

基于 FPGA 的管道缺陷漏磁检测系统设计

李孟垠 康健 辛妍 孙德芝 温海立
北京市燃气集团有限公司，北京，100044

摘要：随着综合地下管廊的快速发展，管道的安全对于保证管廊电力、燃气等运输的安全越来越重要。管廊环境恶劣，管道受到长期腐蚀影响会出现裂纹，如果不及时处理将会导致管道断裂、坍塌，对实验人员安全造成威胁，所以对管道的检测是必要的。漏磁检测（MFL）是一种工程上常用的无损检测方式，针对不同的缺陷形势，鉴于单个传感器检测范围无法全面覆盖样品，于是采用了阵列式传感器进行检测，并基于 FPGA（现场可编程门阵列）设计了一种检测管道缺陷的漏磁系统。相比于传统单片机系统，基于 FPGA 的管道缺陷漏磁信号检测系统灵活性高、开发周期短、能并行处理数据，在进行高速、高效率、多通道采集数据的同时精准控制底层模块，提高了采样、检测速度，能有效检测出管道缺陷，实验结果证明该漏磁检测系统能有效检测出缺陷信号，提高采样效率。

关键词：管道；漏磁；缺陷检测；系统设计

引言

综合管廊是在城市地下建造一个管廊空间，将电力、通信、燃气、供热、给水、排水等等各种工程管线集于一体。城市地下综合管廊建设解决了反复开挖路面、架空线网密集、管线事故频发等问题，有利于保障城市安全、完善城市功能、美化城市景观、促进了城市集约高效和转型发展，提高了城市综合承载能力和城镇化发展质量。由于综合管廊位于地下，包含通信、燃气、供水和电力电缆等多种管道，供电电缆如果产生短路，过载等情况可能造成火灾，燃气管道如果泄露可能产生爆炸事故。管廊中一旦发生此类灾害，如不能及时控制，会对当地的生产和生活造成非常不利的影响，甚至会危及工作人员的人身安全。截至 2021 年 5 月，国内地下综合管廊试点项目已开工建设 787km，建成廊体 260km，完成投资 400 多亿元。作为城市市政地下管线综合体，地下管廊是城市地下“神经网络”，其智慧化管理和运营是建设“智慧城市”的基础，其安全问题至关重要。通过定期对油气管道实施内外检测，及时、准确地发现管道的腐蚀缺陷，采取相应的维修、更换措施，可有效降低腐蚀事故的发生概率。

随着人工智能的发展，管道检测已进入智能识别阶段，城市管廊检测方面的专家学者做出了大量研究：邱秀分、张峰等人提出了一种基于分布式光纤传感技术的油气管道破坏信号检测方法，将短时平均能量与修正过零率标准差联合检测管道破坏信号的方法能够剔除干扰，对人工、机械模拟入侵事件检测准确率超过 90%，大大降低了干扰，可为管道安全运行提供技术保障。王志刚等人基于铁磁性管道与涡流激励，接收线圈构成的耦合式传输结构，利用贝塞尔函数构建了铁磁性管道近场涡流的耦合传输模型，通过对该模型的耦合互感分析，分离出铁磁性管道物理参数对线圈互感的主要因素，为铁磁性管道物理属性的涡流法检测提供了一种方法。孔双庆研究了超声导波技术对长距离管道

进行缺陷检测的数值模拟和实验设计，根据超声导波管道检测的基本原理研发了一套可用于实验室检测的样机系统。姚建军针对油气管道检测过程中泄漏区域及缺陷区域难以准确定位的问题，提出了一种基于多数据融合的油气管道缺陷自动检测方法。田丰设计了一种基于机械臂的管道检测全向机器人，将移动机器人、机械臂、检测探头融于一体，具有路径自主规划、循迹、避障等功能，实现了地下管廊全方位无盲区检测。

在检测过程中由于单个传感器体积小灵敏度一般，难以检测到完整的信号，于是有研究者提出了阵列传感器的使用。文献通过控制两个传感器之间的间距，对其输出信号做差分能够得到更明显的缺陷信号，并对振动干扰有一定的滤波作用。文献改变以往通过采集信号幅值绝对大小识别缺陷的方法，使用多个传感器输出的相对大小来识别缺陷，能有效提高单个缺陷的识别精度。漏磁检测是一种常用的铁磁性中小型管道腐蚀的测量方法。当管道未受到腐蚀时，管道的磁力线将会均匀分布。当管道受到腐蚀或产生缺陷时，腐蚀或缺陷附近的磁导率将会大大降低，磁力线将会发生扭曲变形，并且一部分磁通将会泄漏出管道表面。受到上述研究者启发，本文通过漏磁检测的方式对管道进行检测，设置阵列传感器提高检测精度，并设计了基于 FPGA 的检测系统，通过 FPGA 的并行计算模式提高系统的运算能力。

1 系统设计

1.1 总体设计

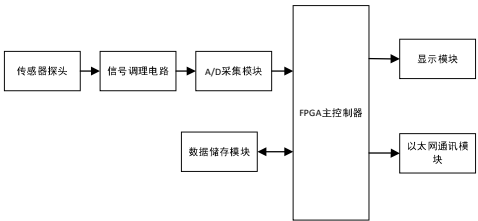


图 1 检测系统总体框架图

图 1 为检测系统的硬件总体框图，检测系统主要由传感器探头、信号调理电路、A/D 采集模块、FPGA 主控制器、显示模块、数据存储模块和以太网通讯模块构成。待系统上电后，FPGA 根据实际线路上检测需求，控制信号调理电路中放大电路的放大倍数等参数，漏磁信号由传感器探头采集并进入调理电路进行滤波、放大后由 A/D 采集模块接收，A/D 采集模块对经过调理电路的漏磁场信号进行采样、保持和量化后，送入 FPGA。FPGA 对 A/D 采集模块送来的数据进行滤波等处理后存到存储模块当中。显示模块可以实时将采集到的漏磁场信号绘制成波形，并在显示屏上显示出来。以太网通讯模块可以将采集到的数据上传到计算机上进行分析。

1.2 探头设计

探头的作用是采集漏磁信号，其具体工作原理如下：给磁化器一定大小的电压，使其周围生成一个感生磁场，磁场通过管道裂纹时会产生泄漏，用霍尔传感器拾取漏磁场并转化为电信号传输给调理电路。

本次设计选用 UGN3503 型号的霍尔传感器，比起传统的特大磁电阻磁场传感器，其拥有体积小、灵敏度高、操作便利等优点。表 1 为此霍尔传感器工作性能表，图 2 为传感器内部原理图。

表 1 UGN3503 参数表

工作电压 /V	灵敏度 /mV/G	测量范围 /G	带宽 /kHz	输出阻抗 / Ω	线性度
4~6	0.75~1.75	± 900	23	50	1% 以内

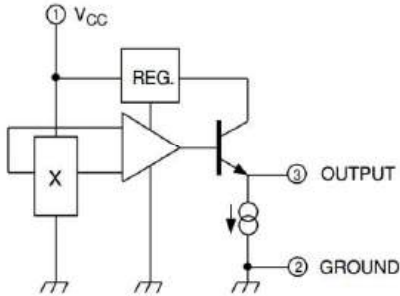


图 2 UGN3503 霍尔传感器内部原理图



图 3 探头内部结构图

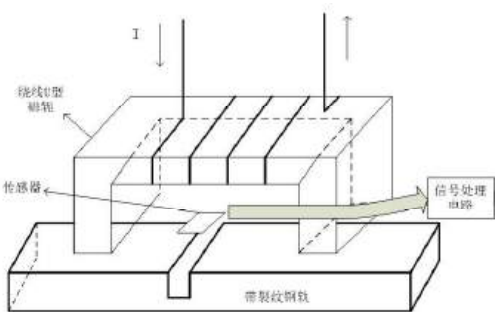


图 4 检测探头结构图

图 4 为检测探头结构原理图，检测探头位于系统的最前端，主要由 U 型磁轭、霍尔传感器、电涡流式位移传感器这三部分组成。漏磁探伤的原理为：U 型磁轭是一种高导磁性的物体，通电线圈产生的感应磁场通过 U 型磁轭进入管道壁，被磁化后的管道壁会有高密度的感应磁场，当有裂纹或其他缺陷时，部分磁感应线就会泄露出来，泄露的磁场由霍尔传感器检测并转化为电信号为后续电路所处理。电涡流式位移传感器用来检测探头和管道表面的距离。探头内部结构如图 3 所示。

1.3 硬件模块设计

由于磁敏传感器输出的直流分量偏大且在实际检测中存在高频振动信号的影响，输出信号不能直接被 A/D 采集模块接收。因此，在 A/D 采集模块之前设计了调理电路模块，对传感器的输出信号进行滤波。调理信号的流程如图 5 所示。

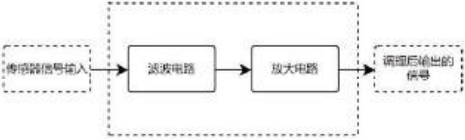


图 5 信号调理流程

如图 6 为调理电路模块的 RC 带通滤波器，前一部分由 C9 和 RG1-1 组成截止频率为 15.924kHz 的低通滤波器，用来滤除实际检测过程中产生的高频噪声信号。后一部分由 RG1-2 和 C10 组成的截止频率为 32Hz 的高通滤波器，用来滤除由霍尔传感器 2.5V 基准电压产生的直流分量，保留检测的漏磁交流分量。

由于实际的检测过程中传感器输出信号大小为毫伏级，A/D 转换器无法有效采集到信号，所以对信号的放大处理是必不可少的。运算放大器选用 AD620，将滤波后的信号通过 AD620 进行放大，但要注意放大后的信号需要匹配 A/D 采集模块的量程范围，才能进行后续的处理。表 2 是 AD620 主要参数表，AD620 具有操作简易，成本低，精度高等特点，其原理图如图 7 所示。

表 2 AD620 参数表

工作电压	内部消耗	工作温度	线性度	噪声峰值
18V	650mW	-40~85℃	40ppm	0.28 μ v

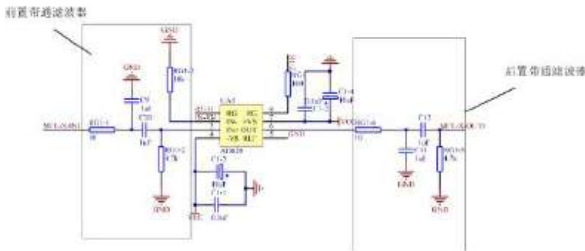


图 7 AD620 原理图

为了适应不同检测环境要求以及阵列传感器霍尔器件较多的问题,需使用 AD8403 作可调电位器来调节 AD620 的增益。AD8403 作为数字电位器具有性价比高的特点,可以提供 4 个可调电阻,由 AD620 与 AD8403 共同组成放大倍数可调的放大电路,对漏磁信号进行放大处理,放大倍数如公式 1 所示。FPGA 通过控制 AD8403 的 A2、A3 端的数值来控制 AD620 的 RG 值。图 8 为 AD8403 数字电位器原理图。

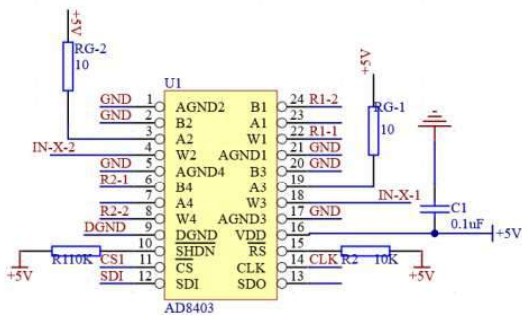


图 8 AD8403 原理图

1.4 FPGA 模块设计

FPGA 自其投入使用开始, 凭借其较强的并行运算能力, 应用领域越来越广泛, 其本质是集成的逻辑门电路, 内部拥有大量寄存器, 用户能够通过编程实现各种功能。FPGA 各个模块工作调度模式如图 9 所示, 传感器信号经过滤波、放大后由 A/D 采集模块采集并传送给 FPGA 的存储模块。FPGA 的程序设计采用模块化设计, 其中包括系统调度模块、时钟控制模块、负责驱动 A/D 转换器的采样控制模块、数据的缓存存储模块、屏幕显示模块以及以太网传输模块等各项功能模块。

系统调度模块作为核心控制模块，负责调整个系统各个模块的工作。系统由时钟模块提供各个模块所需要的时钟信号，在时钟模块的驱动下，系统调度模块作为顶层模块控制 FPGA 的各个子模块，通过采样控制模块驱动采集电路，将采集得到的数据先经过滤波后送入数据缓存模块缓存，接着通过与系统调度模块相连的 FIFO 将缓存的数据保存存到内部 RAM 中，为数据写入 SD 卡做好准备。并用 LCD 屏幕对数据信号进行实时显示。检测完成后通过以太网传输模块将采集到的数据信息传输到计算机上进行进一步的分析。

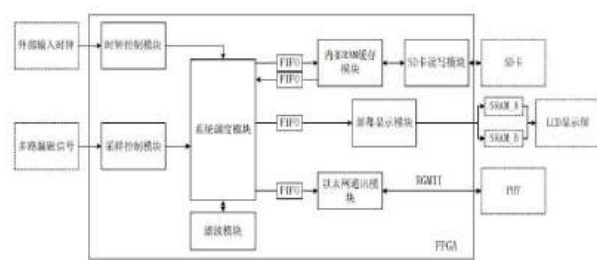


图 9 FPGA 内部模块

2 实验

为了验证系统检测的准确性, 设置传感器距离管道距离为 2mm, 磁轭距离管道为 20mm, 选用带有不同人工缺陷的管道进行检测实验。AD 采集卡的采样率为 4kHz, 探头移动速度控制在 2 m/s。检测方式为漏磁检测, 探头内的 U 型磁轭对管道周围进行磁化, 霍尔传感器对漏磁信号进行采集, 之后信号经过调理电路板进行滤波放大, 通过 AD 采集卡转换为数字信号由 FPGA 接收, 最后通过上位机通过显示屏显示。缺陷宽度与深度信息如表 3 所示。

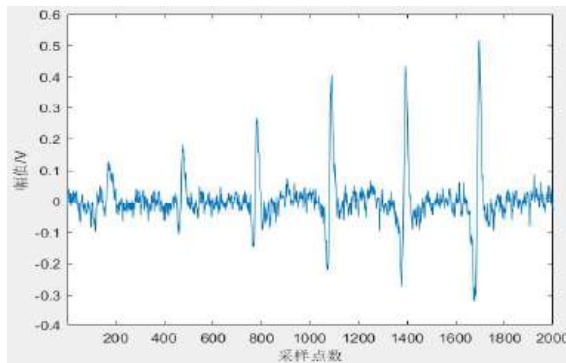
表 3 缺陷宽度深度信息表

序号	1	2	3	4	5	6
宽度	2mm	2mm	2mm	2mm	2mm	2mm
深度	1mm	1.2mm	1.4mm	1.7mm	1.8mm	2mm

管道实物图和缺陷检测信号如图 10(a)、(b) 所示。



(a) 管道实物图



(b) 缺陷检测信号

图 10 管道与检测信号

如图 10 (b) 所示, 横轴为采样点数, 纵轴为信号幅值大小。图 10(a) 为六个不同深度的缺陷, 且从左往右缺陷深度越来越大。数据无缺陷处信号较为平稳, 有缺陷处由于传感器与管道距离控制的较小, 漏磁信号幅值偏大且没有被振动干扰信号淹没, 缺陷

容易被识别出。缺陷处检测信号波形幅值从左往右依次增大,符合缺陷不同深度的分布。

3 结论

本文所设计的基于FPGA的漏磁检测系统具有采样速度快,灵敏度高优点。利用漏磁检测技术的原理,使用阵列传感器,可以对管道损伤进行全覆盖的检测。所设计的调理、放大电路能对探头所捕获的漏磁信号进行有效处理。通过FPGA的程序控制,能够高效的对漏磁信号进行采集、滤波、存储、显示,可以很好的检测到缺陷信号并进行处理,通过实验进行验证了系统设计的可行性与有效性。实现及时监测,预防管道断裂等问题,对管道的安全有重要意义。

参考文献:

- [1] 孟祥瑞. 综合管廊总体设计理论研究[J]. 工程建设与设计,2020(08):65-66.
- [2] 白海龙. 城市综合管廊发展趋势研究[J]. 中国市政工程,2015(06):78-81+95.
- [3] 罗家木,陈雍君,邱实. 基于嵌入式系统的智慧管廊防灾预警系统设计[J]. 电子测量技术,2017,40(05):123-128.
- [4] 吴志平,陈振华,戴联双,胡亚博,毕武喜. 油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J]. 油气储运,2020,39(08):851-860.
- [5] 邱秀分,张峰,孙志伟,贾庆生,李明,宋聪,何昌邦. 基于分布式光纤传感技术的油气管道联合检测方法[J/OL]. 油气储运:1-9[2022-08-12].
- [6] 张世宇,眭小红,赵瑜,周起如. 管廊巡检机器人技术分析[J]. 信息记录材料,2021,22(07):94-95.
- [7] 罗家木,陈雍君,陈渝江,邱实. 基于5G无线传感网络的智慧管廊综合监控系统设计[J]. 电子测量技术,2017,40(04):127-132.
- [8] 王志刚,罗清旺,师奕兵,陶爱华. 铁磁性管道内涡流线圈耦合分析与管道参数检测[J]. 仪器仪表学报,2014,35(12):2843-2851.
- [9] 孔双庆. 管道超声导波检测的数值模拟和实验研究[D]. 大连理工大学,2011.
- [10] 姚建军. 基于多数据融合和小波分解的油气管道缺陷检测方法研究[J]. 石油化工自动化,2020,56(02):28-32.
- [11] 田丰,陆怡晨,贾银亮,王平,罗小华. 基于机械臂的管道检测全向机器人设计[J/OL]. 电子测量技术:1-6.
- [12] Jia Y, Lu Y, Xiong L, Zhang Y, Wang P, Zhou H. A Filtering Method for Suppressing the Lift-Off Interference in Magnetic Flux Leakage Detection of Rail Head Surface Defect. Applied Sciences. 2022; 12(3):1740
- [13] 张事成,贾银亮,冀凯伦,王平. 一种钢轨顶面伤损漏磁信号缺陷识别方法[J]. 电子测量技术,2020,43(21).
- [14] 张辉,宋雅男,王耀南,等. 钢轨伤损无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):11-25.
- [15] 田贵云,高斌,高运来,王平,王海涛,石永生. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(08):1763-1780.

作者简介:李孟垠,中级工程师,主要研究方向:燃气管道安全技术。从事的工作:北京市燃气集团有限责任公司第五分公司安全技术管理。