

# 基于 USB AE 模块的便携式管道声发射泄漏检测系统开发

白 晟<sup>1</sup>, 杨剑锋<sup>1</sup>, 刘文彬<sup>1</sup>, 许凤旌<sup>2</sup>

(1. 北京化工大学 化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029;  
2. 美国物理声学公司 北京代表处, 北京 100029)

**摘要:** 基于 USB AE 模块的便携式声发射仪是一种新型的声发射检测设备。阐述了采用声发射方法检测管道泄漏的原理、USB 声发射设备的结构和特性, 分析了现有 USB 声发射检测系统存在的局限性。以 Visual Studio C++ 作为程序开发平台, 设计了针对管道泄漏这一特定环境和对象的便携式 USB 声发射检测系统。通过管道泄漏模拟试验, 验证了系统设计方案的合理性, 实现了声发射信号采集、数据处理和声发射源定位等功能。

**关键词:** 声发射; USB AE; 系统开发; 管道泄漏检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2014)04-0063-05

## Development on Pipeline Leak Detection System Based on Portable USB Acoustic Emission

BAI Sheng<sup>1</sup>, YANG Jian-feng<sup>1</sup>, LIU Wen-bin<sup>1</sup>, XU Feng-jing<sup>2</sup>

(1. Chemical Safety Engineering Research Center of Ministry of Education, University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Physical Acoustics Corporation Beijing Office, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Portable USB acoustic emission device is a new type of acoustic emission testing equipment. This paper describes the principles of using acoustic emission to detect pipeline leaks and the structure and characteristics of the USB AE, analyzes the limitations of the existing USB acoustic emission detection system. Based on the above-mentioned points, we have developed a Portable USB acoustic emission detection system for pipeline leak on Visual Studio C++ 2012 software platform. By pipeline leakage simulation experiments, we verify the system design is feasible. And the system can achieve the acoustic emission signal acquisition, data processing and acoustic source locating functions.

**Keywords:** Acoustic emission; USB AE; System development; Pipeline leak detection

基于 USB AE 模块的便携式声发射检测设备是新型的声发射设备, 其灵活性大大提高, 是声发射检测技术的重要发展, 对于声发射检测技术的推广与应用具有重要意义。

声发射检测过程中, 当管道泄漏时, 由于内部压力, 造成管道中介质喷射从而诱发瞬态弹性波, 并且其沿管壁材料传播到表面, 产生表面微位移。将声发射传感器置于管壁, 传感器通过压电效应将材料表面的微机械振动转化为电信号, 然后经放大、传输

后显示和处理。声发射信号实际上是由一个或多个 AE 事件经系统处理得到的电信号<sup>[1]</sup>。这些来自声发射源(即泄漏点)的信号载有源的特征信息, 解析这些信息可以掌握管道的泄漏情况, 达到检测泄漏的目的。

笔者将阐述利用 USB AE 模块设计多通道的便携式声发射设备, 并围绕如何提高便携式 USB 声发射软件系统可操作性这一问题, 重点研究基于 USB AE 模块的管道泄漏检测系统的开发。

## 1 硬件结构

### 1.1 USB AE 模块

试验所使用的是美国物理声学公司(PAC)的高性能 USB AE 模块。与传统的声发射板卡不同,

收稿日期: 2013-05-02

基金项目: 成套装置承压设备预知检测及动态风险管理技术研究资助项目(2011BAK06B03)

作者简介: 白 晟(1988—), 男, 研究生, 主要从事管道泄漏的声发射检测及系统开发工作。

USB AE 模块是基于 USB(Universal Serial Bus)通用串行总线技术的,这一技术进步使得声发射设备脱离了 PCI 插槽的束缚,从而可以摆脱笨重的工控机。USB AE 模块体积更小灵活性更大,但其功能并不比传统声发射设备少,声发射实时特征抽取与波形采集器等功能都可以实现。每一个 USB AE 模块为单通道。它不需要外部电源,可以通过通用 USB 数据线直接与计算机连接形成声发射采集分析系统。

USB AE 模块具有 18 位 A/D 转换、20 M/s 的采样率和 1 MHz 的带宽。该模块集成了前置放大电路。放大电路的输入输出信号都为模拟信号,它是一个模拟电路,放大倍数为 40 dB,通频带为 20~1 000 kHz,输入噪声电压小于 5  $\mu$ V。

## 1.2 多通道便携式 USB AE 声发射系统硬件设计

笔者设计使用多个 USB AE 模块组成多通道声发射系统。利用 RJ45 接口,使用连接线(带有 RJ45 型插头的网线)将 4 个 USB AE 模块连接形成 4 通道系统,低通道序号模块的 LINK OUT 接口连接高序号通道模块的 LINK IN 接口。该系统中,传感器采集的声发射信号经信号电缆输入到 USB AE 模块,完成 A/D 转换,再经 USB 通信协议接口传输至计算机,如图 1 所示。

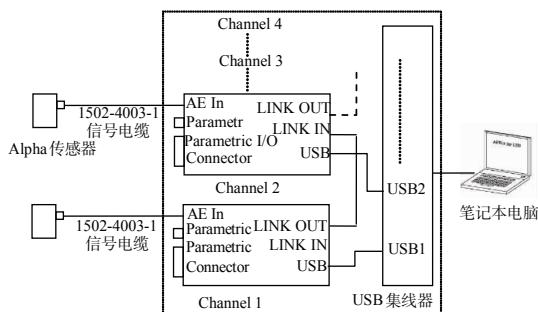


图 1 USB AE 硬件结构

系统配备使用的是美国物理声学公司的 Alpha 系列传感器中的 R3a 和 R6a 传感器。主要功能是利用压电原理实现机械能与电能之间的能量转化。

由于 USB AE 模块使用的是 USB 通用串行总线协议,所以该系统的计算机终端选择装载 Window7 系统的笔记本电脑,更加体现了该系统的便捷性。计算机的 USB 接口供给 5 V、500 mA 的电能给 USB AE 模块。

系统所选用信号电缆为 1 m 的 1502-4003-1 型电缆和 2 m 的 1502-4003-2 型电缆,它们都为 75  $\Omega$  的同轴电缆。

## 2 软件系统开发

### 2.1 现有声发射软件系统的局限性

现有的声发射检测系统,操作设置复杂且需要大量从业经验,操作性、适用性有待提高。如 AE 通道设置,需设置每个通道的门槛值、模拟滤波器上下限、采样率、预触发、长度。模拟滤波器的设置需根据对象不同而进行不同的设置,需要丰富的专业知识。AE 定时参数 PDT/HDT/HLT 的设置,需要根据检测对象材料的不同来设置经验值。

声发射参数众多,如撞击、事件计数、幅值、ASL 值、RMS 值等,但是这些参数对于不同的检测对象并不是全部都有意义,软件中对于检测对象没有意义的参数采集不但浪费了资源,也使得操作人员对各种参数混淆,容易操作错误。因此急需设计针对特定环境和对象的便携式 USB 声发射检测系统来满足使用需求。

### 2.2 系统开发

#### 2.2.1 开发平台

为保证软件的可靠性和可移植性,该系统软件采用 Windows 7 操作系统和 Visual Studio C++ 2012 作为程序开发平台。C++ 语言的可靠性、灵活性、高继承性、便于移植等特点,成就了它代码质量高、可读性好、安全性强等优点,非常适合本次研究。C++ 的面向对象功能,使得软件的界面化得以保证,人机交互可以实现。

#### 2.2.2 采集模块

该系统开发是以美国物理声学公司(PAC)的底端开发环境为基础。该底端开发环境为系统开发提供动态链接库,动态链接是一种应用程序运行时与库链接的机制。系统通过访问、调用该动态链接库来控制、操纵 USB 板卡。采集模块以此为基础,通过调用分析 PAC 公司提供的动态链接库来实现数据的采集活动。

#### 2.2.3 数据传输与储存模块

系统开发充分利用 USB 总线的带宽,设计为多线程,采集、保存、显示都为独立的线程<sup>[2]</sup>。需使各个线程保持高度同步,从而保证系统的实时性。系统基于 C++ 面向对象功能,实现人机交互界面,对数据进行显示、分析。

为了实现系统数据传输的可靠性与准确性。该系统设计了具有完备功能的数据传输协议。USB 提供的四种传输模式保证了系统设备间的实时联

系。在 USB AE 设备接入计算机进行配置时,依靠 USB 的控制传输方式发送请求给 USB 设备,进行配置。USB 的同步传输模式在采集数据的时候可以保证数据到主机的同步传输<sup>[3]</sup>。为了保证数据传输的准确性,将数据包的格式定义为报头与报文两部分。报头(head)部分存储有数据的版本号、通道号、存储地址等信息。报头的封装提高了数据包传输及寻源的准确度。报文部分主要包括数据的类型、数据信息等。

#### 2.2.4 系统功能

管道泄漏检测系统包括以下几个基本功能:

(1) 参数设置:该系统不同于传统的声发射检测系统,不需要进行许多需要专业知识的参数设置,软件已经将管道泄漏的参数设置集成到系统中。使用时只需要根据环境噪声适当调整门槛值,以及管道、环境等相关数据。

(2) 显示:系统可建立并显示多种声发射图谱。除了图谱显示外还可显示数据,将所需数据以列表形式显示出。

(3) 定位:可进行管道泄漏点的定位,并可显示三维的定位图。

(4) 微调选项:声发射信号受周围环境等其他因素的影响比较大,在检测时需要对设置进行调整,但是这种调整无不需要丰富的经验。针对这一问题,在该系统开发中,设计微调功能,该功能类似收音机的微调功能。微调功能将检测时可以改变的参数设置慢慢进行微小的组合调整,直到达到要求。

### 2.3 管道泄漏检测模块算法

#### 2.3.1 信号处理方法

声发射能量分析法适用于连续声发射信号,不依赖于任何阈值电压,故采用能量分析法。声发射参数中,RMS 值和 ASL 值反映声发射的大小,不受门槛值的影响,非常适用于连续声发射且测量简单,故试验选择 ASL 值和 RMS 值来评判管道的泄漏<sup>[4]</sup>。

有效值电压(RMS)表示采样时间内信号的均方根值,以  $V$  表示。平均信号电平(ASL)表示采样时间内,信号电平的平均值,以  $D_b$  表示。

使用能量分析法进行信号处理:

(1) 将 4~20 mA 的电流信号转变为电压信号。声发射传感器利用压电效应将声发射源发出的瞬态弹性波所产生的位移转换为电信号,即 4~20 mA 的电流信号。系统将经过信号转变处理得到

的 4~20 mA 电流与 0~5 V 的电压值线性对应。

(2) 有效值电压(RMS)为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} [V(t)]^2 dt} \text{ Milivolt} \quad (1)$$

式中: $V(t)$  为随时间变化的信号电压值; $\Delta T$  为平均时间, $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

通过试验得知,对于泄漏检测, $\Delta T$  值一般为 0.5~5 s。

(3) 平均信号电平(ASL)为:

$$ASL = 20 \lg \left( \frac{RMS}{1} \right) - pre \quad (2)$$

式中: $ASL$  单位为 dB; $pre$  为前置放大器增益,单位为 dB。 $ASL$  值的意义是为了缩小数量级,以提高数据的可读性。

该系统设计采用  $ASL$  值为定性评判被检测管道泄漏与否的决定值,也是估算管道、阀门泄漏率的唯一主要变量<sup>[5]</sup>。

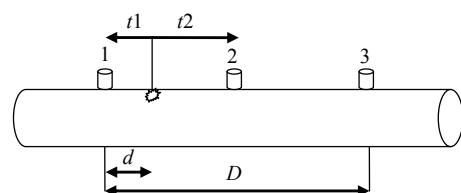
#### 2.3.2 定位算法

该系统应用于管道的泄漏检测,定位方式主要为线定位和平面定位。当管道的长径比非常大时,采用时差线定位的方法<sup>[6-7]</sup>;当管道长径比小时,采用平面定位。系统开发主要面对的是长径比大的管道,所以使用线定位算法。

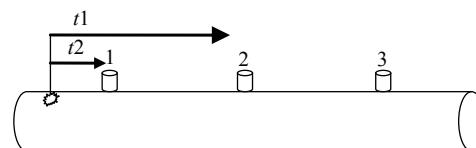
如图 2(a)所示,声发射源在 1,2 传感器之间, $t_1, t_2$  为传感器 1、2 接收到声发射信号的时间, $D$  为两传感器间距。可以计算出声发射源距传感器 1 的距离  $d$  为:

$$d = \frac{1}{2} (D - \Delta t \cdot V) \quad (3)$$

式中: $V$  为声波在管道的传播速度; $\Delta t$  为两传感器接收到信号的时间差。



(a) 泄露点位于传感器之间



(b) 泄露点位于传感器外侧

图 2 管道线定位图

当声发射源在传感器阵列外部时,如图 2(b)所示, $\Delta t$  均为  $D/V$ ,声发射源定位为传感器 1 外部。

如式(3)所述,只需得到传感器接收信号的时间差  $\Delta t$  以及声波在检测材料中的传播速度,即可计算出泄漏源的位置。管道泄漏的声发射信号为连续声发射信号,连续信号两个波之间的时间延迟由互相关方法得到<sup>[8]</sup>。两波的互相关函数为:

$$XY(\tau) = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} X(t)Y(t+\tau) dt \quad (4)$$

式中: $X(t)$  为传感器  $X$  接收到来自连续 AE 源的波; $Y(t+\tau)$  为传感器  $Y$  接收到的来自同 AE 源的波,与  $X(t)$  的时间延迟为  $\tau$ ; $\Delta T$  为一个有限的时间间隔,单位为 ms。

$X, Y$  两传感器接收到同 AE 源所发出波的时间差  $\Delta t$  可以由互相关函数  $XY(\tau)$  的最大峰值处来得到,  $\Delta t = \tau$ 。

### 3 应用试验

#### 3.1 试验设备

搭建管道泄漏模拟试验平台,在该平台使用便携式 USB AE 系统,验证其功能的有效性与准确性。

试验台选用长 2 m、外径 100 mm、壁厚 10 mm 的无缝钢管模拟泄漏管道。在管道两端分别连接水泵和球阀,用于加压和压力调节。管中介质为水,当试验时,由扬程为 28 m 的耐腐节能管道泵加压至 0.3 MPa。以管道连接泵一端为零点,沿轴向方向分别在 0.7, 1.3 m 处设置 AE 传感器。为模拟泄漏孔,沿轴向方向,在距零点 1.25 m 位置制作直径为 1.2 mm 的孔,如图 3 所示。试验时将另一台空气泵开启运行,用于模拟现场环境噪声。

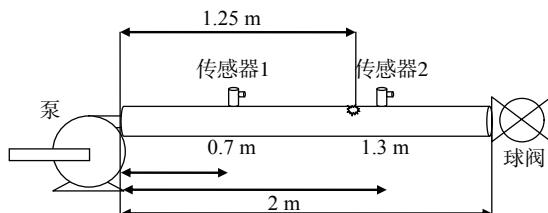


图 3 模拟试验平台

#### 3.2 试验步骤

(1) 参数设置:将模拟泄漏孔封堵住,将模拟环境噪声的空气泵打开,应用软件测量噪声,以便设置门槛值。经测量,噪声信号为 26 dB,故将门槛值设置为 30 dB。将泄漏孔堵住,当管道内压力加到预计的 0.3 MPa 并稳定后开始采集,此时 ASL 值为

14 dB,故 ASL 报警值设为 30 dB。

(2) 使用微调功能调整设置。建立 ASL 值随时间变化图、RMS 值随时间变化图、撞击随时间变化图、功率谱图。

(3) 开放泄漏孔,在管道压力稳定在 0.3 MPa 后开始采集,观察图像,如图 4 所示。

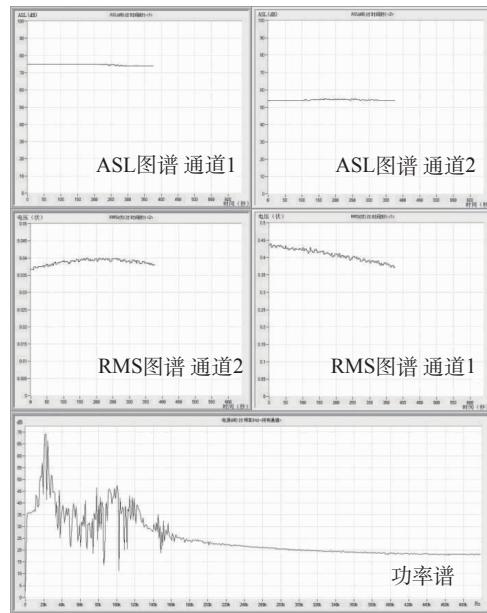


图 4 AE 信号图谱

(4) 进行泄漏点定位,并计算误差及误差分析。将传感器置于四个不同位置进行四组定位试验。传感器的设置及四组试验的泄漏点定位数据见表 1。图 5 为第一组试验定位图。

表 1 四组试验泄漏点定位数据

序号	传感器 1 坐标/m	传感器 2 坐标/m	定位数据/m	真实位置/m	误差/%
第 1 组	0.7	1.3	1.19	1.25	4.8
第 2 组	0.7	1.5	1.16	1.25	7.2
第 3 组	0.9	1.3	1.21	1.25	3.2
第 4 组	0.5	1.5	1.14	1.25	8.8



图 5 泄漏点定位 3D 图

#### 3.3 试验结果分析

(1) 由 ASL 值随时间变化图可以看出,在压力

稳定开始采集后,ASL 值稳定并且明显高于报警值。说明系统可以有效地监测管道的泄漏情况。

(2) 综合四组定位试验结果可见,验证系统可以完成管道泄漏点的定位功能,但定位存在着误差。定位误差原因可能为系统算法的不精确度、环境对定位的影响、传感器的不精确度、管道材料对声发射信号的衰减等。

由上述试验结果可以看出,该系统可以准确地判断管道的泄漏情况,可以建立相关数据的图谱进行分析,根据泄漏信号可以将泄漏点的位置进行定位。综上,可以证明该系统可以实现预计的功能。

#### 4 结语

应用强大的 C++ 程序编译语言,设计开发了针对管道泄漏检测的便携式 USB 声发射检测系统。通过管道泄漏模拟试验,验证了该系统的可行性,实现了声发射数据的实时采集、储存和显示等功能以及声发射源定位的功能。与传统的通用类声发射系统相比,该系统在管道泄漏检测方面展现出优良的性能,界面简洁、操作方便、适用性良好,具有广泛的应用前景。

目前,面向特定对象的便携式 USB 声发射系统开发还刚刚起步,该系统对于管道泄漏量的估算以及定位准确性方面还尚显不足,还需要进一步研究。今后的研究重点是:

(1) 进一步研究基于便携式 USB 设备的管道

(上接第 55 页)

#### 参考文献:

- [1] 胡浪涛,何辅云.管道漏磁检测磁化系统研究和设计[J].电子测量与仪器学报,2008,22(6):102-107.
- [2] 戴光,孙传轩,杨志军,等.管道外壁缺陷多磁化单元磁场数值模拟与参量分析[J].压力容器,2008,25(11):24-29.
- [3] 孙燕华,康宜华,石晓鹏.基于单一轴向磁化的钢管高速漏磁检测方法[J].机械工程学报,2010,46(10):8-13.
- [4] JANSEN H J M, CAMP P B J, GEERDINK M. Magnetisation as a key parameter of magnetic flux leakage pigs for pipeline inspection[J]. Insight, 1994, 36(9):672-677.

泄漏检测系统。通过大量基础试验得出管道泄漏的相对准确的泄漏量估算公式以及调整定位公式的参数设置及算法。

(2) 总结开发管道泄漏模块的经验和技术,发展更多的面向不同环境和对象的 USB AE 检测系统。

#### 参考文献:

- [1] ASTM E1316—1996 Terminology for Nondestructive Examination[S].
- [2] 李培江,童官军.基于 USB 的声发射信号高速采集系统的研究[J].测控自动化,2011,27(2):94-96.
- [3] 童官军,王汝笠.多通道声发射高速数据采集系统的研制[J].无损检测,2009,31(2):150-153.
- [4] 孔德连.声发射技术在阀门泄漏在线监测方面的应用[D].北京市:北京化工大学,2010.
- [5] Kaewwaewnoi W, Prateepasen A, Kaewtrakulpong A. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage[J]. Measurement, 2010 (4):274-282.
- [6] MILLER R K, POLLOCK A A, WATS D J, et al. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques [J]. NDT&E, 1999, 32(1):1-8.
- [7] 胡昌洋,杨钢锋,黄振峰,等.声发射技术及其在检测中的应用[J].计量与测试技术,2008,35(6):1-4.
- [8] 沈功田,刘时风,王玮.基于声波的管道泄漏点定位检测仪的开发[J].无损检测,2010,32(1):53-56.

- [5] 黄松岭.管道磁化的有限元设计[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(2):67-69.
- [6] ATHERTON D L. Stress-shadow magnetic inspection technique for far-side anomalies in steel pipe[J]. NDT International, 1983, 16(6):145-149.
- [7] ALTSCHULER E, PIGNOTTI A. Nonlinear model of flow detection in steel pipes by magnetic flux leakage[J]. NDT International, 1995, 28(1):35-40.
- [8] 康宜华,武新军,杨叔子.磁性无损检测技术中的磁化技术[J].无损检测,1999,21(5):206-209.
- [9] 高廷岩.管外多磁化单元结构优化设计与实验研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
- [10] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,2008.