

# 基于交流电磁场的支管角焊缝表面缺陷检测系统

项小强<sup>1</sup>, 赵 岩<sup>1</sup>, 聂向晖<sup>2</sup>, 王长江<sup>1</sup>, 杨周瑾<sup>2</sup>

(1. 国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450; 2. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安 710077)

**摘 要:** 基于交流电磁场检测(ACFM)技术, 开发了一套支管角焊缝表面缺陷检测系统。设计了包含ACFM探头和便携式机箱的硬件检测系统, 针对检测信号的特点开发了信号平滑滤波算法, 提高了信号的信噪比, 并基于LabVIEW平台编写了集信号采集、信号处理和信号显示为一体的检测软件, 最后形成一套完整的交流电磁场支管角焊缝表面缺陷检测系统, 并采用该系统对Q345材料角焊缝试件进行检测。试验结果表明, 所设计的交流电磁场缺陷检测系统能实现支管角焊缝表面缺陷信号的有效降噪和准确识别。

**关键词:** 交流电磁场检测; 支管角焊缝; 表面缺陷; 检测探头; 平滑滤波

中图分类号: TP274; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)08-0077-06

## Branch pipe fillet weld surface defect detection system based on alternating current field

XIANG Xiaoqiang<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>, NIE Xianghui<sup>2</sup>, WANG Changjiang<sup>1</sup>, YANG Zhoujin<sup>2</sup>

(1. PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. CNPC Tubular Goods Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A surface defect detection system for branch pipe fillet welds was developed based on alternating current field detection (ACFM) technology. A hardware detection system including ACFM probe and portable chassis was designed, and a signal smoothing filtering algorithm was developed based on the characteristics of the detection signal to improve the signal-to-noise ratio. Based on LabVIEW software, a detection software was developed to integrate signal acquisition, signal processing, and signal display. Finally, a complete AC electromagnetic field branch corner weld surface defect detection system was formed, and the Q345 material corner weld specimen was tested using this equipment. The experimental results showed that the proposed alternating current field defect detection system can effectively reduce noise and accurately identify surface defect signals of branch pipe corner welds.

**Key words:** alternating current field measurement; branch pipe fillet weld; surface defect; detection probe; smoothing filtering

支管角焊缝是压力容器设备及管道系统中常见的连接结构, 特别是在工艺管道中, 支管角焊缝是各种传感器套管及支管与主管间的主要连接形式。与对接焊缝相比, 支管角焊缝接头结构和坡口形状较为复杂, 给焊接及后续的检测带来了一定的困难。如超声检测中存在探头耦合不良、声束难以有效覆

盖焊缝全截面的问题; 射线检测存在透照方向受限、胶片与焊缝难以紧密贴合、影像畸变严重等问题。与对接焊缝类似, 支管角焊缝焊接缺陷包括裂纹、气孔、夹杂、未熔合、未焊透等, 相对于内部缺陷, 支管角焊缝表面缺陷, 特别是裂纹类线性缺陷更容易形成应力集中, 引起焊缝开裂, 影响设备安全<sup>[1-2]</sup>。此外, 在管道及设备运行过程中, 受振动、应力集中、压力及载荷波动的影响, 支管角焊缝往往成为开裂失效的敏感部位<sup>[3]</sup>。

常见的焊缝缺陷无损检测技术有超声检测、涡

收稿日期: 2023-12-25

作者简介: 项小强(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事管道完整性管理技术的研究工作

通信作者: 聂向晖, niexh@cnpc.com.cn

流检测、射线检测等。超声检测(UT)技术利用缺陷位置的反射波来确定缺陷的位置和大小,对内部缺陷比较敏感,对焊缝表面缺陷检测灵敏度低,且受结构影响存在焊缝扫查盲区<sup>[4-5]</sup>;涡流检测(ET)技术是一种非接触式的电磁检测技术,通过测量缺陷引起的线圈阻抗变化来识别缺陷<sup>[6-7]</sup>,但焊缝表面凹凸不平,检测结果受提离效应的影响大;射线检测(RT)技术利用射线在缺陷位置和非缺陷位置的衰减差异来检测缺陷<sup>[8-9]</sup>,然而射线检测成本高,周期长,而且对检测人员的身体有损害。交流电磁场检测(ACFM)技术是一种电磁无损检测技术,能检测导电金属的表面及近表面缺陷,具有非接触测量、不需要耦合剂、对提离不敏感等优势,已在石油管道、海洋平台和轨道交通等领域得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。

针对支管角焊缝的表面检测需求,基于交流电磁场检测技术,设计了ACFM检测探头和便携式机箱,开发了信号平滑滤波算法及检测软件,形成了一套交流电磁场角焊缝表面缺陷检测系统,并对角焊缝试件进行检测以验证系统的有效性。

## 1 检测原理

ACFM技术是基于电磁感应原理进行检测的,其技术原理如图1所示,在激励线圈中加载一定频率的正弦交流电,当线圈靠近试件时,试件表面会产生感应电流,试件表面不存在裂纹时,感应电流均匀分布,存在裂纹时,由于空气和试件的电导率不同,电流沿着裂纹的两端和底部绕过,会使得 $B_x$ ( $x$ 方向磁场)信号出现一个波谷, $B_z$ ( $z$ 方向磁场)信号出现两个正负交替的波峰, $B_x$ 信号波谷对应裂纹的最深处(可用于裂纹深度的评估), $B_z$ 信号的两个波峰对应裂纹的两个端点(可用于裂纹长度的评估)<sup>[13-14]</sup>。

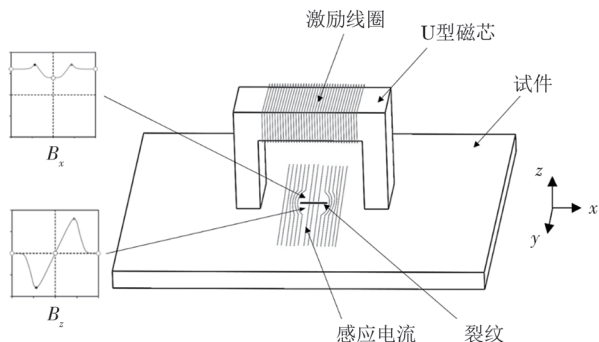


图1 ACFM检测技术原理示意

## 2 硬件系统设计

### 2.1 检测探头

检测探头作为检测系统的前端,主要用于在试件表面产生均匀的感应磁场并采集畸变的磁场信号。所设计的探头结构如图2所示,探头由激励模块、信号处理模块、TMR(隧道磁阻技术)传感器、壳体、压盖等组成。其中,激励模块包括U型磁芯和载流线圈,线圈均匀缠绕在U型磁芯上,在载流线圈上加载频率为1 kHz的正弦交流电,根据电磁感应原理,试件表面会产生均匀的感应电流,当缺陷存在时电流发生扰动,导致缺陷上方的磁场发生畸变,TMR传感器用于拾取畸变的磁场信号,传感器输出的信号往往十分微弱,且含有噪声。信号处理模块则对信号进行放大和滤波处理,从而提高信号的信噪比。为了降低提离对信号的衰减,将TMR传感器放置于探头内部的正下方,所有模块连接后置于壳体内部,通过螺钉和压盖固定。

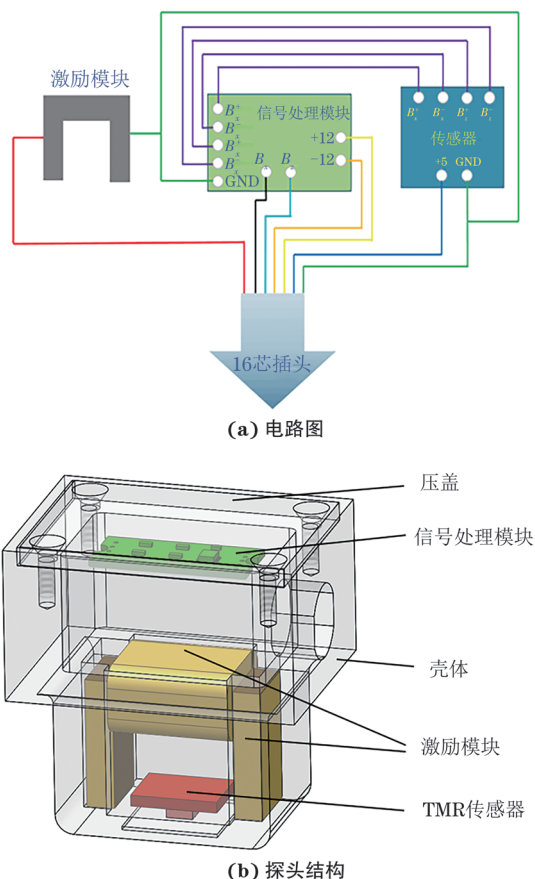


图2 ACFM检测探头结构示意图

### 2.2 便携式机箱

便携式机箱由电源模块、信号发生器、功率放大器、信号调理模块、NI-6361型采集卡等组成,便携

式机箱结构框图如图3所示。电源模块包括锂电池和电源转换模块, 锂电池提供+12 V电压, 经电源转换模块转换后输出为±12 V和+5 V电压, 为机箱的各个模块供电; 信号发生器输出频率为1 kHz, 幅值为1 V的正弦交流信号, 经功率放大器放大后加载在检测探头内部的载流线圈上, 然后TMR传感器拾取畸变磁场信号, 拾取的信号首先经过信号调理模块进行放大和滤波处理, 然后通过NI-6361型采集卡进行A/D(模/数)转换, 最后传输至计算机上的LabVIEW平台进行处理和显示。

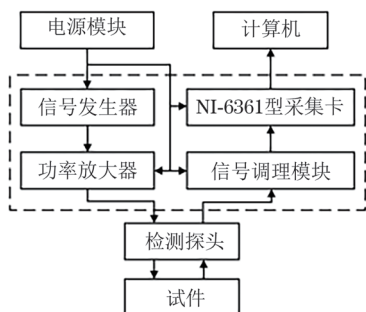


图3 便携式机箱结构框图

### 3 软件系统设计

#### 3.1 平滑滤波算法

在沿角焊缝表面扫描过程中, 由于焊缝表面不平整, 探头容易发生抖动, 传感器拾取的特征信号中往往存在一定的噪声, 不利于缺陷的准确识别。通常采用逐点均值和巴特沃兹低通滤波等方式消除噪声信号的干扰<sup>[15]</sup>, 逐点均值滤波计算简单, 能快速地使曲线变得光滑, 但对噪声信号只能削弱而不能消除, 其采用多个数求平均值的计算方式, 在削弱噪声的同时, 也会削弱缺陷信号的幅值, 对于交流电磁场检测技术而言, 特征信号的峰值是量化缺陷的关键特征, 因此, 采用逐点均值滤波会影响缺陷量化的精度。尽管巴特沃兹低通滤波器具有最平滑的滤波特性, 选择合适的截止频率、阶数等参数能达到更好的滤波效果, 但探头检测信号中噪声比较复杂, 由原始信号的频谱图中无法获得准确的截止频率, 很难从特征信号中完全分离出噪声。笔者提出一种基于峰值检测的信号平滑滤波算法, 该算法在消除噪声的同时, 能保证特征信号的幅值不衰减。

具体算法(其流程图见图4)步骤如下。

##### (1) 步骤一

获得传感器拾取的原始特征信号 $B$ , 对特征信号 $B$ 进行波谷检测, 若某个位置的信号值( $B_i$ )同时

小于前后的信号值( $B_{i+1}, B_{i-1}$ ), 则该位置为一个波谷点, 然后输出所有波谷的集合 $W$ 。

##### (2) 步骤二

寻找每个波谷的起始位置和终止位置, 若某位置的前一个值 $B_i$ 小于该位置的值, 则该位置为起始位置, 若某位置的后一个值 $B_j$ 小于该位置的值, 则该位置为终止位置, 依次得到起始位置的集合 $W_l$ 和终止位置的集合 $W_r$ , 进一步得到起始深度的集合 $D_l$ 和终止深度的集合 $D_r$ , 取最大值得到波谷深度的集合 $D$ 。

##### (3) 步骤三

设定合适的阈值 $N$ , 若波谷深度 $D$ 不大于 $N$ , 则判定为噪声信号, 在起始位置和终止位置之间进行3次样条插值, 3次样条插值是最常用的插值方法, 其收敛速度快, 稳定性好, 同时能保证曲线的光滑; 若波谷深度 $D$ 大于 $N$ , 则判定为缺陷信号, 保留该波谷的信息, 输出信号 $B_{i0}$ 。

##### (4) 步骤四

按照相同的步骤, 对原始信号进行波峰检测, 输出信号 $B_2$ , 计算信号 $B_1$ 和 $B_2$ 的平均值, 得到最终的滤波信号 $B_{f0}$ 。

#### 3.2 算法验证

为了对比基于峰值检测的平滑滤波算法和其他滤波方法的滤波效果, 利用探头获取角焊缝表面的一组原始特征信号, 其结果如图5所示, 分别利用平滑滤波算法、10点均值滤波和8阶巴特沃兹低通滤波对原始特征信号进行滤波, 得到滤波后的信号如图6所示。

由图6可知, 基于峰值检测的信号平滑滤波算法既保证了信号的平滑, 也保留了信号的峰值信息, 在不影响缺陷量化精度的情况下, 提高了信号的信噪比, 消除了噪声信号的干扰, 有利于缺陷的准确识别。逐点均值滤波整体上削弱了噪声的幅值, 使信号变得较为光滑, 但同时也衰减了缺陷信号的幅值, 不利于缺陷的量化。巴特沃兹低通滤波基本保留了缺陷信号的峰值信息, 但曲线仍然存在较小的噪声。可见, 基于峰值检测的信号平滑滤波算法在不衰减缺陷信号的同时能够很好地消除噪声干扰。

#### 3.3 软件设计

##### 3.3.1 软件功能及界面设计

LabVIEW是一种图形化编程语言, 在数据采集和信号处理方面有着显著的优势, 编程简单, 方便用户开发和维护<sup>[16]</sup>。笔者基于LabVIEW平台开发了一套交流电磁场角焊缝表面缺陷检测软件, 以实现缺陷

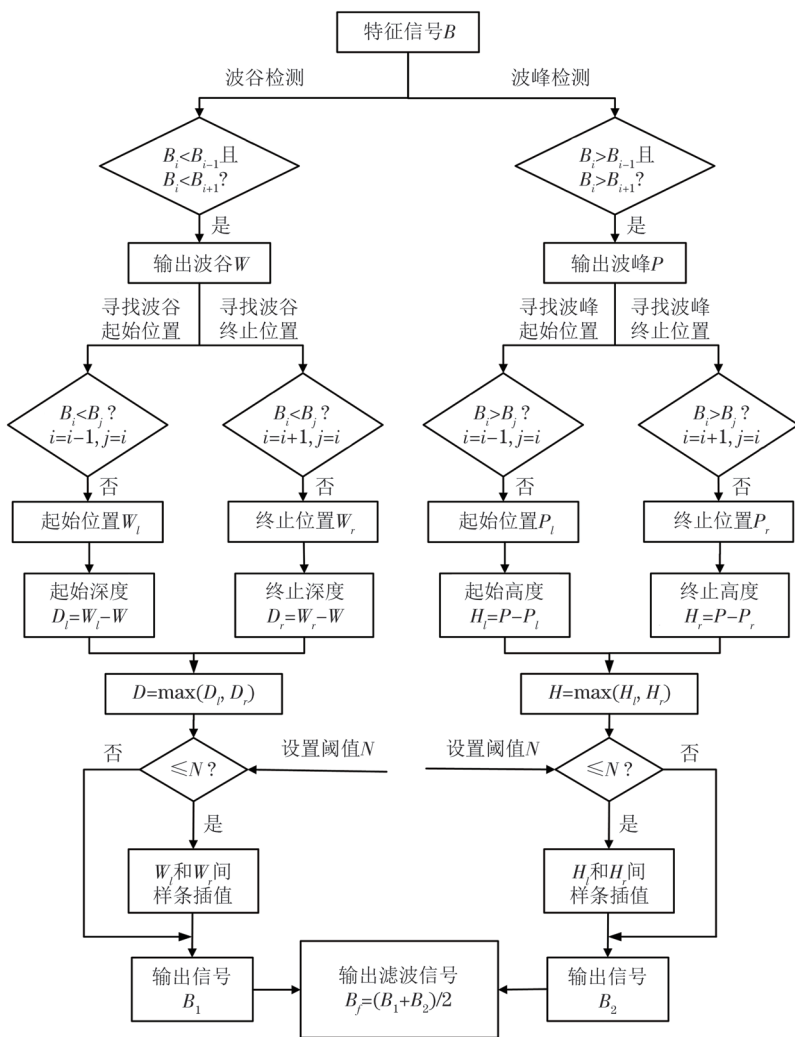


图4 平滑滤波算法流程图

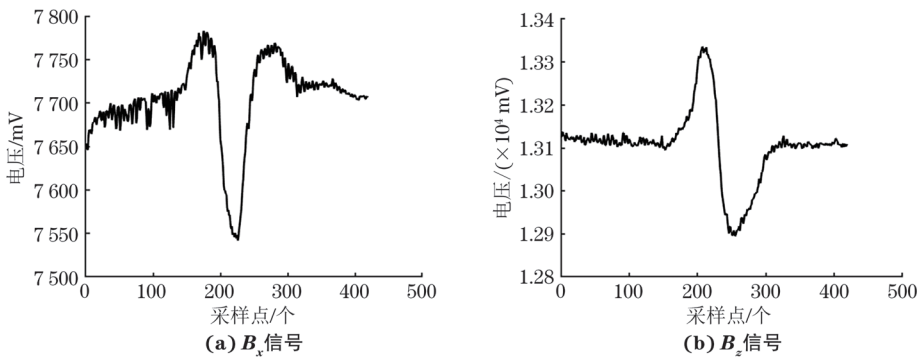


图5 角焊缝表面原始特征信号曲线

特征信号的在线显示和准确识别。软件功能框图如图7所示, 其可实现信号采集、信号处理和信号显示。

该软件采用图形和按钮的人机交互界面, 操作简单, 能够直观地显示特征信号, 有助于检测人员观察信号畸变区域并判定缺陷。界面设置4个布尔控件, 分别控制开始采集、停止采集、清空数据和保存图像, 整个界面主要显示滤波前以及滤波后的 $B_x$ 和 $B_z$ 特征信号。

### 3.3.2 程序设计

交流电磁场检测软件程序设计时, 利用LabVIEW平台自带的数据采集(DAQ)模块, 与硬件采集卡建立数据连接, 配置采集参数即可实现信号的采集过程。信号采集的目的是获取 $B_x$ 特征信号和 $B_z$ 特征信号, 为了保证信号在采集过程中不失真, 采样率要满足采样定理, 即: 采样频率应不小于有效



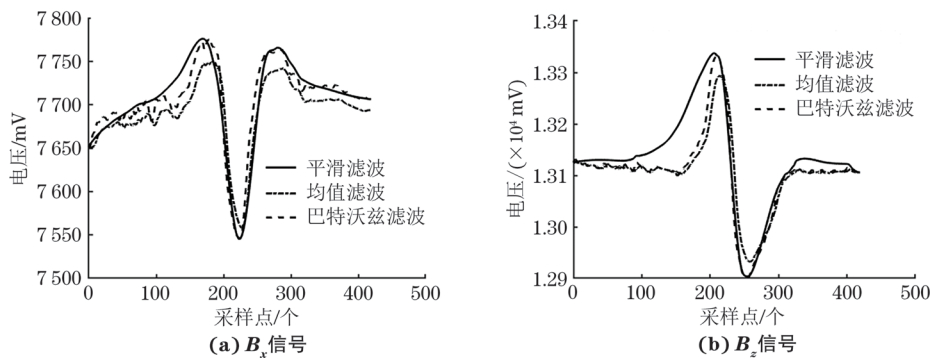


图6 信号滤波后的角焊缝表面信号曲线

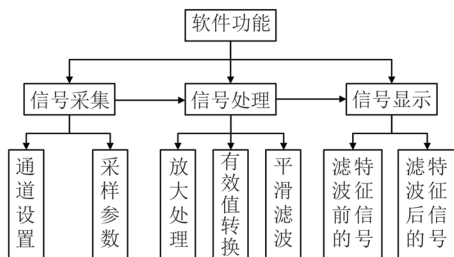


图7 交流电磁场检测软件功能框图

信号最高频率的两倍。采样率越高, 信号幅值失真越小, 其取值通常大于信号频率的10倍, 由于加载在探头内部线圈上的激励信号频率为1 kHz, 所以设置采样率为10 kHz, 采样数为2 000。

采集到的信号是一个二维数组, 由于读取的信号幅值比较低而且含有噪声干扰信号, 首先对信号进行放大处理, 乘以增益倍数5 000, 考虑到采集到的信号和激励信号是同频的正弦交流信号, 很难直接观察到信号的畸变区域, 因此, 对采集的原始信号

进行有效值转换, 将交流信号变为直流信号, 有利于直观地识别缺陷特征。为了提高信号的信噪比, 消除特征信号中的噪声, 采用基于峰值检测的信号平滑滤波算法对特征信号进行去噪。

#### 4 现场检测试验及其结果

完整的交流电磁场支管角焊缝检测系统由便携式机箱、检测探头、角焊缝试件、计算机等组成, 便携式机箱一侧通过16芯雷莫线与探头连接, 另一侧通过USB线与计算机建立连接, 实现检测探头、便携式机箱与计算机之间的信号传输。角焊缝试件材料为Q345钢, 设置有2个平行于焊缝的人工裂纹(记为1#裂纹, 2#裂纹, 其宽均为0.8 mm), 其中1#裂纹长9 mm, 深1.5 mm; 2#裂纹长6 mm, 深1 mm。利用探头沿着试件焊缝表面进行扫查, 对1#和2#裂纹进行检测, 并在LabVIEW软件中实时显示, 其结果如图8所示。

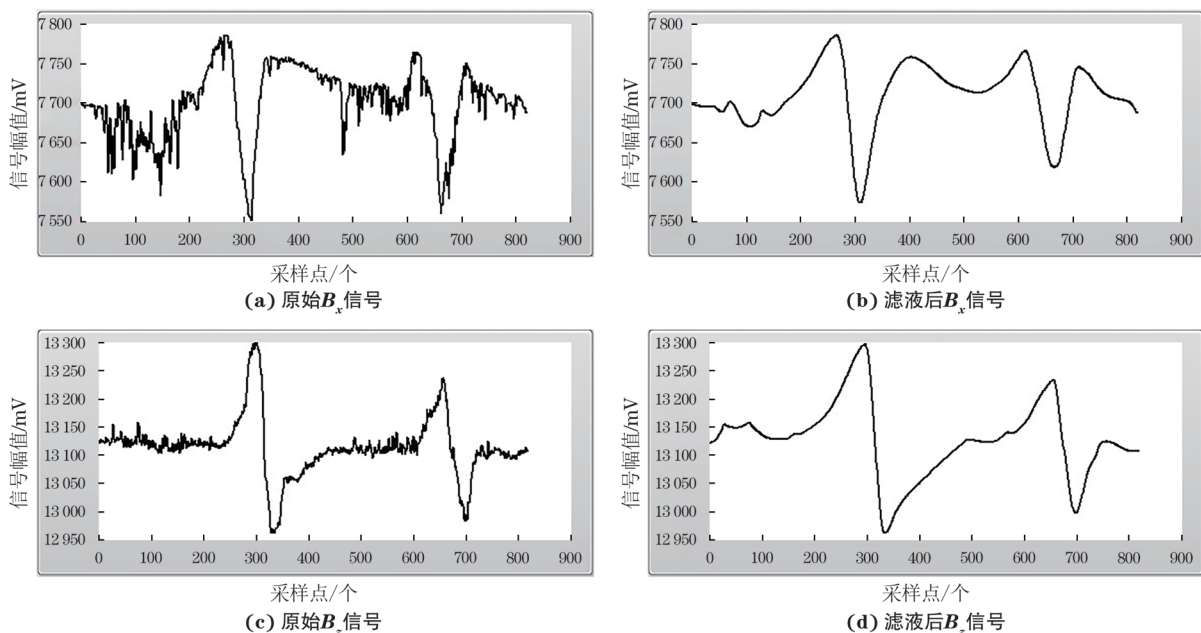


图8 1#,2# 裂纹缺陷的交流电磁场检测结果

从图8可以看出,角焊缝表面获取的特征信号存在较多的干扰,既有检测过程中引入的高频噪声,也有焊缝表面凹凸不平引起的抖动信号,经过平滑滤波算法处理后基本可以消除噪声,降低抖动信号的影响,有利于缺陷的准确识别。在有缺陷的位置, $B_x$ 信号出现一个波谷, $B_z$ 信号出现一对正负交替的波峰,符合交流电磁场检测的基本原理,可见,所设计的交流电磁场支管角焊缝表面缺陷检测系统能实现角焊缝表面缺陷的准确识别,提出的基于峰值检测的信号平滑滤波算法能够消除噪声的干扰。

## 5 结语

基于交流电磁场检测技术,开发了一套支管角焊缝表面缺陷检测系统。系统采用检测探头拾取焊缝表面的畸变磁场信号,其便携式机箱能实现信号的预处理和采集,提出的平滑滤波算法可以对信号进行有效去噪,提高缺陷信号的信噪比。

采用开发的设备对Q345钢材的支管角焊缝试件进行检测,结果表明,该系统能实现角焊缝表面缺陷信号的有效降噪和准确识别。

## 参考文献:

- [1] 周敏惠, 於美甫. 焊接缺陷与对策[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [2] 郭小红, 王春礼, 张国伟. 某超临界锅炉水冷壁上集箱管接头裂纹分析[J]. 锅炉制造, 2012(5): 47-49.
- [3] 姜磊, 罗维祺, 黄浩, 等. 超临界锅炉四大管道管座角焊缝裂纹分析及预防[J]. 特种设备安全技术, 2017(4): 7-9.
- [4] 宋晓峰, 朱爱希, 张迪, 等. 钢结构H型钢焊缝超声相控阵自动检测系统的设计及应用[J]. 焊接技术, 2021, 50(3): 70-73.
- [5] CHEN Y, MA H W, DONG M. Automatic classification of welding defects from ultrasonic signals using an SVM-based RBF neural network approach[J]. Insight-Non-destructive Testing and Condition Monitoring, 2018, 60(4): 194-199.
- [6] 陈涛, 肖小齐, 张赛, 等. 一种用于焊缝缺陷检测的旋转涡流探头设计[J]. 传感技术学报, 2020, 33(7): 945-949.
- [7] DMITRIEV S F, KATASONOV A O, MALIKOV V N, et al. Eddy-current measuring system for analysis of alloy defects and weld seams[J]. Russian Engineering Research, 2016, 36(8): 626-629.
- [8] BOARETTO N, CENTENO T M. Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI[J]. NDT & E International, 2017, 86: 7-13.
- [9] 郝斌. 在用压力容器、压力管道焊缝射线检测技术的优化[J]. 焊接技术, 2016, 45(8): 90-92.
- [10] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. A feed-through ACFM probe with sensor array for pipe string cracks inspection[J]. NDT & E International, 2014, 67: 17-23.
- [11] 葛运春, 张翼, 冷建成, 等. 海洋平台钻机底座焊缝的交流电磁场检测[J]. 无损检测, 2015, 37(7): 77-80, 88.
- [12] PAPAELIAS M P, LUGG M C, ROBERTS C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT & E International, 2009, 42(4): 328-335.
- [13] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2007.
- [14] 康中尉, 罗飞路, 陈棣湘. 交变磁场测量的缺陷识别模型[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 123-126, 163.
- [15] 李文艳, 李伟, 陈国明. 交变磁场测量系统的设计及其微弱信号的检测方法[J]. 无损检测, 2010, 32(12): 977-980.
- [16] 王仁荣, 赵力伟, 郑劲豹, 等. 基于LABVIEW的焊缝表面缺陷智能检测系统研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(11): 54-57.