

基于虚拟仪器的多通道声发射检测系统设计与开发

徐源, 邢兰昌

(中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 针对目前商用声发射检测系统的不足, 基于虚拟仪器技术设计并开发了一套多通道声发射检测系统; 该系统采用通用高速同步数据采集卡实现对四通道声发射信号的采集, 单通道采集频率可调且可达 125 MHz, 采样长度可调; 以 LabVIEW 为平台开发配套的软件, 实现对数据采集过程的控制、采集数据的预处理、波形显示和数据保存等功能; 利用该系统开展了一维直线和二维平面断铅实验, 通过对实验数据进行处理实现了对断铅位置的定位, 并从多角度分析了定位误差的来源, 依据行业标准对系统的性能实施了定性与定量评价; 断铅实验结果表明声发射源定位误差低于传感器阵列中最大传感器间距的 5%, 验证了所开发系统的可用性, 其硬件条件、软件功能以及定位精确度满足行业标准; 所提出的声发射检测系统设计方案、实验方法以及数据处理方法将为工业现场声发射检测系统的研发提供有益的借鉴。

关键词: 声发射; 检测系统; 虚拟仪器; 断铅实验; 误差分析

Design and Development of Multi-channel Acoustic Emission Detection System Based on Virtual Instrument

Xu Yuan, Xing Lanchang

(College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: To overcome the shortage of commercial acoustic emission detection systems, a multi-channel acoustic emission detection system was designed and developed based on virtual instrument technology. A universal high-speed synchronous data acquisition card was adopted for sampling four channels of acoustic emission signals. The data acquisition frequency of each channel can be configured as high as 125 MHz and the sampling length can be adjusted flexibly. LabVIEW was used as the platform for developing the software to realize the control of data acquisition process, preprocessing of acquisition data, waveform display and data storage functions. Both one-dimensional and two-dimensional lead breaking experiments were carried out with the developed detection system. The lead breaking positions were located by processing the experimental data and the sources of positioning error were analyzed from multiple perspectives. Finally, the performance of the system was evaluated qualitatively and quantitatively according to industry standards. The experimental results have demonstrated that the location error of AE source is less than 5% of the maximum sensor spacing in the sensor array, verified the availability of the developed system, and shown that the hardware conditions, software functions and positioning accuracy meet the industry standards. The design scheme, experimental method and data processing method of the acoustic emission detection system will provide useful reference for the research and development of industrial field acoustic emission detection systems.

Keywords: acoustic emission; detection system; virtual instrument; lead breaking experiment; error analysis

0 引言

声发射(AE)是指材料局部受到外力作用发生断裂或变形到达塑形变形阶段并发出瞬态弹性波的现象^[1]。声发

射技术是一种实时、动态检测方法,能够有效地监测和识别材料缺陷^[2],基本原理是传感器接收到声发射源发出的信号,经过放大后由数据采集系统采集,通过对采集数据进行分析处理^[3],最后定性和定量地获得材料内部缺陷的位置、大小和扩展趋势^[4]等信息。AE技术在压力容器检验、铁路焊接结构疲劳损伤监测、岩石结构的监测和应力测量、机械制造过程中机械设备的监测以及大型游乐设施的状态监测和故障诊断、植物水蒸发的声发射监测研究等领域中得到不同程度的应用^[5]。与传统的无损检测方法相比较,AE无损检测在检测对象、检测过程和数据处理过程方面具有以下优点:

- 1) 适用频带宽、对象广泛,能适应高温、高辐射等恶劣复杂环境,被测介质可以主动的参与到检测过程中,对材料的结构尺寸不敏感;

- 2) 动态特性好,能够完整地捕捉到声发射源任意时刻

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2019-12-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306212); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095); 中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0214); 山东省重点研发计划项目(2017GGX40109); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(16CX05021A)。

作者简介: 徐源(1998-),男,安徽黄山人,硕士研究生,主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

通讯作者: 邢兰昌(1983-),男,山东德州人,副教授,硕士研究生导师,主要从事检测技术与自动装置、计算机测控系统、天然气水合物与多相流相关检测理论与方法、多物理场耦合数值模拟方法等方向的研究。

发出的声波, 缺陷处释放弹性波能量, 不需要仪器外加能量^[6];

3) 信号来源于测量对象本身, 避免了外加激励引起的测量误差, 可获取缺陷的动态变化及其扩展趋势信息。

AE 检测系统的研发开始于 20 世纪 50 年代末^[7-8], 多通道 AE 检测系统的发展主要体现于主机性能的提升、每通道 A/D 转换速率的增加、软件功能逐渐完善等。美国 PAC 公司的 LOCAN 系列声发射仪是基于 PC 机进行并行数据处理的典型代表, 其中 LOCAN 320 可以将声发射特征提取与数字化波形相结合^[9]; 德国 Vallen-systeme 公司的 VALLEN AMSY 系列声发射系统具有超高速、稳定性强和使用灵活的优点, 包括多种数据分析软件和定位算法。国内声华科技的全波形 AE 检测系统可以实现多通道同步采样, 配有用于信号处理的芯片阵列、小波分析和谱分析等软件^[10-11]; 中南大学研发了岩体声发射智能监测系统^[12], 具有噪音小、频带宽和灵敏度高优点, 能够完成声发射波形的瞬间识别; 中国地震局研发的 32 通道高速声发射数据采集系统精度高、采样速率高且能够实现全波形记录^[13]; 北京软岛时代科技有限公司推出的 DS2-8B 系列全信息声发射信号分析仪能够实现 8 通道数据同步采集, 且波形采集、参数提取完整、声发射源定位结果精确^[14]。国内外商用声发射系统虽然性能优越, 但是存在如下问题: 系统的成本普遍较高, 体积较大, 可扩展性弱且不能进行二次开发。以上问题大大限制了声发射系统的应用领域。

本文采用通用的硬件模块和图形化的编程语言, 基于虚拟仪器技术设计开发了一套多通道声发射检测系统。该系统采用高速数据采集卡 (PCI-E-1840) 对 4 路声发射信号进行同步采集, 采用 LabVIEW 为平台开发配套软件。利用所开发的系统开展了一维直线和二维平面断铅实验, 通过对实验数据进行分析处理实现了对断铅位置的定位, 针对实验结果进行了误差分析, 依据行业标准对系统的性能实施了定性与定量评价。系统中传感器、数据采集卡等硬件模块可以根据检测对象和精度要求灵活选择, 软件功能可以依据实验条件灵活设计, 系统的扩展性强、成本低, 而且可进行二次开发, 显示了系统的优越性。

1 总体功能分析与系统设计

1.1 总体功能分析

拟开发声发射检测系统的功能主要为获取声发射源发出的信号, 对信号进行分析处理, 通过计算实现对声发射源的定位。为了保证信息的完整性, 对每一通道进行全波形数据采集与保存, 并通过数据处理算法获取所需的特征参数, 此过程需要考虑采样参数设置与数据处理方法选择问题。分析信号的频谱特性可以得到声发射信号的主频, 根据信号主频确定合适的滤波器参数, 需要对信号进行滤波以降低环境噪声的影响。采用时差法对声发射源进行定位, 需要考虑信号的首波时刻提取和传感器阵列排布的问题。考虑到环境噪声对检测过程的影响, 需要考虑传感器的抗噪能力以及传感器阵列的安装位置, 如避免安装在振

动强烈的位置。

针对声发射信号的突发性和不确定性, 需要系统能够长期有效地工作, 保证检测过程的连续性与实时性^[15-16]。考虑到测试对象、参数指标的多变性, 要求系统具有较高的扩展性, 便于进行二次开发与维护等。

1.2 系统设计

拟开发的系统需达到如下指标: (1) 对 4 路声发射信号同步采集, 单路采集频率可调且不低于 100 MHz, 采样长度可调; (2) 信号放大器增益可调且能够达到 60 dB; (3) 可自由设定数据保存的路径、开始与结束保存的时间; (4) 对声发射源的定位精度应满足行业标准对声发射检测系统的规定, 即定位误差不超过传感器阵列中最大传感器间距的 5%。

硬件部分包括声发射传感器单元、放大器单元、数据采集单元和控制计算机单元。系统硬件部分组成如图 1 所示。声发射传感器单元用来检测声发射信号并转换成电信号输出到下一级。前置放大器单元用来放大传感器获取的原始微弱声发射信号, 提高信噪比。数据采集单元实现对放大后 4 路声发射信号的同步采集。通过所开发的虚拟仪器软件实现数据采集单元与控制计算机之间的相互通信。

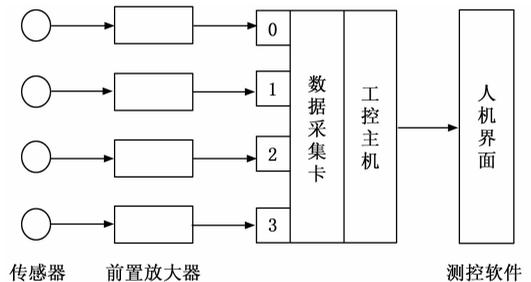


图 1 声发射检测系统组成

软件部分实现的功能主要包括: (1) 控制数据采集单元的启动停止等工作状态; (2) 配置数据采集卡的相应参数以适应频带不同的声发射信号, 实现对 4 路信号的同步采集; (3) 对采集的声发射信号进行处理和显示, 并对处理前后的声发射信号进行保存。

2 检测系统的实现

2.1 硬件部分

考虑到声发射源的频带较宽、工作环境多变的特点, 本系统选用 PXR15 高灵敏度谐振式声发射传感器, 谐振频率 150 kHz, 其 10 dB 带宽为 100~400 kHz, 灵敏度可达 67 dB 工作温度范围-20~+70 摄氏度。传感器外壳为不锈钢板材料, 匹配层为陶瓷材料, 使用环氧树脂进行密封。

考虑到采集的 AE 源信号十分微弱, 选用 PXP6 型双端输入、增益可调的声发射信号放大器, 增益可在 20 dB、40 dB、60 dB 之中进行选择; 工作带宽为 4 kHz~3.4 MHz, 且 PXP6 噪声抑制能力强; 输出阻抗低 (50 Ω)、驱动能力强; 工作温度-30~+70 摄氏度。

考虑到对 AE 信号波形的采样频率要尽量高并且降低硬

件成本, 系统选用通用高速数据采集卡 PCIE-1840。该采集卡能够实现 4 通道同步数据采集, 具有 16 位 A/D 转换分辨率, 采样频率最高为 125 MS/s, 可提供高达 2 GB 的 FIFO 内存以保持不间断的数据流功能, 提供可选的输入范围 ($\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0.2\text{ V}$, $\pm 0.1\text{ V}$), 支持启动触发、延迟启动触发、停止触发、延迟停止触发多种触发采样模式。

2.2 软件部分

系统的软件部分包括总体状态控制模块、采集卡参数配置模块、数据处理、显示和数据保存模块。实现对数据采集过程的控制和数据处理、显示及保存功能, 使整个系统具有较高的自动化程度。能够根据检测条件、检测对象和信号的特点对软件部分进行二次开发, 包括功能设计和参数选择, 使得系统具有较强的可拓展性。以 LabVIEW 为开发平台, 采用模块化和数据流思想^[17]所开发软件的人机交互界面如图 2 所示。

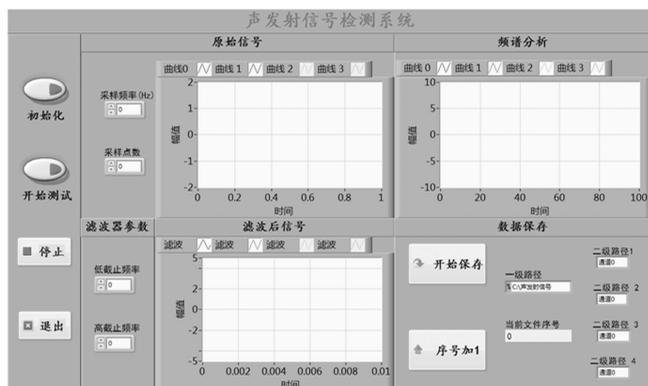


图 2 软件界面

总体状态控制模块实现软件初始化、测试系统的启动、停止与退出。设定了软件界面上的所有默认参数 (可修改), 点击初始化按钮后参数自动恢复到默认值。点击开始后数据采集卡按照预设状态开始工作, 并实现信号预处理与显示。点击停止后系统停止运行, 点击退出后测试软件退出。

参数配置模块对数据采集卡的运行参数进行配置。需要设定采集卡的触发采样模式、输入电平范围、采样通道信息, 如启动触发, 输入电平范围 $-5\sim+5\text{ V}$, 采样通道 0 和通道 4。在界面上输入采集频率与采样长度, 选择采样长度时需确保获取到完整的声发射信号, 可通过观察信号波形图进行调整。

数据预处理、显示和数据保存模块功能包括: 对原始声发射信号进行带通滤波和频谱分析; 实时显示滤波前后的信号波形图和频谱图; 设置数据保存路径, 以文本格式将采集数据保存至硬盘。

2.3 系统集成

首先将 PCIE-1840 数据采集卡插入工控机箱上的 PCI 板卡卡槽, 然后将声发射传感器与放大器相连接, 用 BNC 线将放大器输出端口连接至数据采集卡的各采样通道。所

开发的多通道 AE 检测系统如图 3 所示。

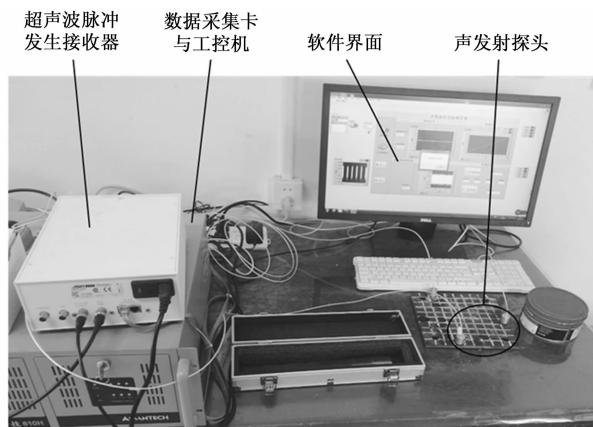


图 3 多通道声发射检测系统

3 系统测试实验

3.1 传感器延迟时间标定

测定传感器延迟时间所需设备包括: 所开发的 AE 检测系统、DPR300 脉冲发生接收器 (如图 3 所示)、无损检测用标准试块、耦合剂 (黄油)。DPR300 用于产生高压脉冲信号, 输出端口与发射传感器相连接; 无损检测用标准试块材质为 20 号钢, 共分为 7 阶厚度: 1 mm、1.5 mm、2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm, 用作声波传播介质; 耦合剂用于排除接触面之间的空气。标定实验步骤如下:

对 4 个 AE 传感器进行编号: #1、#2、#3、#4; 将 #1 传感器与 DPR300 脉冲发生接收器的发射端口相连接, 并配置 DPR300 的工作模式为脉冲发射模式, 设置激励电压 100 V, 将 #2 传感器与数据采集卡上的 0 号通道相连接; 将 DPR300 的触发输出端口与采集卡触发输入对应的端子相连; 在软件中将采集卡配置成外部触发采样, 设置采样频率为 100 MHz, 采样点数为 0.8 k; 将 #1 和 #2 传感器分别固定在试块第一阶的两侧, 启动系统开始采集并保存; 依次将 #1 和 #2 传感器固定于试块的另外 6 阶两侧, 数据保存完成后关闭程序; 将 #1 和 #2 传感器交换, #2 做发射传感器、#1 做接收传感器, 重复上述操作; 将传感器更换成 #3 和 #4, 重复上述实验操作。

3.2 声发射断铅实验

3.2.1 声速测量数据获取

将 #1 传感器用作接收传感器直接与放大器相连接, 放大器的输出端与数据采集卡相连接, #2 用作发射传感器与 DPR300 的输出端口连接; 将两个传感器分别固定于实验板材 (锡铅合金) 表面的指定位置: #1 (19 cm, 11 cm)、#2 (1 cm, 11 cm), 即两传感器相距 18 cm; 传感器与板材接触面上需要均匀涂抹耦合剂; 设置 DPR300 的工作模式及相应参数, 配置数据采集卡的工作模式为外部触发并启动 AE 检测系统, 设置采样频率为 100 MHz, 采样点数为 10 k。

3.2.2 一维断铅实验

如图 4 所示, 首先对板材进行了网格划分, 每个网格

规格为 2 cm×2 cm。

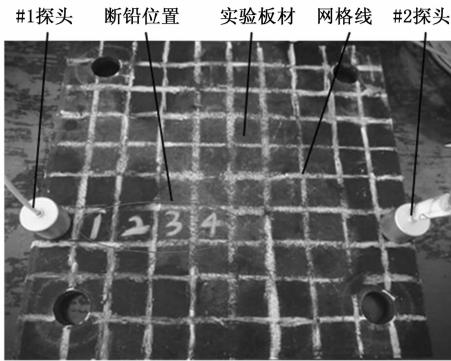


图 4 一维断铅实验图

选用 #1 和 #2 传感器开展一维断铅实验，传感器的直径为 1.8 cm，把板材面看成坐标平面，原点位于左下角，将 #1 和 #2 传感器分别固定于坐标 (19 cm, 11 cm) 和 (1 cm, 11 cm) 处并在接触面上均匀涂抹耦合剂，将两个传感器与采集卡的 0 和 1 通道对应连接。设置了 4 个断铅位置 (参见图 4)：(3 cm, 11 cm)、(5 cm, 11 cm)、(7 cm, 11 cm) 和 (9 cm, 11 cm)，传感器谐振频率为 150 kHz，设置采集卡采样频率为 1 MHz，采样点数 200 k，每个位置进行 6 次重复断铅操作。

3.2.3 二维断铅实验

选用 #1、#2 和 #3 传感器开展二维平面 AE 断铅实验。如图 5 所示，将三个传感器分别固定于板材的 (7 cm, 1 cm)、(5 cm, 19 cm) 和 (19 cm, 9 cm) 位置处，并在接触面均匀涂抹耦合剂。

将 #1、#2、#3 传感器分别与采集卡的 0、1、2 通道相连接，设置了 5 个断铅位置 (参见图 4)：(9 cm, 17 cm)、(9 cm, 11 cm)、(9 cm, 3 cm)、(13 cm, 13 cm)、(15 cm, 5 cm)，设置采集卡采样频率为 1 MHz，采样点数 200 k，每个位置进行 5 次重复断铅操作。

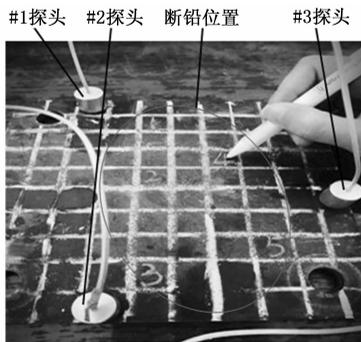


图 5 二维断铅实验图

4 实验结果分析

4.1 传感器延迟时间标定

无损检测标准试块材质为 20 号钢，20 号钢的弹性模量为 206 GPa，密度为 7.85 g/cm³，声波在其中的传播速度为

5 122.7 m/s，由此可得声波在 7 阶厚度中的传播时间分别为：0.19 μs、0.28 μs、0.38 μs、0.76 μs、1.13 μs、1.51 μs、1.89 μs。传播时间 t 与对应标准试块厚度 D 之间的函数关系如式 (1) 所示：

$$t = \frac{D}{V} + t_0 \quad (1)$$

式中， V 为超声波在试块中的传播速度， t_0 为实验中发射和接收传感器的总延迟时间，根据上式对实验数据进行拟合，进而得到 4 个传感器的平均延迟时间为 1.14 μs。

4.2 一维断铅实验结果分析

基于时间差法的一维直线声发射源定位算法^[18]如式 (2) 与式 (3) 所示，式中， D 为两个声发射传感器间距， V 为声波在板材中传播速度， t_{12} 为两个传感器接收到信号的首波时间差，联立两个方程可以求解出断铅位置距离两个传感器的距离 d_1 和 d_2 ，即得到了断铅位置 X 轴坐标与两传感器 X 轴坐标的差值，进而可确定断铅位置。

$$d_2 + d_1 = D \quad (2)$$

$$d_2 - d_1 = V * t_{12} \quad (3)$$

通过对声速测量数据进行处理得到超声波的传播速度 $V = 2\ 964$ m/s。在断铅信号图上选取第一个波谷作为首波时刻，得到 6 次实验中 #1 和 #2 传感器接收到的信号首波时间差值如图 6 所示。

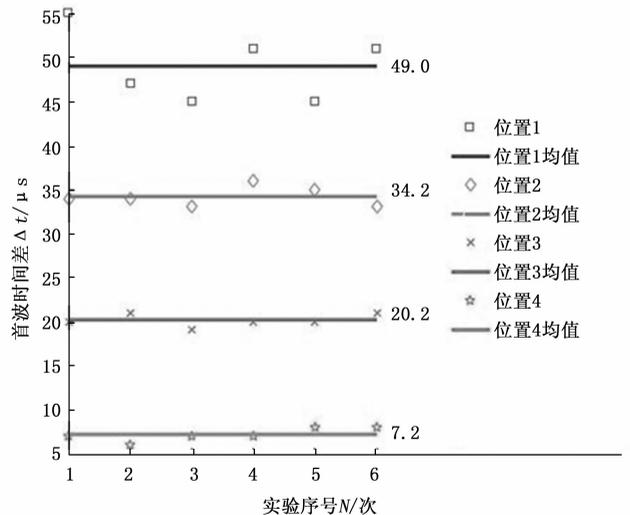


图 6 首波时间差图

由一维定位算法和首波时间差计算出一维断铅位置定位结果、理论位置及误差，如表 1 所示。其中相对误差依据两传感器间距进行计算，由于采样频率为 1 MHz，所以系统能够分辨的最小距离约为 3 mm。

表 1 一维 AE 断铅实验定位结果

实际位置 /cm	定位结果 /cm	绝对误差 /cm	相对误差 /%
(3,11)	(2.7,11)	0.3	1.7
(5,11)	(4.8,11)	0.2	1.1
(7,11)	(6.6,11)	0.4	2.3
(9,11)	(8.8,11)	0.2	1.1

4.3 二维断铅实验结果分析

基于时间差法的二维平面声发射源定位算法^[19]如式(4)与式(5)所示。

$$d_1 - d_2 = V * t_{12} \quad (4)$$

$$d_1 - d_3 = V * t_{13} \quad (5)$$

断铅位置距离三个声发射传感器的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ，声波在板材中的传播速度为 V ， t_{12} 与 t_{13} 分别表示 #1 传感器、#2 传感器和 #3 传感器接收到信号的首波时间差值。根据保存的数据作图得到 5 次实验中 #1 和 #2 传感器、#2 与 #3 传感器以及 #1 与 #3 传感器接收到的信号首波时间差值，图 7 给出了断铅位置四处各传感器对之间首波时间差。

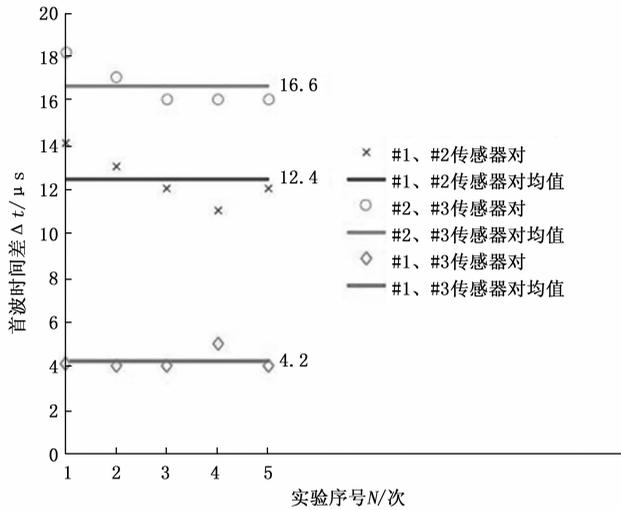


图 7 断铅位置 4 首波时间差

由二维定位算法和首波时间差计算出二维 AE 断铅实验定位结果、理论位置及误差，如表 2 所示。其中相对误差依据传感器阵列中最大传感器间距计算^[20]。为了更加直观的观察出定位效果，根据表 2 数据、实际板材的尺寸以及 AE 传感器的位置坐标和尺寸画出了二维平面定位图，如图 8 所示。

表 2 二维 AE 断铅实验定位结果

实际位置 /cm	定位结果 /cm	绝对误差 /cm	相对误差 /%
(9,17)	(9.0,17.1)	0.1	0.6
(9,11)	(9.3,11.1)	0.3	1.7
(9,3)	(9.0,2.1)	0.9	5.0
(13,13)	(12.6,12.9)	0.4	2.2
(15,5)	(15.3,4.8)	0.4	2.2

5 讨论

5.1 系统的误差

上述一维和二维断铅实验定位结果与实际位置的最大相对误差分别为 2.3% 和 5.0%，均产生于断铅位置与 #1 传感器距离最小时，针对误差产生原因进行如下讨论：

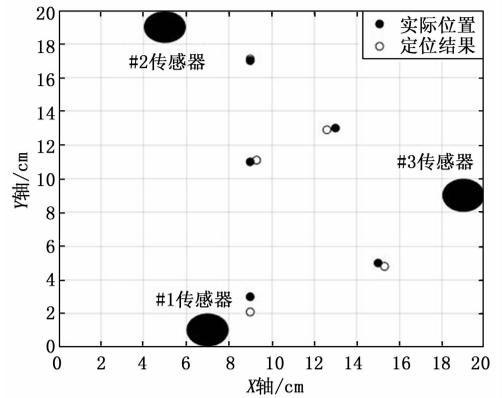


图 8 二维 AE 断铅实验平面定位图

1) AE 传感器自身的尺寸、传感器与实验所用板材边界的距离影响。实际 AE 传感器与板材接触面为圆形，直径为 1.8 cm，在数据处理时未考虑其尺寸对声波从 AE 源到传感器实际传播距离的影响，从最大相对误差产生的实验条件可以看出，断铅位置与传感器中心的直线距离越接近于传感器尺寸则误差越大。实验所用的板材尺寸较小，AE 传感器与板材边界距离较近，数据处理时未考虑声波在板材界面发生反射对实验数据的影响^[21]。

2) 实验所用板材表面不平整性和材质不均匀性。实验过程中默认声波最短传播路径为从 AE 源到传感器的直线段，未考虑板材表面不平整对实际最短传播路径的影响；另外，板材中声波的传播速度默认为一个恒定值，未考虑板材不均匀性等因素对声速的影响。

3) 系统分辨率。AE 系统的时间分辨率直接决定了系统能够分辨的最小距离，本系统的时间分辨率为 1 μs，断铅实验中能分辨的最小距离约为 3 mm，导致定位时小于 3 mm 的距离无法分辨而影响精度。

4) 环境温度。检测系统在运行过程中尤其是工控主机可能会发热，造成环境温度升高，温度的变化会对影响声速的大小，计算过程中默认声速为定值。

5.2 系统的性能

参照行业标准 JB/T 10764—2007^[22]规定的 AE 系统应具备的硬件条件、基础功能和精度范围对本系统进行性能评价。

1) 本系统采用的 PXR15AE 传感器在其响应频率范围内对来自不同方向的声波均有响应且自带的信号线为标准的低噪声同轴电缆，前置放大器工作频带覆盖信号频率范围且信噪比高，实验过程所采用的黄油声耦合剂粘度适宜且具有良好的声耦合效果，工控主机性能稳定，供电电源稳定且接地良好等硬件设施符合行业标准；

2) 本系统能够实现标准中规定的具备对 AE 信号的采集、预处理、显示和保存功能，在此基础上还可以根据实验条件、实验对象和信号的变化对软件功能进行二次开发；

3) 本系统的时间分辨率为 1 μs，标准规定定位误差不

得超过最大传感器间距的 5%，根据上述一维和二维断铅实验的定位结果可知本系统满足行业标准对系统的精度要求。

6 结论

采用通用的硬件模块和图形化的编程语言，基于虚拟仪器技术设计并开发了多通道声发射检测系统，开展了一维直线和二维平面断铅实验，通过对实验数据进行处理实现了对断铅位置的定位，针对实验结果进行了误差分析，依据行业标准对系统的性能实施了定性与定量评价。

通过实验验证了系统的可用性，硬件条件、软件功能以及定位精确度满足行业标准。系统中传感器、数据采集卡等硬件模块以及软件功能可以根据检测对象、精度要求、实验条件等进行灵活升级，系统的可扩展性强、成本低，而且可进行二次开发。所提出的声发射检测系统设计方案、实验方法以及数据处理方法将为工业现场声发射检测系统的研发提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 牛俊, 陈莉. 声发射检测技术的原理及运用 [J]. 计算机与信息技术, 2010 (3): 49-50.
- [2] 张锐, 丰学工, 张文庆, 等. 声发射技术在 LNG 储罐监测中的应用可行性探索 [J]. 石油工业技术监督, 2019, 35 (2): 50-52.
- [3] 张立军, 李增辉, 张天力, 等. 基于声发射的棒料起裂时间测定教学实验平台开发 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36 (5): 84-88.
- [4] 沈功田. 声发射检测技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [5] 唐兴, 张伟斌. 声发射检测在公共安全领域的应用进展 [A]. 全国危险物质与安全应急技术研讨会 [C]. 2011.
- [6] 王朝辉, 张来斌, 辛若家, 等. 声发射技术在管道泄漏检测中应用 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2007 (5): 87-90.

能, 将网络控制能力更加自动化、智能化, 将其它几个监控大厅局域网也纳入此系统管理下。达到飞行试验实时监控管理一体化的综合系统, 进一步提升飞机试飞的监控与实时预判处理能力。

- [7] Arrington M. Physics in Technology [Z]. 1981, 12 (1): 16
- (上接第 84 页)

能, 将网络控制能力更加自动化、智能化, 将其它几个监控大厅局域网也纳入此系统管理下。达到飞行试验实时监控管理一体化的综合系统, 进一步提升飞机试飞的监控与实时预判处理能力。

参考文献:

- [1] Jeffrey Richter. Windows 核心编程 [M]. 北京: 机械工业出版社出版, 2008.
- [2] 罗莉琴, 詹祖桥. Windows 网络编程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [3] 霍朝晖. 飞行试验振动参数遥测实时处理系统设计与实现 [J]. 西安电子科技大学, 2012, 23 (1): 105-107.
- [4] 杨哲, 王鹏, 徐茜. 基于 RTR 的遥测数据实时处理软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 165-167.

- 23.
- [8] Wagner J W. Progress in acoustic emission VII. Proceedings of 12th International Acoustic Emission Symposium [Z]. Sapporo: Japanese Society for NDI, 1994, 1-8.
- [9] 秦国栋, 刘志明. LOCAN 320 声发射仪数据格式识别与转化系统的开发 [J]. 无损检测, 2005 (1): 12-14.
- [10] 梁家惠, 尹作友. 声发射系统的发展 [J]. 无损检测, 1998, 20 (10): 285-291.
- [11] 秦国栋, 刘志明. 声发射测试系统的发展 [J]. 测试技术学报, 2004, 18 (3): 274-279.
- [12] 张星星, 樊广军. 岩体声发射智能监测仪的研制 [J]. 湖南有色金属, 2000 (5): 41-42.
- [13] 刘力强, 雷兴林. 超高速并行网络声发射观测系统 [J]. 地震地质, 2003 (3): 477-479.
- [14] 濮婧婧, 李顺才, Слатин Вадим Иосифович, 吴春力. 7050 铝合金拉扭破坏的力学及声发射特征试验 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38 (3): 20-24.
- [15] 祁雨, 邢兰昌, 刘昌岭, 等. 基于虚拟仪器技术的阻抗分析仪设计与开发 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (6): 19-24.
- [16] 邢兰昌, 祁雨, 刘昌岭, 等. 电一声一热多参数联合测试系统开发 [J]. 实验技术与管理, 2017, 34 (11): 78-85.
- [17] 朱泰, 邢兰昌, 祁雨, 等. 基于 LabVIEW 的天然气水合物电一声联合探测实验装置测控软件开发 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (6): 124-129.
- [18] 裴丽莹. 基于模态声发射的管道泄漏识别与定位方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [19] 曾祥琦. 基于时差法的结构裂纹扩展定位研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [20] GB/T 33643-2017, 无损检测: 声发射泄漏检测方法 [S].
- [21] 田傲雪. 声发射定位精度及其影响因素试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [22] JB/T 10764-2007, 无损检测: 常压金属储罐声发射检测及评价方法 [S].

- [5] 常永亮, 王霖萱, 常馨榕. 飞机试飞实时监控管控系统软件构架的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 11 (1): 98-102.
- [6] 刘升护, 贾雨, 杨哲. 一种多冗余遥测数据处理系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (11): 190-192.
- [7] 刘涛, 李云芝, 张璐. 基于 Measurement Studio 的试飞数据实时监控、存储、分析及回放平台设计 [J]. 电脑知识与技术, 2015, 11 (6X): 64-67.
- [8] 顾玮. SD-WAN 重新认识企业战斗力 [J]. 软件和集成电路, 2017 (5): 35-37.
- [9] 方滨兴, 任奎, 贾焰. 网络安全的新领域 [J]. 工程, 2018 (1): 1-2.
- [10] 丁卫兵. 大数据环境下的计算机网络信息安全问题研究 [J]. 中国科技投资, 2016, 34: 13-16.
- [11] 闫萍. 计算机信息管理技术在维护网络安全中的应用策略探究 [J]. 通讯世界, 2017, 21: 77-79.