

同源时钟信号的平衡电磁管道裂纹检测系统研究*

郑文学¹ 李佳音² 潘振榕¹ 刘斌¹ 张智²

(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学人工智能学院 沈阳 110870)

摘要: 由于管道内环境复杂、裂纹尺寸微小, 裂纹检测信号信噪比低。针对管道内外壁裂纹缺陷的高信噪比检测问题, 提出激励与参考信号同时钟源的平衡电磁技术裂纹检测方法。阐述了平衡电磁技术管道内外壁裂纹缺陷的检测原理, 利用理论与数值仿真分析了激励与接收信号间频差噪声的影响, 开发了基于现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 数字正交解调的平衡电磁裂纹检测系统, 完成了激励与参考信号相同时钟源的软件设计。通过实验验证了该裂纹检测系统的检测能力, 结果表明, 该检测系统可以实现 1~7 mm 表面裂纹及 1~4 mm 埋藏裂纹的检测; 表面裂纹检测信号呈单峰单谷特征, 埋藏裂纹检测信号呈双峰特征。管道现场裂纹检测牵拉实验表明, 该裂纹检测系统功耗小于 1.1 W, 对表面裂纹检测信噪比大于 41.9 dB, 对埋藏裂纹检测信噪比大于 36 dB, 该方法适用于管道内外壁裂纹缺陷的在线检测。

关键词: 同源时钟; 平衡电磁; 裂纹检测; 管道内检测; 信噪比

中图分类号: TH878; TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on balanced field electromagnetic pipeline crack detection system based on Synchronous clock signals

Zheng Wenxue¹ Li Jiayin² Pan Zhenrong¹ Liu Bin¹ Zhang Zhi²

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. School of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Due to the complex internal environment of pipelines and the minute dimensions of cracks, crack detection signals exhibit a low signal-to-noise ratio. To address the challenge of high-SNR detection for crack defects on both inner and outer pipeline walls, a balanced field electromagnetic crack detection method employing simultaneous clock sources for excitation and reference signals is proposed. The detection principle of balanced field electromagnetic technology for internal and external wall cracks in pipelines is elaborated. The influence of frequency difference noise between excitation and reception signals is analysed through theoretical and numerical simulations. A balanced field electromagnetic crack detection system based on FPGA digital orthogonal demodulation is developed, with software design completed for synchronising excitation and reference signals. Experimental validation confirms the system's detection capability, demonstrating its ability to detect surface cracks ranging from 1 to 7 mm and buried cracks from 1 to 4 mm. Surface crack detection signals exhibit a single peak and valley characteristic, while buried crack signals display a double peak characteristic. Field crack detection pulling tests on pipelines demonstrated that the system consumes less than 1.1 W of power, achieving a signal-to-noise ratio exceeding 41.9 dB for surface crack detection and over 36 dB for buried crack detection. This method is suitable for inline inspection of crack defects on both the inner and outer walls of pipelines.

Keywords: synchronous clock; balanced field electromagnetic; crack detection; pipeline inspection; signal to noise ratio

0 引言

管道是现代工业与民生的生命线,全球约 70% 的原油、天然气通过管道输送。作为油气资源输送的核心设施,管道的结构完整性直接关系到环境与能源安全。但在管道长期服役过程中,因腐蚀、应力疲劳、土体移动等因素易产生裂纹缺陷,裂纹发展迅速,是导致管道失效的主要诱因之一^[1-2]。管道一旦断裂,将造成巨大经济损失与环境灾难,因此,管道裂纹的定期检测对防控管道失效风险、保障能源安全至关重要。

管道内检测技术是管道缺陷在线检测的首选方式^[3],领域内应用最为普遍的漏磁检测技术常用于检测表面及埋藏的体积缺陷,对裂纹这种线形缺陷难以实现有效检测^[4-5]。超声检测技术对内部裂纹和壁厚变化较为敏感^[6-7],检测灵敏度较高,但是需耦合剂接触表面且很难适用于输气管道^[8-9]。电磁超声技术虽无需耦合剂但仅对特定方向裂纹敏感^[10]。涡流检测技术也是一种快速、非接触的裂纹检测技术,但其受到提离效应影响,检测信号在一定基值上变化,一定程度限制了对裂纹的检测灵敏度^[11-12]。平衡电磁检测技术在实际应用中被证明对裂纹缺陷检测具有较好的适用性,该技术检测方向任意,并且不受提离效应影响具有较高灵敏度^[13-14]。然而,裂纹检测信号本就微弱,管道环境复杂且背景噪声丰富,除灵敏度外对检测技术的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)又提出了极高要求。

平衡电磁技术作为一种交流电磁检测方法,其信号处理方式依赖激励信号与接收信号的严格同步,常采用的方式为正交解调^[15]。在实际系统中,解调端参考信号由驱动激励线圈的信号源分频得到,因器件本身误差及环境波动等因素,激励与参考信号会存在微小频率差异,从而产生缓慢变化的相位漂移,在解调信号中形成频差噪声^[16-17]。该噪声的频带与平衡电磁裂纹检测信号频带高度重叠,严重干扰了裂纹信号的准确检出与辨识^[18]。传统的带通滤波器数字信号处理方法,在滤除与信号频带紧邻的频差噪声时,会不可避免地破坏有用的裂纹信号^[19-20]。频率跟踪或基于相关算法的盲源分离技术等,对这种频率差异极小的噪声处理效果有限,并且计算复杂度高,难以满足实时内检测系统的需求^[21-22]。因此,从硬件系统角度去除频差噪声对提升平衡电磁技术的裂纹检测能力具有重要意义。

针对以上问题,本文提出一种激励和接收同频的平衡电磁管道裂纹检测系统,分析了频差噪声的影响,明确裂纹检测系统的设计原则,提出了同源时钟抑制频差噪声的方法,并开发了基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的平衡电磁裂纹检测系

统。实验结果表明,该检测系统可以实现管道表面及埋藏裂纹的高信噪比检测,对大于趋肤深度的裂纹有一定的检测能力。

1 平衡电磁技术工作原理

分析了平衡电磁技术的检测结构,根据其收发分离的特点结合正交解调的工作原理,分析了平衡电磁技术检测信号的产生与处理过程,为频差噪声的特性分析提供基础。

1.1 平衡电磁技术检测原理

平衡电磁检测传感器主要由激励和接收两部分组成。其中,内置高磁导率磁芯的接收线圈作为接收结构,激励线圈缠绕在 U 形高导磁铁氧体上,向其通入交变电压提供平衡电磁检测的激励场。检测线圈与激励线圈空间相互正交,且检测线圈位于铁氧体两极靴之间的几何中心位置与被测试件表面平行放置。通电的激励线圈产生的电磁场在试件表面流动,并沿纵深方向传播。传感器结构示意图如图 1 所示。

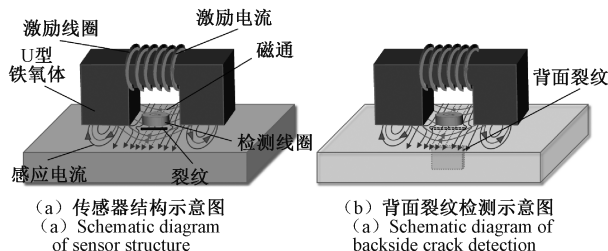


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

根据平衡电磁技术的结构自零性^[14],无缺陷或介质均匀时,激励线圈产生的电磁场并不会使检测线圈产生感应电压。当被测试件存在裂纹时,原本在试件内平行流动的磁通在裂纹边缘泄漏至空气,穿过检测线圈又从裂纹另一边缘流回试件。原本关于检测线圈左右对称的感应电流,在裂纹的两端集中而产生畸变,使得穿入穿出检测线圈的二次磁通不相等,电磁场平衡的状态被破坏,从而产生感应电压。相较于检测表面裂纹电磁场主要集中在材料的表面,如图 1(a) 所示;检测背面裂纹时,根据电磁场传播规律,试件表面的电磁场沿纵深向下传播,到达背面裂纹处并与裂纹发生上述相互作用过程,再传播至检测表面,如图 1(b) 所示。由此实现平衡电磁技术对表面和背面裂纹的检测。

1.2 平衡电磁检测信号产生与处理

根据平衡电磁技术检测原理,检测信号是漏磁通与感应电流共同的作用。设 N 匝检测线圈截面积为 S ,裂

纹产生的漏磁通表示为 B_m , 感应电流 I 产生的磁通密度利用毕奥萨伐尔定律并借助矢量磁位可表示为 B_i 。则根据法拉第电磁感应定律, 由漏磁通与感应电流产生的电压 V_m 与 V_i 分别为:

$$V_m = -N \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_S \mathbf{B}_m \cdot d\mathbf{s} \right) \quad (1)$$

$$V_i = -N \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_S \frac{\mu_0 I \mathbf{e}_\varphi}{2\pi\rho} \cdot d\mathbf{s} \right) \quad (2)$$

式中: \mathbf{e}_φ 为单位矢量; μ_0 为相对磁导率; ρ 为检测线圈正下方取一场点与坐标原点的距离。

由式(1)和(2)构成了平衡电磁技术检测信号。由于该信号为交流信号, 为方便进行特征观测, 并且实现在高噪声环境下精准提取与对微弱裂纹信号检测, 该检测信号采用图2所示的处理过程输出幅值与相位信息。

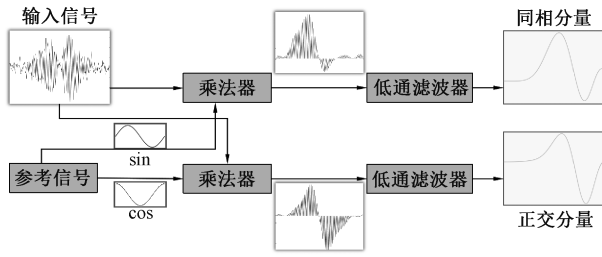


图2 平衡电磁检测信号正交解调过程

Fig. 2 Balanced field electromagnetic detection signal quadrature demodulation process

为便于分析信号处理过程, 将式(1)和(2)表示的感应电压写作简谐形式, 设裂纹检测信号幅值为 A , 角频率为 ω , 相位为 φ , 则检测信号 u_i 为:

$$u_i = V_m + V_i = A \sin(\omega t + \varphi) + n(t) \quad (3)$$

式中: $n(t)$ 为噪声信号。按照图2的处理过程, 经过一对相互正交的参考信号解调后, 噪声信号 $n(t)$ 被滤除, 并且双通道输出同相与正交分量分别表示为:

$$\begin{cases} u_i = \frac{AB}{2} \cos\varphi \\ u_q = \frac{AB}{2} \sin\varphi \end{cases} \quad (4)$$

由同相分量与正交分量可进一步得到平衡电磁技术裂纹检测信号的幅值 A 与相位 φ , 根据前期研究, 信号幅相信息可在同一坐标系下构成幅-相二维图, 用以分辨裂纹与运动干扰^[15]。

$$A = \frac{2\sqrt{u_i^2 + u_q^2}}{B} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{u_q}{u_i}\right) \quad (6)$$

2 频差噪声分析与裂纹检测系统设计

在图2的基础上, 通过数值模拟分析了频差噪声的具体影响, 提出了抑制频差噪声的方法, 并设计了以FPGA为核心的平衡电磁裂纹检测系统。

2.1 频差噪声分析

根据图2的信号处理过程, 平衡电磁检测信号解调时, 理论上参考信号与检测信号完全同频。但实际上往往在解调端参考信号由激励信号源分频得到时, 因器件本身误差及环境波动等因素, 参考信号与检测信号将会存在微小频率差 $\Delta\omega$, 则此时的检测信号 u_j 为:

$$u_j = A \sin[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi] + n(t) \quad (7)$$

经过图2的过程处理后, 双通道输出同相与正交分量变为:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{AB}{2} \cos(\Delta\omega t + \varphi) \\ u_q &= \frac{AB}{2} \sin(\Delta\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 相比原本正交解调后式(4)的输出信号, 极小频差的存在导致输出产生随时间周期变化的正弦信号。该正弦信号降低了裂纹检测信号的信噪比, 影响对裂纹缺陷的判断。为进一步分析频差噪声对检测结果的影响, 利用MATLAB软件分别模拟检测信号在有、无空间电磁噪声情况下, 检测信号与参考信号存在微小频差时, 经图2过程处理的结果如图3所示。其中, 参考信号频率为1000 Hz、初始相位为0。检测信号幅值设置为3 mV, 频率分别设置为980、990、1000、1005、1010 Hz。向检测信号添加1倍高斯白噪声模拟含噪信号。

由图3可知, 在无空间电磁噪声时, 随着检测信号频率与参考信号频率差距的增大, 频差噪声信号的周期变小, 在频差为零的时候, 同相分量与正交分量均为直流, 不存在频差噪声。在含空间电磁噪声环境下, 随着频差的减小, 噪声信号逐渐增强, 由器件分频产生的极小频差会造成较大的频差噪声, 在接收信号与参考信号频率一致时, 由高斯白噪声产生的同相与正交分量噪声较小。因此, 为保证平衡电磁技术具有较高的信噪比, 在裂纹检测系统设计时应保证检测信号与参考信号同频。

2.2 裂纹检测系统设计

根据2.1节的分析, 裂纹检测系统需保证参考信号与检测信号同频, 所设计平衡电磁裂纹检测系统, 采用FPGA内部同一个时钟源构建数字信号处理电路消除频差噪声。裂纹检测系统由FPGA数字信号处理电路、模拟信号处理电路以及传感器3部分组成, 其中, 信号处理电路包含功率放大电路、信号放大电路、模数转换以及数

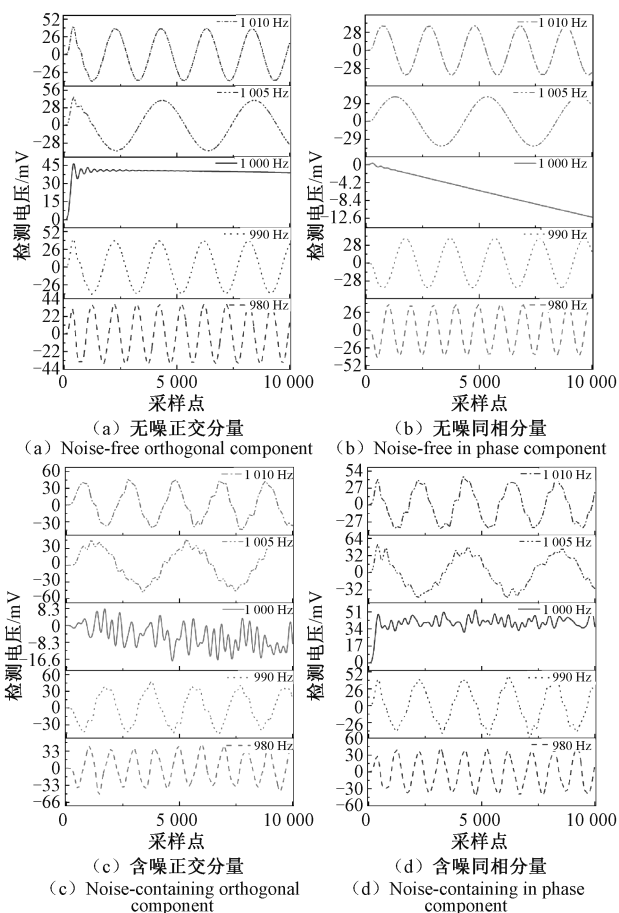
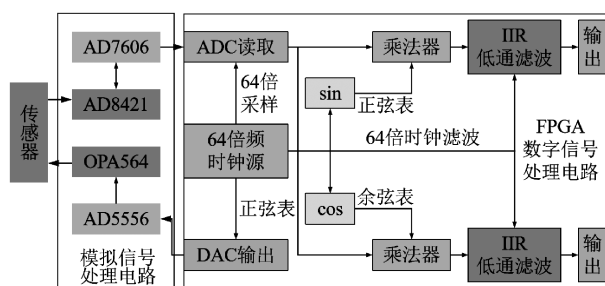


图 3 有无空间电磁噪声时检含频差的检测信号
Fig. 3 Detection signal with frequency difference in the presence or absence of spatial electromagnetic noise

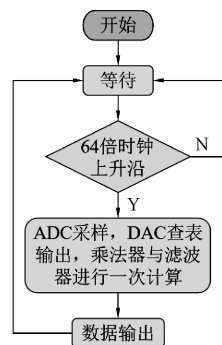
模转换电路,如图 4(a)所示。其中,激励信号、检测信号、参考信号同时钟源处理流程如图 4(b)所示。

图 4 中,平衡电磁技术裂纹检测系统采用定频 1 000 Hz 激励,在 FPGA 内部产生一个 64 kHz 的时钟信号,同时作为数据采集信号、激励信号、参考信号的时钟源。根据每周期 64 个采样点的正弦表,通过 14 位数模转换器 AD5556 依次循环输出频率为 1 000 Hz 的模拟正弦信号。搭建以 OPA564 为核心的功率放大电路,驱动传感器的激励线圈。激励电磁场与缺陷相互作用,形成感应电磁场,被接收线圈敏感到,产生接收电压。采用 AD8421 仪表放大电路放大接收电压,以 AD7606 模数转换电路量化放大后的电压信号。

由于 FPGA 并行计算的特性,每个 64 kHz 时钟的上升沿触发一次同时进行的模数转换、数模转换、参考信号与接收信号的乘法计算,然后将计算后的数据输出到低通滤波器。由于 IIR (infinite impulse response) 滤波器达到相同的幅频特性消耗更少的计算资源,所以选择 IIR 低通滤波器滤除乘积信号的高频分量,实现噪声的消



(a) 裂纹检测系统原理框图
(a) Principle block diagram of crack detection system



(b) 同时钟源信号处理流程
(b) Simultaneous clock source signal processing flow

图 4 平衡电磁裂纹检测系统结构

Fig. 4 Structure of balanced field electromagnetic crack detection system

除,并且提取缺陷的包络信号,可以更直观地观测信号特征。

3 实验验证

实验部分包含实验室检测平台实验以及模拟现场环境的管道牵拉实验,分别验证该检测系统的检测能力和工程实用性。

3.1 检测平台实验

利用第 2 节设计的平衡电磁裂纹检测系统搭建了具有 xyz 3 个方向位移裂纹检测实验平台。其中,平衡电磁传感器固连在 z 轴,在电机带动下做匀速直线运动,以更好地检测钢板裂纹,运动实验平台如图 5 所示。

检测实验平台主要包括伺服电机、直线导轨、双直线滑轨,弹性探头支架、电机控制箱等部分。伺服电机及电机控制箱可以实现高精度速度、位置控制,以便于传感器更精确地检测裂纹缺陷。直线导轨将伺服电机的旋转转换成相应的线速度或者位移,带动传感器运动。双直线滑轨可以带动伺服电机和直线导轨的平移运动,用来选择不同的被测钢板。弹性传感器支架可以使传感器更好的贴合在被测钢板上,并且对被测钢板形成一定压力,提升裂纹检测效果。

为验证开发的裂纹检测系统对频差噪声的抑制特

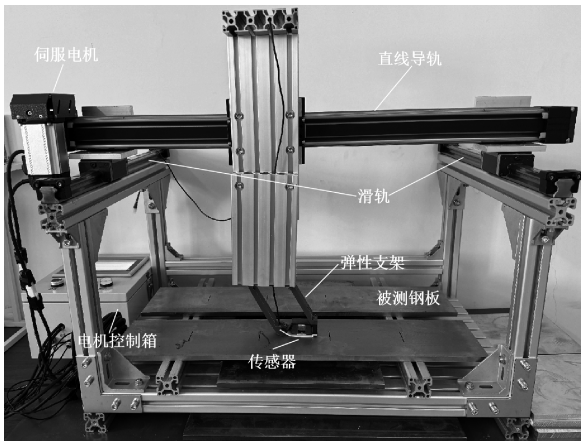


图5 检测实验平台

Fig. 5 Detection experiment platform

点,在两块长为 600 mm、宽为 150 mm、厚度为 8 mm 的钢板上利用电火花加工长 400 mm、宽 0.3 mm、深度分别为 1~7 mm 的人工模拟裂纹缺陷,如图 6 所示。

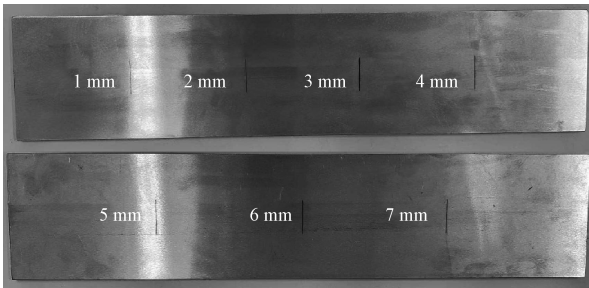


图6 检测样件

Fig. 6 Test sample

利用图 5 搭建的检测实验平台分别对图 6 中 1~7 mm 深的裂纹沿正面垂直方向检测,对 4~7 mm 深的裂纹沿背面垂直方向检测,对应埋藏深度 1~4 mm。按照图 2 的处理过程对检测信号进行同相与正交分量输出,并对检测信号的幅值进行随深度变化的提取与拟合,得到检测信号的结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,无论是正面裂纹还是背面裂纹,其正交分量要略小于同相分量,正面裂纹检测信号的特征为先波峰后波谷,背面裂纹的检测信号特征为双峰单谷。随着正面裂纹深度增加,检测信号的幅值近似线性增加。随着背面裂纹深度增加,即随着埋藏深度的减小,检测信号的幅值近似指数增加。这是由于根据电磁场的传播规律以及 1.1 节的分析,随着电磁场沿纵深方向的传播,场强相对于表面呈指数衰减。平台实验利背面裂纹深度的增加模拟埋藏深度的变化,与该规律相符。

3.2 现场牵拉实验

为了验证该检测系统的适用性,开展现场牵拉实验。

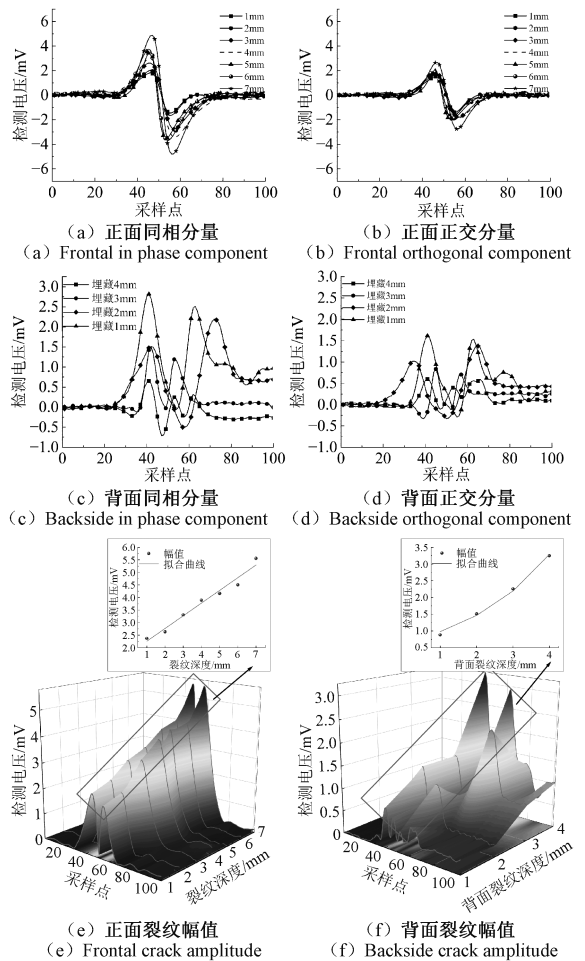


图7 钢板实验裂纹检测信号

Fig. 7 Steel plate experimental crack detection signal

现场牵拉实验采用 12 通道,检测器多通道连接方式如图 8 所示。

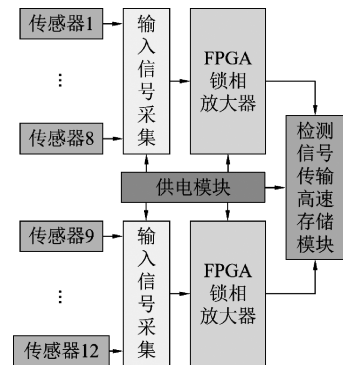


图8 多通道连接

Fig. 8 Multichannel connection

为了同时检测多个位置裂纹缺陷,检测器安装 12 个传感器,其中 1~8 号传感器连接到第 1 个信号处理单元,9~12 号传感器连接到第 2 个信号处理单元。由相同

的供电模块对模拟信号处理单元、FPGA 锁相放大器单元、信号传输与存储模块供电。检测信号传输与存储模块可以将检测信号以数字量的形式实时传输并且存储，以便后续对检测数据进行分析。按照图 8 的连接方式测试多通道检测系统，检测系统如图 9 所示。

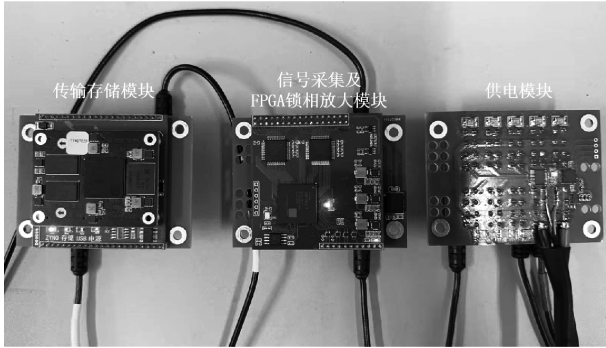


图 9 多通道检测系统

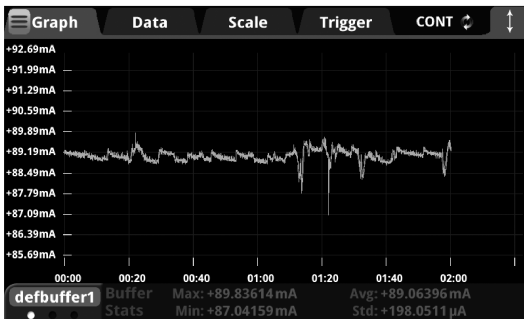
Fig. 9 Multichannel detection system

管道内检测器上搭载多通道检测系统实现裂纹检测。检测器以电池供电，并且检测器携带电池数量有限，为了使检测器可以运行更长时间，这要求检测系统的功耗尽量低。采用 12 V 直流线性电源模拟电池供电情况，在电源回路接入万用表，监测检测系统消耗电流，连接方式如图 10(a) 所示。测试过程为对已经平稳运行的检测系统电流消耗进行 2 min 消耗电流的监测，结果如图 10(b) 所示。



(a) 检测系统功耗检测

(a) Power consumption detection diagram of detection system



(b) 电流消耗测试结果

(b) Current consumption test results

图 10 检测系统功耗测试装置及结果

Fig. 10 Power consumption testing apparatus and results for detection systems

从图 10 可知，在 2 min 的测试时间中，内检测系统消耗电流的平均值为 89.06 mA，结合稳压电源输出的电压值，可以得到检测系统的功耗为 1.07 W。如此说明，开发的裂纹检测系统在保证实现频差噪声有效抑制的同时，具有较低功耗的优势，在管道内检测器这种搭载有限供电单元的环境下可以保证较长时间的运行，这相比于频率跟踪或基于相关算法的在线利用大量计算资源消除频差的技术，更适用于管道内检测的环境。将该多通道检测系统搭载在管道内检测装置上，构成管道裂纹内检测器，如图 11 所示。

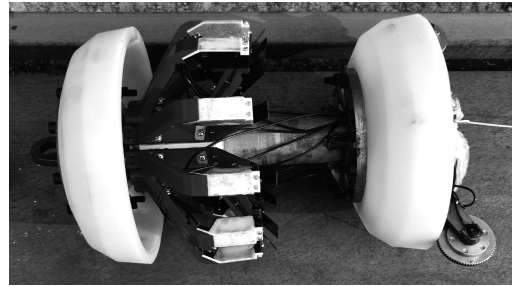


图 11 管道裂纹内检测器

Fig. 11 Pipeline crack inner detector

在直径为 325 mm，壁厚为 8 mm 的检测样管上采用电火花加工预制裂纹，裂纹分别分布在内壁与外壁上，样管如图 12 所示。其中， $C_1 \sim C_7$ 分别是深度为 1~7 mm 的内表面裂纹； $B_1 \sim B_4$ 分别是深度为 1~4 mm 的外壁裂纹，对应裂纹埋藏深度为 1~4 mm。

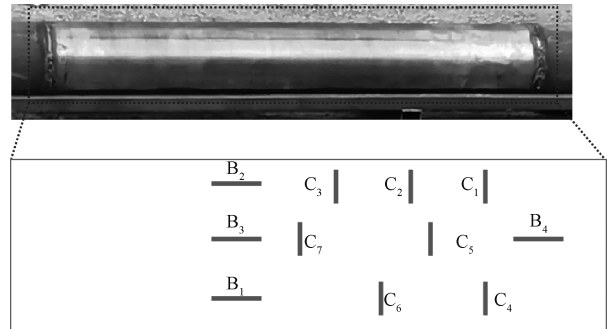


图 12 管道裂纹内检测实验样管及缺陷分布

Fig. 12 Experimental sample tube and defect distribution for internal inspection of pipeline cracks

将管道一周划分为 12 个钟点表示裂纹所在周向位置，牵拉实验采用卷扬机在管道一端牵引管道裂纹内检测器在管道内运行，模拟内检测器在实际应用管线检测作业，得到多通道管道裂纹内检测信号如图 13 所示。其中，为了清晰的分析检测信号信噪比，分别选取内壁裂纹与外壁裂纹幅值最小的 C_1 与 B_1 进行计算，图 13 也计算了 C_1 与 B_1 功率谱密度-频率曲线。

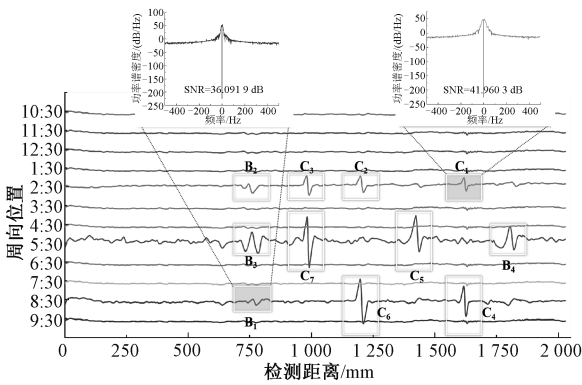


图13 检测信号图

Fig. 13 Detection signal diagram

从图13可知,本文提出的管道裂纹电磁检测系统能够实现正面1~7 mm裂纹的检测,检测信噪比大于41.9603 dB,对埋藏1~4 mm裂纹也可以有效检测,且信噪比大于36.0919 dB。

4 结论

针对管道裂纹检测信噪比低的问题,提出了激励信号、接收信号、参考信号相同时钟源的处理方法,根据频差噪声的分析,开发了基于FPGA的同源时钟平衡电磁裂纹检测系统。通过实验室与牵拉实验验证了方法的有效性与系统的工程性能,具体得出如下结论。

1) 通过对接收与参考信号频率不一致的分析,表明信号源引起的频差噪声是影响埋藏裂纹等具有微小幅值信号的缺陷检出的关键因素;随着频差的减小,频差噪声在增大,频差为0的时候频差噪声消失。

2) 采用同时钟信号源的方法可有效检出与分辨钢板正面与背面裂纹,其中背面裂纹具有双峰单谷特征,不同于正面裂纹的单峰单谷特征。

3) 开发的同时钟源平衡电磁裂纹检测系统可实现埋深4 mm以内的钢板裂纹检测,这个深度已大于同等条件下的钢板趋肤深度,在该渗透能力下埋藏裂纹信噪比达到36.0919 dB。

参考文献

[1] MA C, CHENG X D, XU T Z, et al. Research on local buckling failure range of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164: 107592.

[2] YU J X, SU Y F, YU Y, et al. A novel framework for simulating fatigue crack propagation in X70 pipelines with girth welds; Full-scale testing and phase field method[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2026, 219: 105658.

[3] 杨理践,石萌,耿浩.长输油气管道内检测技术[J]. *沈阳工业大学学报*, 2024, 46(5): 676-684.

YANG L J, SHI M, GENG H. Internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2024, 46(5): 676-684.

[4] WANG Y Q, SONG F, FENG Q S, et al. Basic theory and applications of oil and gas pipeline non-destructive testing methods[J]. *Energies*, 2024, 17(24): 6366.

[5] GAO P F, GENG H, YANG L J, et al. Research on quantification method of ellipsoidal defects based on leakage magnetic detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(9): 14503-14518.

[6] TIAN Y F, PALAEV A G, SHAMMAZOV I A, et al. Non-destructive testing technology for corrosion wall thickness reduction defects in pipelines based on electromagnetic ultrasound[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1432043.

[7] 蔡亮学,董辉,陈飞,等.超声内检测含缺陷管道壁厚确定方法[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(30): 13293-13300.

CAI L X, DONG H, CHEN F, et al. Method for determining wall thickness of pipes containing defect in ultrasonic internal inspection[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(30): 13293-13300.

[8] HAMPSON R, ZHANG D Y, GACHAGAN A, et al. Modelling and characterisation ultrasonic phased array transducers for pipe inspections[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 200: 104808.

[9] 韩传高,王飞,赵阳,等. P91 钢管道受限空间焊缝相控阵超声检测[J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 167-172.

HAN CH G, WANG F, ZHAO Y, et al. Phased array ultrasonic testing of P91 pipe weld in confined space[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 167-172.

[10] TANG Q, GAO B, RU G G, et al. Physical coupling fusion sensing of MFL-EMAT for synchronous surface and internal defects inspection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(14): 16068-16079.

[11] 徐昊,包俊,黄国勇,等.飞机多层金属铆接结构缺陷检测的新型涡流探头仿真设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(5): 178-187.

XU H, BAO J, HUANG G Y, et al. Simulation design of a new eddy current probe for defect detection of aircraft multi-layer metal riveting structure[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(5): 178-187.

[12] 张荣华,宋观惠.一种抑制提高噪声的相位解析电磁无损检测方法[J]. *天津工业大学学报*, 2022, 41(3):

- 62-68.
ZHANG R H, SONG G H. An electromagnetic nondestructive testing method based on phase analysis model to immune lift-off [J]. Journal of Tiangong University, 2022, 41(3): 62-68.
- [13] 杨理践, 郑文学, 李佳音, 等. 基于平衡电磁技术的管道裂纹全角度检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 103-112.
YANG L J, ZHENG W X, LI J Y, et al. Full-angle detection method of pipeline crack based on balanced electromagnetic technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 103-112.
- [14] ZHENG W X, LI J Y, XIAO Y X. Processing methods of the pipeline crack detection signal by a balanced field electromagnetic technique based on phase characteristics[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(4): 044706.
- [15] LI J Y, YANG L J, ZHENG W X, et al. Discriminative method for crack detection signals in balanced-field electromagnetic technique based on amplitude-phase composite figure[J]. Sensors, 2022, 22(18): 7000.
- [16] 张祎, 李明哲, 王童, 等. 空间引力波探测器中的锁臂控制器设计[J]. 光子学报, 2025, 54(2): 78-91.
ZHANG Y, LI M ZH, WANG T, et al. The arm locking controller design for space-based gravitational wave observatories[J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(2): 78-91.
- [17] WANG H, SUN H L, GUO J F, et al. Analysis of the frequency interference in the narrowband active noise control system [J]. IEEE-ACM Transactions on Audio Speech and Language Processing, 2022, 30: 1704-1717.
- [18] ZHENG W X, LI J Y. Multi-channel frequency difference noise analysis and cancellation method for the balanced field electromagnetic pipeline inspection gauge [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(7): 074702.
- [19] 赵博宇, 刘灏, 毕天姝, 等. 增强型三复带通滤波器频率测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8568-8580.
ZHAO B Y, LIU H, BI T SH, et al. Enhanced triple complex bandpass filters method for frequency measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8568-8580.
- [20] 杨浩涵, 乔树山. 一种消除直流失调的自动频率校准低通滤波器[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(1): 85-92.
- YANG H H, QIAO SH SH. Automatic frequency-calibrated low-pass filter with DC offset cancellation[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(1): 85-92.
- [21] 姬娟娟, 崔彦良, 王开云. 基于锁相环的异步电机无速度传感器矢量控制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 307-315.
JI J J, CUI Y L, WANG K Y. Sensorless vector control of induction motors based on phase-locked loop [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 307-315.
- [22] 解元, 邹涛, 孙为军, 等. 面向卷积混叠环境下的盲源分离新方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(5): 1062-1072.
XIE Y, ZOU T, SUN W J, et al. Novel blind source separation method for convolutive mixed environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(5): 1062-1072.

作者简介



郑文学, 2016 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2021 年于沈阳工业获得博士学位, 现为沈阳工业大学副教授, 主要研究方向为电磁无损检测技术、在线检测技术。
E-mail: zh15940011365@sut.edu.cn

Zheng Wenxue received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2016, Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2021, respectively. Now he is an associate professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic non-destructive testing technology and inline inspection technology.



李佳音 (通信作者), 2016 年于长春理工大学获得学士学位, 2023 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为电磁无损检测技术。
E-mail: lijiajin@sut.edu.cn

Li Jiayin (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2016, Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2023, respectively. Now she is a lecturer at Shenyang University of Technology. Her main research interest includes electromagnetic non-destructive testing technology.