

便携式声源定位系统的研制

廖伊丹, 黄 霄, 刘佳星, 罗 春, 马克波, 刘志强
(中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 针对目前国内外噪声定位装置体积庞大、价格昂贵的问题, 开发了一套便携式声源定位系统。系统程序由 MATLAB 软件编写, 操作界面由 Microsoft.NET 平台开发, 四元立体阵列配合牛顿迭代定位算法以更小的搜索步长和空间结构弥补了因声传感器数量减少带来的精度降低的不足。试验结果表明, 系统可以实现空间任意方位的三维声源定位, 平均相对误差为 11.75%, 能满足工业领域声发射检测的要求。

关键词: 声发射检测; 定位; 四元立体阵; 参数设置

中图分类号: TP23; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2019)01-0065-04

Design of Portable Sound Source Localization System

LIAO Yidan, HUANG Xiao, LIU Jiaying, LUO Chun, MA Kebo, LIU Zhiqiang

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper discussed current development state of noise localization devices, which were characteristic of large size and high cost. The authors have developed a new portable sound source localization system which is using MATLAB as a programming language and having operator interface integrated by Microsoft .NET services. With four-dimensional array and Newton iterative algorithm, the system has made remedy for the decrease in accuracy due to the small number of sensors with smaller search steps and space structure. Experiments have shown that the system can realize three-dimensional sound source localization in any spatial orientation with an average relative error of 11.75%, which can meet the requirements of industrial acoustic emission detection.

Key words: acoustic emission detection; localization; four-dimensional array; parameter setting

在热工检测领域, 经常需要对运送高温高压介质的管道进行检测。处于恶劣环境下的承压管道容易发生泄漏, 泄漏发生时, 管道内的高温、高压流体因内外压力差, 在通过裂缝喷射出来时形成射流, 同时产生喷流噪声^[1]。声学检测技术可以通过频谱分析和专家诊断迅速给出管道泄漏的情况评估, 是一种比较先进的技术^[2]。目前, 电站锅炉的承压管监测系统普遍依靠区域性定位原理^[3], 即通过比较各个声探头采集信号能量的大小, 粗略估计声发生源所在区域。这种监测系统体积庞大, 传感器数量多

达 40~60 只, 造价昂贵并且检测精度低。在确保系统便携性、低造价、高准确度的条件下, 笔者开发了一套完整的声源检测与定位系统, 为声发射检测仪器的设计提供了参考。

1 声源定位系统功能与工作原理

声源定位系统依靠被动接受声发射源信号以及进行数学运算来实现声源的特征分析与位置估计。与超声波式、红外线式检测仪器不同, 声源定位系统不向外辐射电磁波, 且安全性、隐蔽性、经济性都比较好。系统可用于管道安全检测与泄漏点定位、火炮位置自动识别^[4]等场景。系统可识别声频率范围为 20 Hz~20 kHz, 总质量为 14.5 kg, 能耗为 500 W, 平均相对误差在 15% 以内。

便携式声源定位系统总体结构框图如图 1 所示。便携式工控机作为整个系统的运算中心, 通

收稿日期: 2018-03-30

基金项目: 中南大学创新驱动资助项目 (1053320170762)

作者简介: 廖伊丹 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事声发射检测技术及检测设备的研究开发

通信作者: 廖伊丹, 649836472@qq.com

过搭载 Microsoft.NET 设计的操作界面实现人机交互。界面上的控件调用后台程序实现数据采集控制、信号滤波与频谱分析、声源位置计算。数据采集模块与工控机采用通用串行总线通信,工控机控制数据采集的起止与采样率,传感器模块以同轴电缆与数据采集卡相连。系统以顺序逻辑结构运行,开始数据采集后观察信号频谱图的实时变化,若有突变高频成分出现,提取这一段信号进行滤波处理。滤波后加窗分帧,进行互相关计算,得到时延估计值。最后定位程序将时延估计值与声速、传感器位置、迭代初始值代入进行迭代,直到收敛并输出一个位置坐标与图像。这样,系统就完成了—次声发射信号的频谱分析与源位置显示。

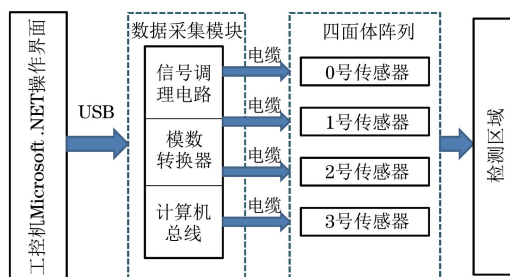


图1 便携式声源定位系统总体结构框图

2 系统硬件

2.1 传感器阵列的设计与传感器选择

传感器阵列的形式决定了传感器的数量与声源定位的分辨率。为了在传感器数量最少的情况下实现空间任意方位的位置识别,系统采用正四面体的形式,传感器间距 0.5 m。传感器标定后以 0~3 进行编号,每一个传感器配备对应编号的组合式支架一个,与数据采集卡 0~3 的 4 个通道一一对应。0 号传感器所在位置定为空间坐标系原点,0,1,3 号传感器确定了 xoy 平面,2,0,3 号传感器确定了 xoz 平面。传感器在支架上采用螺栓连接的形式固定,表面开螺纹孔减少损伤。支架竖直和水平方向设有刻度尺,可有效减小传感器安装位置的偏差。独创的组合式支架比传统的一体式阵列架具有更高的便携性和更好的适应性。传感器支架结构示意图如图 2 所示,传感器阵列结构示意图如图 3 所示。

声音传感器是检测系统的关键部件,其响应多敏感于表面振动的垂直位移,包括位移、位移速度和位移加速度,这主要取决于声音传感器的频率响应和灵敏度特性^[5]。选型时阵列中传感器必须参数一

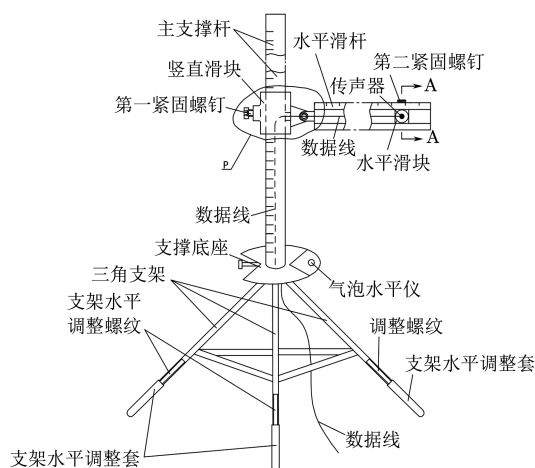


图2 传感器支架结构示意图

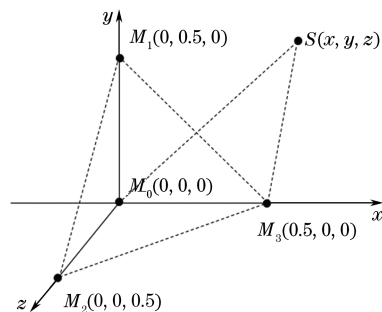


图3 传感器阵列结构示意图

致,特别要对传感器进行相位校准工作^[6],确保原始相位相同。为了减小定位误差,传感器的体积要尽量小。系统选择了 MPA416 型传感器,其频率响应范围为 20 Hz~20 kHz,灵敏度为 50 mV·Pa⁻¹,动态范围为 29~127 dB。

2.2 数据采集器的选择

系统中数据采集卡为 PMD-1608FS 型,12 通道独立同步采样,采样率可达 250 kHz,采样深度为 16 bit。数据采集卡采用单芯片技术,集成度高,稳定性提高了 5 倍。数据采集器外型小巧,所有信号的输入输出均通过带螺丝的接线端子连接,价格是传统采集卡的一半,性价比高。

3 软件设计

研制了“便携式声源定位监测软件”,实现了范围内声源的特征分析与位置估计。软件开发环境采用 Microsoft.Net 完成,即 Microsoft 的 XML Web 服务平台,不论操作系统或编程语言有何差别,XML Web 服务能使应用程序在 Internet 上传输和共享数据。开发平台为 Windows 7,软件设计采用了新辅助线程、界面包、Net Framework 4.0 等技术。

3.1 操作界面设计

操作界面显示数据并对硬件执行控制命令,主界面中包含5个子界面(见图4~8)。数据采集主界面开辟了新的辅助线程,成功初始化数据采集卡后即可采集数据。数据采集设置界面包括通道选择、采样率设定、图形显示等功能。频谱分析设置界面包括信号提取长度选择、数据导入导出、信号频谱图显示等。滤波降噪设置界面包括滤波器参数的输入和滤波后信号频谱图的显示。互相关分析设置界面包括加权函数选择和互相关图像显示。声源位置显示界面则包含声源坐标输出、位置图示显示、测试结果保存功能等。界面性能稳定,功能丰富。

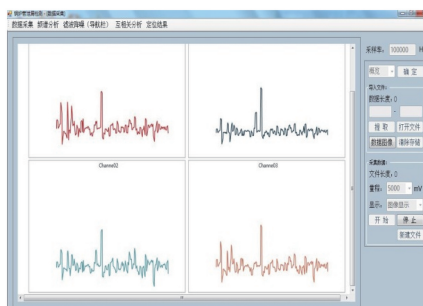


图4 数据采集子界面

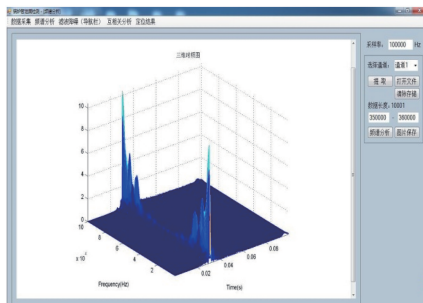


图5 频谱分析子界面

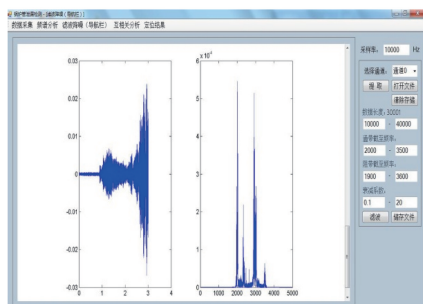


图6 滤波降噪子界面

3.2 关键参数设置

实际工作中,选择采样频率的依据是采样定理,即对于一个频限信号 $x(t)$,若其最高频率分量为 ω_m ,则保证信号复原时不失真的采样频率 ω_s 应满足 $\omega_s > 2\omega_m$ 。但采样率设置太高将导致系统处理数

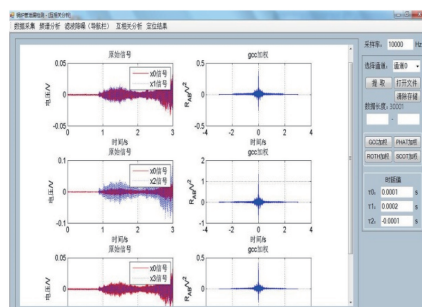


图7 互相关分析子界面

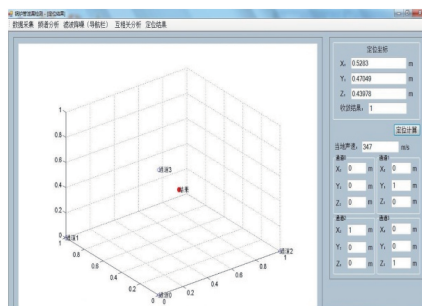


图8 定位结果子界面

据量冗杂,需要进行试验研究以确定系统的最佳采样率。试验分别以 10, 50, 100 kHz 的采样率进行数据采集,对照不同采样率下的定位误差。系统采样率设置对定位误差的影响如表1所示,表1中的数据表明,当系统采样率提高时,时延估计值更接近理论值,定位结果也更接近真实值。当系统采样率为 100 kHz 时,平均时延估计误差降为 2.13%,平均定位误差为 4.9%,两者分别比采样率为 10 kHz 时的 5.19% 和 35.8% 有了明显降低。考虑系统误差与数据处理的难度,确定系统采样率设置为 100 kHz 是合适的。

利用信号进行离散傅里叶变换和信号处理时,因运算时间和储存容量的限制,只能处理有限的样本容量。分析信号频谱时调用 MATLAB 软件中的 FFT(快速傅里叶变换)函数,其样本通常是 2 的整数次幂,如 2 048。因此,必须对时间无限的数字序列进行截断处理。泄漏声信号是连续的随机信号,包含多个频率分量,截断后存在能量频谱泄漏,需要加窗函数来满足傅里叶变换周期性的要求。综合考虑检测信号的特性与测试的重点(关注频率点而非能量大小),选择 periodic 类型的 Hanning 窗函数,窗长度为 400,帧移为 100。

4 检测实例

为了验证系统的功能,在室外空旷环境对系统性能进行测试。声源为模拟噪声,主频在 2 kHz~

表 1 系统采样率设置对定位误差的影响

采样率/kHz	时延误差/%	系统精度/s	实际位置/m	定位结果/m
10	5.19	1×10^{-4}	(2,1.5,2.5)	(1.542 8,1.185 0,2.062 1)
50	3.01	2×10^{-5}	(2,1.5,2.5)	(1.871 7,1.445 9,2.370 5)
100	2.13	1×10^{-5}	(2,1.5,2.5)	(1.926 6,1.508 2,2.443 2)

3 kHz 之间,由蓝牙音箱播放。

系统采样率设为 100 kHz,采样时长为 3 s,分析点数为 2 048。4 个传感器坐标分别为 $M_0(0,0,0)$, $M_1(0,0.5,0)$, $M_2(0.5,0,0)$, $M_3(0,0,0.5)$,其中 M_0 设为参考传感器。试验开始前,先测量当地声速。在(2,0,0)处发声信号 6 次,测得相距 0.5 m 的 1,2 号传感器的平均时差为 0.001 44 s,故实验室环境下的声速为 $347.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

为了验证系统在任意方位的定位效果(见图 9),用 MATLAB 中的 round 函数在空间中随机生成 10 个随机测试点,测试点坐标与定位坐标均列于表 2 中。

表 2 定位试验结果

编号	测试点坐标	定位坐标	相对误差/%
1 号	(1.5,0,1)	(1.42,0.02,0.90)	7.19
2 号	(2,0,0)	(1.62, 0.06, -0.03)	19.29
3 号	(2.5,1,0.8)	(2.44,0.98,0.77)	2.49
4 号	(1,0.8,1)	(1.26 ,0.90,1.06)	17.54
5 号	(2,1.5,2.5)	(2.29,1.80, 2.96)	17.57
6 号	(0.6,1.3,1.5)	(0.47,1.10,1.28)	15.65
7 号	(0,0.2,1)	(0.05,0.16,0.98)	6.58
8 号	(0,0.8,2)	(-0.09,0.57,1.66)	19.51
9 号	(0.95,0,1.5)	(0.91,0.02,1.54)	3.38
10 号	(1.5,0,3)	(1.39,-0.09,2.76)	8.32

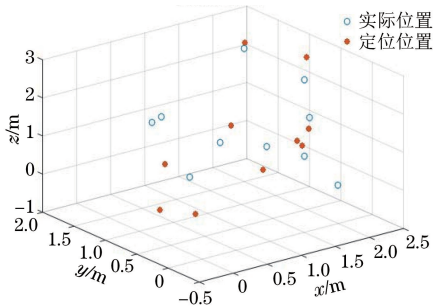


图 9 定位结果三维图示

定位试验结果表明,系统可以识别各个位置的发声射源并进行定位,无定位盲区。系统在(2,0,0),(2,1.5,2.5)这两个位置的定位绝对误差在 30~50 cm,有所偏离。但在其他测点,定位绝对误差在 10 cm 左右。定位平均相对误差为 11.75%,能满足工业测试要求。

5 结语

研制的便携式声源定位系统是一种集机械设计技术、数字信号处理技术、阵列信号处理技术为一体的被动式声源检测与定位装置。该设备采用了有别于其他装置的硬件设计与信号处理手段。系统可识别声频率范围为 20 Hz~20 kHz,总重量为 14.5 kg,能耗为 500 W,平均定位误差为 11.75%。经过实践证明,该系统具有便携性好、成本较低、运行可靠、功能完善的特点。该系统适用于压力管道的泄漏点检测、火炮落点位置识别及建筑的声环境测试。所述系统软件的设计方案简洁、层次清晰,基于实践经验提出的关键参数设置具有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 姜根山.锅炉管道泄漏声行为特性研究[D]. 保定:华北电力大学,2006:11-12.

[2] 李孟源.声发射检测及信号处理[M]. 北京:科学出版社,2010.

[3] 沈功田,耿荣生,刘时风.连续声发射信号的源定位技术[J].无损检测,2002,24(4): 166-167.

[4] 张炳文,郑坚,熊超.周期运动声源的双阵列定位[J].国防科技大学学报,2017,39(1):174-181.

[5] 柯炜,张铭,张铁成.一种利用分布式传感器阵列的声源三维定位方法[J].声学学报,2017,42(3): 361-368.

[6] 姚欢,朱梦尧,朱晓强.基于时延估计的麦克风阵列一致性分析[J].复旦学报(自然科学版),2017,56(2): 172-179.