块的参数;采集设置主要设置模拟滤波器的上下限、阈值、采样率和预触发值等;波形设置是根据需要设置在计算机界面上显示的图形,如波形图、幅值随时间的散点图、声发射振铃技术累计图等。

数据采集模块包括监测数据实时显示和存储,该模块可选择采用参数图表或波形等方式给用户直观的显示。同时,存储的监测数据还可根据命名的文件进行数据回放,使工作人员更好地了解大型设备的长期健康状况。

数据分析模块实现特征参数分析和波形分析功能,特征参数处理可将采集的特征参数如能量、幅度、计数等和设定好的阈值进行比较来判定声发射源的活性和强度;波形分析处理是针对波形采集,进行小波算法和频谱分析算法等处理,以提取损伤信号。

3 试验与分析

为验证该系统的实际性能,在试样拉伸过程中进行了声发射信号的监测试验,将该系统和传统的声发射检测系统对试样同一位置进行检测,通过对结果的对比分析来验证本系统的性能。

3.1 试验步骤

试验装置主要包括:拉伸试验机、基于非本征型光纤传输声发射的局部损伤监测系统、声发射检测仪器等。拉伸试验机选用型号为 SHT 的微机控制电液伺服万能试验机,最大负荷为 1 000 kN。声发射仪器采用 PAC 公司的 USB-AE 系统,检测时同时进行全波形采集和参数采集。

试样材质为 Q235-B 钢,试样尺寸如图 4 所示,数量为 2,完好试样与焊接试样各 1 块。

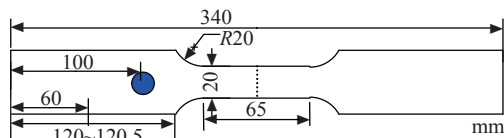


图 4 试样示意图(圆形为传感器安装位置)

带有光纤传输的声发射传感器和传统声发射的传感器分别安装在试样上黑色圆点标注位置的正反面,传统声发射检测系统的计算机放置在拉伸试验的现场,而非本征型光纤传输声发射系统(Fiber AE)采集的信号由光纤长距离传输至距离拉伸试验现场 1 000 m 的地方,进行远程监测。安装好后,对试样进行拉伸。

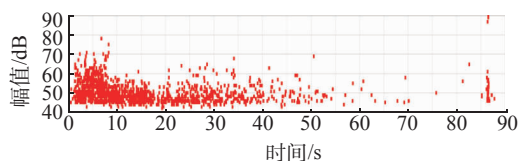
试验时先启动拉伸机,测定试验环境的噪声,根据背景噪声水平,设置试验参数。背景噪声的测定值在 38 dB 以下,设定固定检测门槛值为 45 dB,增益为 40 dB,采样率 5 MHz。

启动拉伸试验机,预加载荷 2 kN 后暂停,然后同步启动两套声发射系统,启动后拉伸机按照预定

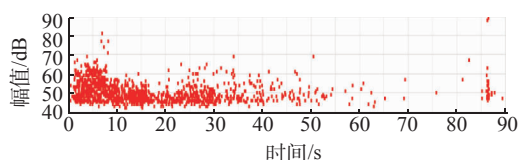
加载速度(5 mm/min)加载,直至试样被拉断裂。整个拉伸过程连续且不受外界干扰,在拉伸过程中两套系统同步采集声发射信号。

3.2 试验结果

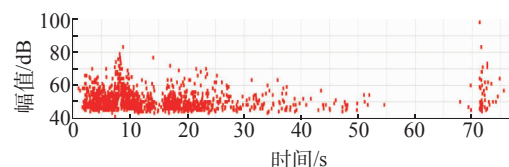
当拉断试样后停止监测,监测系统记录了拉伸过程中的声发射信号。2 个试样的幅值对时间的散点图如图 5 所示,其中 FiberAE * 表示基于非本征型光纤传输声发射的局部损伤监测系统的监测幅值对时间的散点图,AEtest * 表示传统声发射系统的监测幅值对时间的散点图。



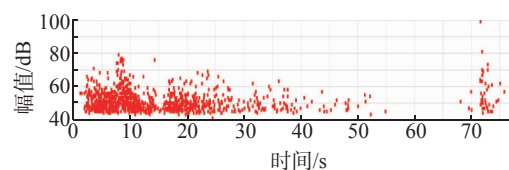
(a) FiberAE1



(b) AEtest1



(c) FiberAE2



(d) AEtest2

图 5 监测试验的幅值对时间的散点图

由图 5 可以看出,两个系统的监测结果基本一致。由此可知,Fiber AE 系统能够有效延长监测距离,并有很强的抗干扰能力,能够实现远距离局部损伤监测。

4 结语

经试验验证,提出的非本征型光纤传输声发射

(下转第 76 页)

$$d = \sqrt{\frac{c^2}{4} \times (t_{\text{缺陷}} - 2t_0)^2 - S^2} \quad (2)$$

式中: S 为两探头入射点距离(探头中心距)的一半, mm; $2t_0$ 为超声波在两个探头楔块中的总延时, μs ; c 为波的传播速度, mm/ μs ; d 为缺陷深度。

若要计算出缺陷深度 d , 必须知道波速、探头中心距 $2S$ 、探头延时 $2t_0$ 等参数, 结合仪器测量的缺陷经过时间 $t_{\text{缺陷}}$ 才能得出缺陷端点深度。深度校准则是通过直通波到达时间或直通波与底部反射波到达时间相结合, 结合已知参数, 经过计算, 从而得出缺陷深度。

2 深度校准方法

在各种波中, 纵波传播最快, 从而能够领先于其他种类的波, 在最短时间内到达接收探头。使用纵波并利用纵波计算缺陷的深度, 得到唯一的结果。根据波的传播可知, 直通波和底面反射波出现的时间分别为 t_L 和 t_b 。

$$t_L = 2 \frac{S}{c} + 2t_0 \quad (3)$$

$$t_b = \frac{2\sqrt{S^2 + D^2}}{c} + 2t_0 \quad (4)$$

式中: D 为工件厚度, mm。

2.1 直通波校准

根据式(3), 若已知材料纵波速度 c 和探头中心距 $2S$, 则可计算出 $2t_0$, 从而亦能根据式(2)计算出缺陷深度 d 。

2.2 直通波和底部反射波共同校准

利用式(3)和(4)可以推导出式(5)、(6)和(7), 在检测过程中若能准确测量探头中心距 $2S$ 、已知工件厚度值 D , 则利用式(5)和(7)分别校准得出材料声速 c 和 $2t_0$ 。然而对于承压设备检测, 材料声速和被检测工件厚度常常都已知, 由于现场检测条件及检测要求的不同, 探头中心距时常要求作一定修改。手动扫查时, 因扫查人员操作方法及扫查装置固定情况不同, 探头中心距也会发生改变, 在曲率半径较

小的工件内部检测时直通波沿曲面传播, 该中心距就难以测量。因此, 精确测量探头中心距较困难, 如果仍然利用式(5)和(7)进行校准, 则会引起较大测量误差, 若利用式(6)和(7)进行校准, 能精确地计算出 S 和 $2t_0$, 从而有效地测量缺陷端点深度, 解决探头中心距测量不准引起较大误差的问题。

$$c = 2 \frac{\sqrt{S^2 + D^2} - S}{t_b - t_L} \quad (5)$$

$$S = \frac{D^2}{c(t_b - t_L)} - c(t_b - t_L) \quad (6)$$

$$2t_0 = t_b - 2 \frac{\sqrt{S^2 + D^2}}{c} \quad (7)$$

3 结论

(1) 直通波校准方法操作简单, 仅使用一个校准指针测量出 t_L , 通过式(3)计算出 t_0 , 若发现缺陷, 使用测量指针测量出 $t_{\text{缺陷}}$, 通过式(2)则能计算出缺陷深度 d 。这里不用输入工件厚度, 软件计算速度快, 适用于 TOFD 仪器在线分析软件; 缺点是必须已知材料声速和准确测量探头中心距。TOFD 设备仪器分析软件和离线分析软件使用该种校准方法时, 校准方法简单、速度快, 若被检测材料声速或探头中心距测量不准确, 则会出现很大误差。

(2) 直通波和底部反射波共同校准方法能精确地计算出声速 c , 探头延时 $2t_0$ 和探头中心距 $2S$, 现在国内生产的 TOFD 设备仪器分析软件和离线分析软件都是使用该种校准方法, 测量结果受其他影响因素少, 测量精确度高, 误差小; 缺点是校准方法复杂, 要求使用两个指针分别指向直通波和底波, 计算复杂, 校准时间较长, 该方法适用于离线分析软件。

(3) 如设备综合应用两种校准方法, 检测人员可根据实际情况选择简单的直通波校准方法或者直通波和底部反射波共同校准。检测过程中选用直通波校准, 离线时采用较复杂的直通波和底部反射波共同校准, 既提高了 TOFD 检测设备的检测速度, 又能提高检测结果的准确性。

(上接第 44 页)

监测系统(Fiber AE)克服了传统声发射检测系统信号传输距离短、抗干扰能力弱等缺点, 能适应较复杂环境下远距离声发射监测的任务, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 林丽, 赵德有. 局域波法在海洋平台结构声发射信号监

测中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 71-74.

[2] 王燕, 李晋尧, 刘晓清. 基于自适应小波基的声发射(AE)波源时频分析与定位[J]. 噪声与振动控制, 2008(1): 76-78.

[3] 翟丽娜. 声发射技术在储罐检测中的应用[J]. 压力容器, 2008, 125(6): 59-62.

[4] 许蕾. 大型起重机局部损伤光纤声发射监测技术研究与应用[D]. 太原: 中北大学, 2012: 28-30.