

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.004

油气管道内表面涡流无损检测系统设计

焦靖淇, 王平

(南京航空航天大学 高速载运设施的无损检测监控技术工信部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于电涡流感应原理设计一种多通道的差分检测探头, 通过两线圈信号差分的方式, 减少共模信号的干扰。采用功率检波器对缺陷信号的幅值进行快速提取, 相较于数字相敏检波更加快捷直观。搭建上位机平台, 实现对多通道缺陷信号的采集。分析对比不同深度、不同宽度凹坑缺陷信号的差异性。实验结果表明: 该涡流无损检测系统可对深度 1 mm、半径 5 mm 的凹坑缺陷实现有效检测, 并对不同深度、不同宽度的缺陷有较好的分辨能力。

关键词: 电涡流传感器; 功率检波技术; 差分探头; 系统设计; 缺陷检测

中图分类号: TB302.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0016-04

Design of Eddy Current Non-destructive Testing System for Inner Surface of Oil and Gas Pipelines

JIAO Jingqi, WANG Ping

(Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology for Non-destructive Testing and Monitoring Technology of Highspeed Carrier Facilities, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A multi-channel differential detection probe is designed based on the principle of eddy current, reducing the interference of common mode signals through the differential signal of two coils. With the application of a power detector, the amplitude of defect signals is quickly extracted, which is faster and more intuitive compared to digital phase sensitive detection. An upper computer platform is built to collect multi-channel defect signals, and the differences in pit defect signals with different depths and widths are analyzed and compared. The experimental results show that the eddy current non-destructive testing system can effectively detect pit defects with a depth of 1 mm and a radius of 5 mm, and has good resolution ability for defects with different depths and widths.

Keywords: eddy current sensor; power detection technology; differential probe; system design; defect detection

0 引言

近年来,随着我国经济的快速发展,对石油、天然气等能源需求日渐增长。作为能源使用中的关键一环,管道发挥着连接供需两端的关键作用,其运营里程亦不断扩大。因此,确保油气管道运输安全,成为管道日常运营中的重要环节^[1]。基于此需求,管道内检测技术应运而生。涡流检测作为一种重要的无损检测手段,因其响应速度快、无需耦合、灵敏度高等优点,成为了管道无损检测领域热点研究问题。左嘉琦等^[2]使用脉冲涡流实现对管道焊缝的有效定位,但其所设计的系统稳定性较差,难以长时间运行。肖奇等^[3]对远场涡流相应模型进行了仿真实验和实验验证,利用传感器电压及相位变化实现了对缺陷的有效检测,

但其所设计的系统受提离影响较大。近年来随着柔性电子产业的发展和应用^[4],由柔性 PCB 线圈制成的平面涡流线圈走进研究人员视野。杨雨沛^[5]使用差分平面涡流传感器实现了对真实管线的检测并进行了缺陷量化分析,但所设计的传感器功耗过高,不适合长距离管线检测。

本文基于涡流检测原理,设计了一套油气管道内表面涡流无损检测系统。通过硬件电路对多通道缺陷信号的电信号幅值进行快速提取,相较于传统的数字相敏检波结构更加简单。除发射电路与接受电路外,设计了差分检测探头,通过两线圈信号进行差分的方式,减少了共模信号的干扰;搭建了上位机平台完成对多通道缺陷数据的采集,最终实现了多通道、灵敏度高、抗干扰能力强的涡流无损检测系统。

基金项目: 国家自然科学基金项目(2020YFC3005000)

第一作者简介: 焦靖淇(1998—),男,河南焦作人,硕士研究生,研究方向为电磁无损检测,15651861766@163.com。

1 涡流检测原理及线圈参数设计

涡流检测原理基于电磁感应理论,在检测时通过观测涡流线圈中的电信号变化来判断被测物体是否存在缺陷。其中,检测线圈参数及线圈激励频率是影响涡流检测系统性能的关键参数。本文线圈骨架通过采用复合材料 3D 打印制成,直径 6 mm,高 2 mm。在其上缠绕 200 匝线径 0.1 mm 的低电阻、低温度系数的漆包线线圈。该参数线圈仿真实验如图 1 所示。在激励频率为 1 MHz 处,线圈检测缺陷时的电流变化大小随激励频率的上升迅速衰减并趋于稳定。因此,本文选用 1 MHz 作为线圈最终的激励频率。

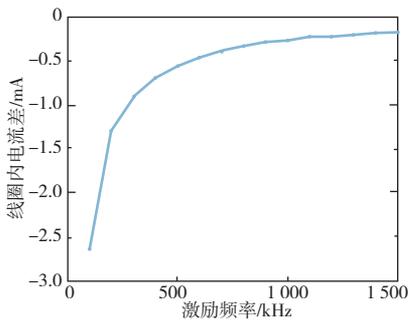


图 1 不同频率激励下有、无缺陷信号电流差

2 涡流检测系统设计

涡流检测电路主要由发射电路与接收电路组成。其中,发射电路为线圈提供信号激励,由硅振荡器芯片及其外围元器件组成的信号激励电路组成。接收电路将线圈上的信号进行处理,包含全桥测量电路、信号放大电路、功率检波、低通滤波等模块,如图 2 所示。可编程的硅振荡器激励源经滤波后送入探头,在被测样件中激发出涡流场并检测到涡流电信号,接收电路对其进行放大后送入功率检波电路对其包络进行提取和滤波,最后通过采集卡送入上位机中。

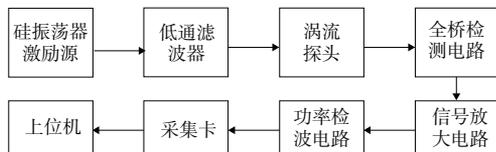


图 2 涡流检测系统结构框图

2.1 激励源方案设计

激励信号电路主要用于产生交流激励。在涡流检测系统设计中,对于激励信号的幅值、相位、

稳定性的要求均较高。硅振荡器以硅为起振材料,结合半导体 MEMS 工艺制成,具有温漂小、抗震性能强、集成度高等优点。相较于基于 DDS 技术的信号发生电路,其具有无需软件编程、体积更小、稳定性更高的优点。因此本文采用 LTC6990 硅振荡器芯片来完成激励信号电路的搭建,其电路如图 3 所示。该电路输出激励频率由 LTC6990 芯片内部分频器及电阻 R_2 控制,其控制公式如下:

$$f_{\text{OUT}} = \frac{1}{N_{\text{DIV}}} \cdot \frac{50}{R_{\text{SET}}} \quad (1)$$

将 DIV 引脚接地来设置分频系数 N_{DIV} 为 1,通过将 R_2 的值设置为 50 k Ω 来实现 1 MHz 频率的波形产生。

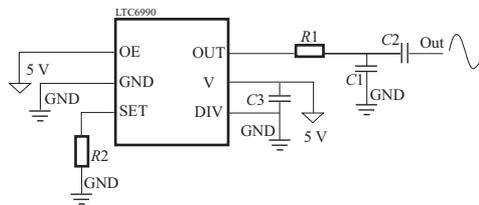


图 3 激励信号产生电路

2.2 探头与信号放大电路设计

在涡流管道检测的过程中,传感器会受到脱离、管道内检测器电磁系统等多种干扰。常规的绝对式探头受干扰较为严重,对后续的信号处理造成较大影响,如图 4 所示(图中: V_1 、 V_2 表示激励线圈的电压信号; d 表示激励线圈与被测样件间的距离; μ_c 表示被测金属导体的磁导率; σ 表示被测金属导体的电导率)。本文采用差分探头的方式,使用差分信号放大电路,得到检测线圈 1 与检测线圈 2 相减后的差分信号并放大输出。在未检测到缺陷时,两检测线圈输出相同,差分信号放大电路输出为 0,在某一线圈检测到缺陷时,两检测线圈输出不同,差分信号放大电路输出不为 0,实现了对共模干扰信号的有效抑制。

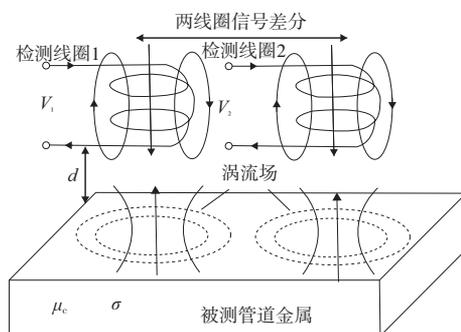


图 4 差分线圈检测原理图

在电路设计上,采用低噪声双通道精密放大器 AD8032 及其外围电路完成的差分信号放大电路的搭建,电路原理如图 5 所示。将两检测线圈信号送入信号放大电路的两端进行差分,并将差分信号放大后进行输出。

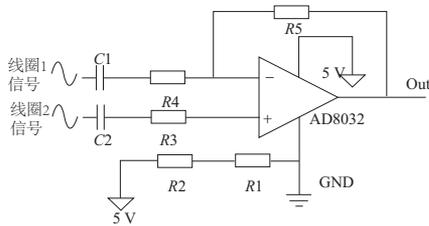


图 5 信号放大电路

2.3 信号检波电路设计

在对涡流线圈信号检波的方法中,常规的 IQ 解调等数字相敏检波方法由于功耗高,电路复杂,难以用于涡流管道检测的实际应用中。因此,本文设计了一种基于功率检波电路,具有体积小、功率低、检波速度快、特征信号直观等优点。其电路方案如图 6 所示。使用 LTC5507 功率检波器及其外围元器件搭建,功率检波电路的输出可送入采集卡进行采集。

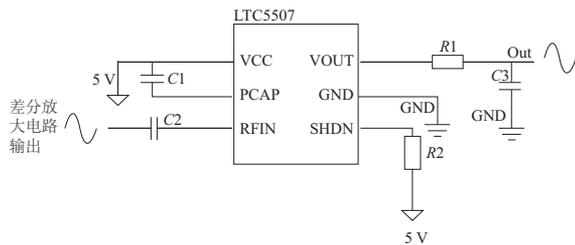


图 6 功率检波电路

2.4 采集卡及上位机软件

在涡流检测过程中,使用阿尔泰科技 USB3153 采集卡和 Visual Studio2022 软件开发平台搭建采集系统与上位机软件系统。上位机功能包括设置采样频率、采集卡初始化、控制检测进程、保存数据及实时显示。差分涡流探头输出的缺陷信号经硬件电路进行处理后,通过采集卡实现与计算机之间的数据传输,最终将数据上传至上位机进行实时显示并以 txt 格式保存在硬盘指定位置中,以供进一步的分析。

3 系统实验测试

实验系统如图 7 所示,主要由检测探头、缺陷样品、采集卡、上位机、直流电源和示波器组成。

其中,缺陷样品为在 L415 管道钢样件上加工深度分别为 1.0 mm、2.0 mm、3.0 mm、3.5 mm,直径为 10 mm 与直径 20 mm 的不同规格的凹坑缺陷样本。该类缺陷中间较深而靠近边缘处较浅。



图 7 实验室实验环境

检测探头为 4 路的基于功率检波技术的差分涡流检测探头,如图 8 所示。该探头由 8 个线圈组成 4 个差分通道,横向上两组对应位置上的线圈信号进行差分。其中每个线圈的直径为 8 mm。编号相邻的两通道间在纵向上的间隔为 10 mm。

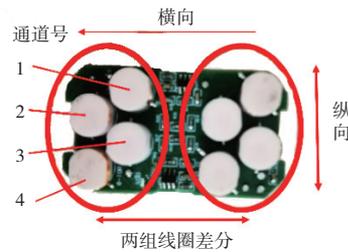


图 8 差分涡流检测电路

实验时,将装载着涡流检测探头的载具划过缺陷样本并通过采集卡采集得到缺陷信号。本文将实验分为不同深度缺陷测试与不同宽度缺陷测试两类。

3.1 不同深度缺陷测试

为测试系统对不同深度缺陷的检测能力,使用系统对直径 20 mm、不同深度缺陷进行检测。实验结果如图 9 所示。检测系统所检测到的缺陷信号明显,信号质量较好,信噪比高,验证了差分探头对共模干扰信号的抑制能力。随着被检缺陷深度增加,涡流传感器输出信号幅值也不断增加,在检测各个深度缺陷时,通道 1 与通道 4 相较于通道 2 与通道 3 信号幅值较小,反映了凹坑缺陷中间深两边浅的缺陷特征。可见,涡流无损检测系统在检测不同深度缺陷时具有良好的检测效

果,同时也验证了多个通道的线圈探头在传感器纵向上的检测能力。其中,缺陷信号最大峰峰值如表1所示。可以看出随着缺陷深度的增加,涡流传感器4个通道中输出的信号最大峰峰值明显上升。

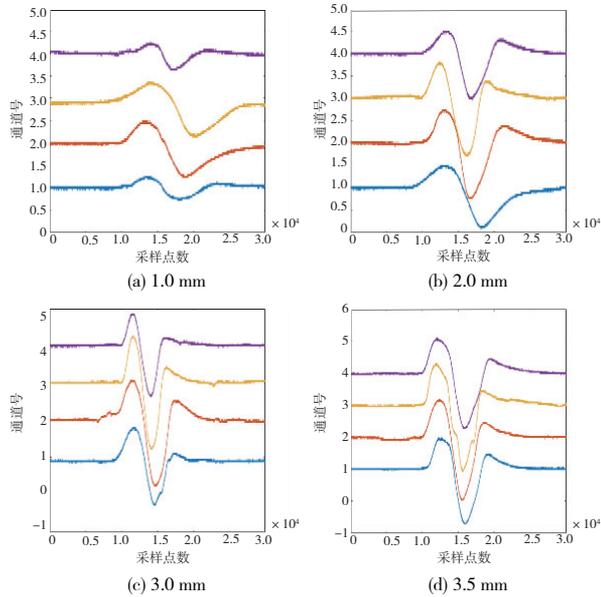


图9 直径20 mm 凹坑不同深度缺陷信号

表1 不同直径与深度缺陷信号最大峰峰值

| 缺陷深度/mm | 缺陷信号最大峰峰值/V | |
|---------|-------------|----------|
| | 直径 20 mm | 直径 10 mm |
| 1.0 | 1.24 | 1.17 |
| 2.0 | 2.08 | 2.21 |
| 3.0 | 3.04 | 2.99 |
| 3.5 | 3.36 | 3.26 |

3.2 不同宽度缺陷测试

为测试系统对不同宽度缺陷的检测能力,使用系统对直径为10 mm的缺陷进行检测。其中,最小的缺陷深度1 mm,如图10所示。在检测直径为10 mm的缺陷时,仅通道2与通道3有缺陷信号。其原因为通道2、通道3在探头纵向宽度上将10 mm宽度缺陷完全覆盖。可见,涡流无损检测系统可通过各个通道是否有信号及各个通道的信号幅值大小来对不同宽度的缺陷进行检测。

系统检测不同直径的不同缺陷深度时缺陷信号最大峰峰值结果如表1所示。检测20 mm直径缺陷时不同深度缺陷信号最大峰峰值与10 mm直径缺陷时并未有较大变化。可见,对于相同深度的缺陷,在其宽度不同时,涡流无损检测系统的检

测结果也具有较好的一致性。

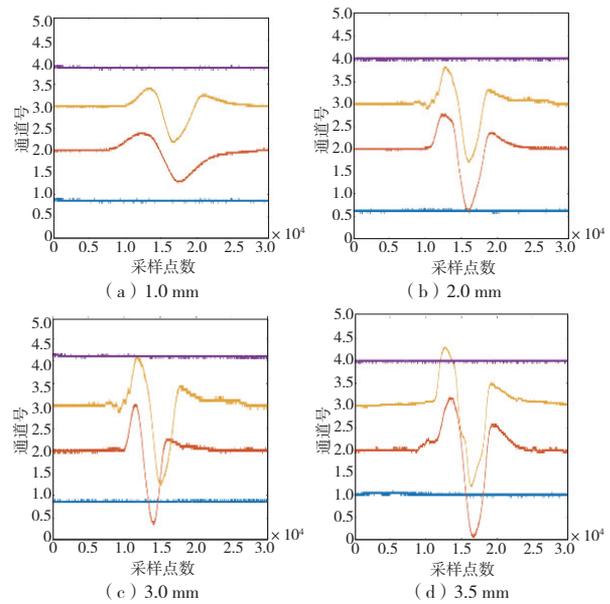


图10 直径10 mm 凹坑不同深度缺陷信号

4 结语

本文基于涡流无损检测理论,设计了一套管道内表面涡流无损检测系统。涡流无损检测系统使用硅振荡器并对其进行编程,得到了频率精准且稳定的激励源。通过使用差分探头抑制了检测过程中的共模信号,使得最终的检测信号有较高的信噪比。使用功率检波技术代替传统的数字检波,实现对缺陷特征信号快速提取的同时,减小了系统的体积和功耗,最终通过采集卡将多通道缺陷信号采集至上位机显示。实验结果表明:本次设计的涡流无损检测系统对不同深度、不同宽度的缺陷均有良好的检测效果;通过峰值及各个通道检测情况可对不同深度、不同宽度的缺陷进行有效分辨。

参考文献:

- [1] 殷晓康,杨丽强,王伟,等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统[J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):239-250.
- [2] 左嘉琦,李继承. 基于脉冲涡流技术的带包覆层管道焊缝定位研究[J]. 无损探伤,2019,43(4):10-12.
- [3] 肖奇,徐志远,伍权. 基于远场涡流的碳钢管道缺陷外检测方法[J]. 传感技术学报,2018,31(11):1684-1689.
- [4] 孔善右,唐德才,赵紫倩,等. 柔性电子产业发展文献综述[J]. 机械制造与自动化,2022,51(6):106-110,126.
- [5] 杨雨沛. 基于差分平面涡流传感器的管道缺陷内检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.

收稿日期:2023-05-17