

压力容器表面缺陷涡流检测系统设计与实现

王晋¹, 任毅¹, 王海涛², 张宏², 刘浩²,
陈玺名², 李琪²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 南京 210036;
2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106)

摘要: 随着石油、能源、化工等行业的迅速发展, 能源运输与能源储备需求日益增加, 石油管道和大型储罐等带涂层压力容器的可靠性和安全性极其重要, 压力容器表面涂层的存在导致定期检查时基体表面缺陷无法被直接辨识, 因此需要使用更高效准确的无损检测方法对其进行检测; 阵列涡流检测技术继承了常规涡流检测技术的表面要求低、无需耦合、检测速度快等优点; 基于基础涡流检测实验系统结合硬件电路及上位机搭建集成化涡流检测系统, 通过实验数据分析实际检测中传感器输出信号与缺陷之间的关系, 验证了搭建的集成化涡流检测系统与所设计传感器对缺陷检测的有效性。

关键词: 压力容器; 缺陷检测; 涂层; 涡流传感器; 集成化系统; 提离

Design and Implementation of Eddy Current Inspection System for Pressure Vessel Surface Defects

WANG Jin¹, REN Yi¹, WANG Haitao², ZHANG Hong², LIU Hao², CHEN Ximing², LI Qi²

(1. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China;
2. School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the rapid development of industries such as petroleum, energy, and chemical, the demand for energy transportation and energy storage is increasing day by day. It is of particular importance to the reliability and safety of coated pressure vessels such as oil pipelines and large storage tanks. The presence of surface coatings on pressure vessels makes it difficult to directly identify surface defects during regular inspections. Therefore, it is necessary for more efficient and accurate non-destructive testing methods to detect the defects. The array eddy current detection technology inherits the advantages of conventional eddy current detection technology, such as low surface requirements, no coupling, and fast detection speed. Based on the basic eddy current detection experimental system, and combined with hardware circuits and upper computer, an integrated eddy current detection system is built. The relationship between the sensor output signal and the defect in actual detection is analyzed by experimental data, which verifies the effectiveness of the integrated eddy current detection system and the designed sensor for defect detection.

Keywords: pressure vessel; defect detection; painting layer; eddy current sensor; integrated system; lift off

0 引言

储罐和锅炉属于承压类容器, 储罐用于存储各种

液体和气体, 可以平衡压力和温度变化, 保证密封性和防护性^[1]; 锅炉用于产生蒸汽和热能, 提供能源转换, 通常储存经过燃烧燃料产生的高温高压蒸汽或热

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-05-18。

基金项目: 江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ2022005); 江苏省科技计划项目(BE2021084); 江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ2022002)。

作者简介: 王晋(1968-), 男, 大学本科, 研究员。

通讯作者: 王海涛(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

引用格式: 王晋, 任毅, 王海涛, 压力容器表面缺陷涡流检测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 30-38.

能,进行后续的发电、加热等工业生产过程^[2]。目前我国各类油气化工储罐约3.1万多座,总罐容超过3亿立方米,移动运输槽罐32万个;在用燃煤工业锅炉达46.7万台,锅炉总容量达178万蒸吨,新型环保的燃气、电锅等锅炉的市场存量达到18.12万台,2022年我国工业锅炉行业市场规模约为1462.44亿元^[3-4]。储罐与锅炉在我国的工业应用中占据了很大的比重,同时储罐和锅炉的安全性对于工业生产以及日常生活至关重要。受外界环境的影响,储罐和锅炉表面可能会产生锈蚀,经过锈蚀之后的储罐在内外压力作用下很容易产生裂纹^[5-7]。为避免因表面发生腐蚀造成安全事故,在其表面通常也使用防腐涂层涂敷,但使用中在防腐层下产生的表面缺陷由于防腐层的存在无法被直接检测,此表面缺陷同样容易引发安全事故,因此为保证设备完好,针对储罐和锅炉这一类压力容器的不去除涂层的检测需求日益增加^[8]。

对于压力容器表面缺陷的无损检测,目前常用的常规无损检测方法为超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、漏磁检测及涡流检测^[9-10]。目前众多检测方法都可以对带涂层的设备表面裂纹进行检测,但是超声检测需要与试件之间耦合,需要添加耦合介质;磁粉检测和渗透检测除对平整度要求外,还需要在检测前对涂层进行清除,工作量太大;漏磁检测仅可检测磁性材料,易受涂层影响^[11-13]。涡流检测技术相比于其他几个检测,更适合检测表面缺陷,对于表面平整度要求不高,同时涡流检测应用领域广,对于金属以及复合材料都有检测效果,且在检测速度上拥有很大的优势^[14]。随着电子技术和仪器仪表技术的发展,结合当下不断增加的涡流无损检测需求,国内研究者对于涡流检测系统的研究也逐渐增多,在涡流检测技术基础上阵列涡流检测技术研究逐渐兴起,如何稳定地搭建以及集成化涡流检测系统成为国内外的涡流检测的热点。稳定的检测系统可以增加涡流检测结果的准确性,集成化涡流检测系统有利于提高涡流检测的实用与适用性,增加涡流检测的应用场合^[15]。2017年,Rifai等人^[16]设计了一种集成式阵列涡流探头,同时搭建检测系统,通过优化传感器参数、建立数学模型,最终实现对碳钢管道的高效检测。2021年,胡健等人^[17]利用阵列涡流检测技术对压力容器内表面腐蚀裂纹进行检测,成功检出表面埋藏较浅的缺陷。

本文设计了一套集成化涡流检测设备,同时提出一种阵列涡流传感器,结合检测设备对不同缺陷进行检测,对得到的涡流检测信号进行分析,实验结果表明所设计集成化涡流检测设备可对最小0.1 mm宽缺陷进行检测,同时在较高提高下也可实现对缺陷的分辨,满足对带涂层压力容器的表面缺陷检测。

1 涡流检测原理

1.1 涡流检测基本原理

涡流检测是以电磁感应理论为基础实现试件缺陷与检测线圈间信息传递的无损检测方法,其在金属材料表面以及近表面探伤发挥了重要作用^[18]。不同被测导体材料在交变磁场作用下会产生不同的涡流场,可对此涡流所产生的磁场进行检测从而评估导电材料的物理性能,进而实现缺陷的判别,其主要特点是检测不需要耦合剂、使用寿命较长、对表面及近表面缺陷敏感、对外界环境与温度变化不敏感、检测系统易于实现等。涡流检测基本检测原理如图1所示:通有一定频率交流电的激励线圈周围会产生交变磁场 H_1 ,该磁场被称为初级磁场。当初级磁场接近导电材料时,材料表面会感应出涡流,该涡流的大小和分布密度会因缺陷或其他特性而发生变化,同时感应涡流又会产生与原磁场相反方向的感应磁场 H_2 ,该磁场称为次级磁场,其对初级磁场有削弱作用,两个磁场所构成的复合磁场作用于检测线圈。当导体中存在缺陷时,其电磁连续特性发生改变,感应电流将会在缺陷的前端和底端流动,致使涡流在缺陷的两端聚集,打破了原有的涡流分布,从而导致次级磁场发生变化,使得检测线圈区域中流动的磁通量改变。

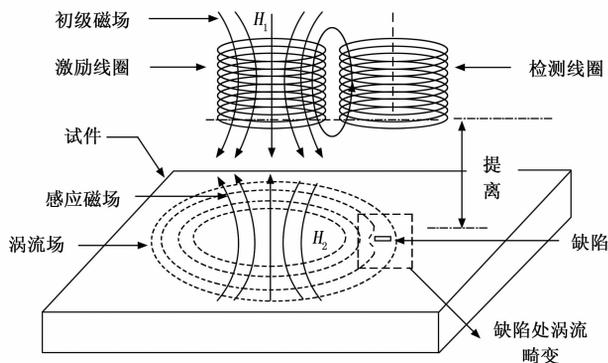


图1 涡流检测基本原理

1.2 差分涡流检测技术

在对带涂层压力容器表面缺陷进行检测时,如果缺陷较小或者涂层较厚导致提高太大,检测信号很微弱且变化不够明显,检测中很容易受其他因素的影响。传统的涡流探头在对缺陷进行检测时,有着信号微弱容易被噪声湮没以及受外界环境影响大的缺点,故本文在常用检测传感器的基础上,利用涡流的差分检测方式,增强检测信号,减小环境干扰,使检测信号输出更加明显。

在涡流检测中,差分是指使用两个或多个探头进行检测时,将它们之间的信号差值作为结果输出。此方法可以有效地减少被测试件材料和表面状态对输出信号的影响,从而更加精确地检测出试件中的缺陷或变化。使用差分技术可以提高检测的灵敏度和准确性,避免了环

境等因素带来的误判,并能够实现高效率、高可靠性的检测^[19]。

1.3 锁相放大原理

所设计的传感器接收线圈输出信号为电压信号,通过采集电压值用来判断被测试件的性质变化,主要用于对试件缺陷的检测。检测时发现信号过于微弱容易被噪声湮没,上节采用差分的方式提高检测信号的质量及传感器的灵敏度。但差分检测对噪声的抑制只能起到一定的效果,对于完整提取涡流检测信号还需要加入其他方法进行信号处理,从而加大对噪声的抑制效果、提高检测信号的信噪比。

针对以上问题,本文基于涡流检测信号与激励信号频率相同,采用锁相放大原理,提取有效的涡流检测信号。锁相放大器是一种特殊的带通滤波器,与参考信号同频同相的检测信号分量被转化为直流信号,再经过低通滤波取出直流信号,即可得到期望信号的大小,可有效将小信号从噪声中提取出来^[20]。

锁相放大器(LIA, lock-in amplifier)基本结构如图2所示,包括信号通道、参考通道、相敏检测器(PSD, phase sensitive detection)和低通滤波器(LPF, low-pass filter)。

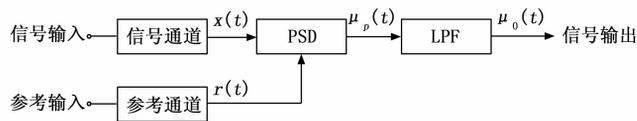


图2 锁相放大基本结构

信号通道对输入信号进行放大,可将微弱的涡流信号放大到相敏检波器能够检波的电压范围。参考输入一般选取与期望信号频率相同的正弦信号或方波信号,在涡流检测系统中一般可选取未经放大的原始激励信号作为参考信号。相敏检波器以参考信号提供的正弦或余弦分量作为输入,对输入信号进行相敏检波(乘法运算)。低通滤波器滤掉相敏检波输出信号的高频信号,使锁相放大器达到较大的信噪比。

2 检测系统硬件软件设计

2.1 检测系统总体方案

本文所设计的压力容器不去涂层检测系统构成如图3所示。检测系统主要包括激励信号发生器、功率放大器、阵列涡流传感器、采集卡和上位机。阵列涡流传感器用于检测压力容器表面原始信号,完整的传感器包括传感器外壳、检测线圈、激励线圈和信号转接板。

传感器线圈设计与制作直接影响到表面缺陷检测的灵敏度与信噪比,作为检测系统的核心,其有着重要的地位。线圈内外径、高度和匝数会影响磁场的作用范围和传感器体积。使用 Comsol Multiphysics 有限元仿真

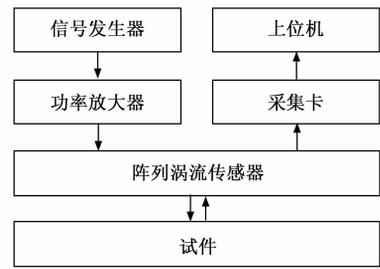


图3 检测系统构成框图

软件对激励和接收线圈各参数进行仿真,得出传感器激励线圈和检测线圈参数如表1所示。线圈材料为铜,由内向外逐层绕制,激励线圈电阻为 $5.3\ \Omega$,检测线圈电阻为 $4\ \Omega$ 。

表1 传感器线圈参数

| 线圈参数 | 内直径/mm | 外直径/mm | 高度/mm | 匝数/匝 |
|------|--------|--------|-------|------|
| 激励 | 6 | 12 | 5 | 300 |
| 接收 | 5 | 10 | 5 | 250 |

激励线圈与检测线圈成“十”字排布,所使用传感器外壳设计与仿真模型对应。

针对所设计传感器灵敏度及精度的标定,我们选择使用标准缺陷试块进行实验。试件材料为Q345R钢,该材料被广泛应用于石油、化工、电站、锅炉等行业,用于制作换热器、油气罐、锅炉汽包、水电站高压水管、水轮机蜗壳等设备及构件。试件规格长×宽×深为 $360\ \text{mm} \times 250\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$,制作缺陷为裂纹缺陷类型,其中有4组不同角度、不同长度、不同宽度和不同深度的矩形缺陷。由于需求缺陷尺寸较小,所采用缺陷制作方式为电火花刻蚀,保证缺陷精度可以达到需求。制作缺陷均匀分布,从左至右缺陷大小逐渐制作增大,每个缺陷间隔 $60\ \text{mm}$ 。

2.2 硬件设计

实验系统的搭建,成功地将所设计传感器有效应用于对压力容器表面缺陷的不去涂层检测,但实验系统中所使用的各种仪器不满足现场检测要求,主要问题在于系统搭建复杂、占用空间大、每个仪器需要单独调节参数、成本高等。为解决以上问题,需要将实验系统进行小型集成化,以满足多种多样检测条件的需求。本文对于检测设备的集成化主要分为5个部分,分别是电源模块、微控制器模块、激励模块、信号处理模块及信号采集模块。

2.2.1 电源模块设计

各个模块使用电子器件不同,供电电压也有所区别,对于整个硬件系统来说,需要合理转换分配电源,保证芯片工作正常。电源模块设计如图4所示。通过初步设计各模块电路,获得我们需要的电源供电信息:激

励模块需要 +3.3、±5 和 ±12 V 电源, 信号处理模块需要 ±5 V 电源, 信号采集模块需要 +3.3 V、±5 V 电源, 综合各模块, 需要设置 +3.3、±5 和 ±12 V 共 5 种电源。

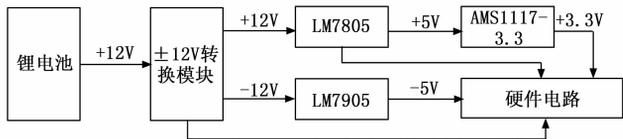


图 4 电源模块构成

2.2.2 微控制器模块

综合硬件电路功能包含的各个模块, 考虑信号的传输处理, 微控制器采用 STM32F103C8T6 系列芯片, 该芯片是一款基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位微控制器, 由意法半导体公司 (ST) 生产, 芯片的最高运行速度可达 72 MHz。

2.2.3 激励模块

激励模块主要包括信号发生、信号偏移、功率放大。信号发生模块由单片机和 AD9850 芯片组成, 可使用串行或并行控制, 在 125 MHz 时钟下, 可产生频率为 40 MHz 以下分辨率为 0.029 Hz 的波形, 输出电压最高可达到 1 V。正弦波发生电路如图 5 所示。图中 CLK、FQ、RES 和 D7 分别为时钟引脚、频率更新控制引脚、复位引脚和控制字引脚, D0~D2 为串并行选择控制引脚, AD9850 控制信号均由微控制器产生。

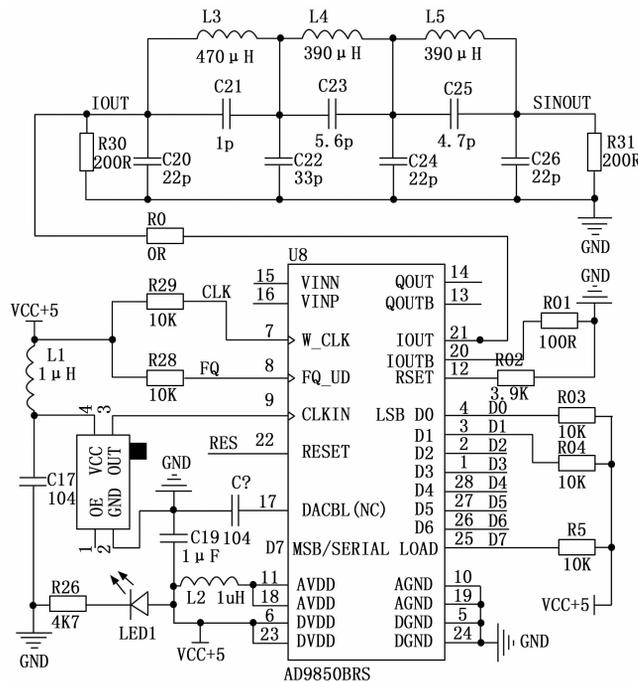


图 5 信号发生电路

产生的波形电压均为正值, 无法满足激励的幅值和基准值要求, 故需要对产生的波形进行偏置放大。信号

放大芯片选用 OPA627, 此芯片作为高性能运算放大器, 适用于精密测量, 有着较宽的供电电压 (±4 ~ ±18 V) 和高达 16 MHz 的带宽, 较宽的带宽余量保证了上文输出正弦波信号放大后的稳定性; 偏置电压由电源分压后使用 OP07 运放芯片跟随获得, 电压跟随器起到前后级隔离作用。上级正弦波信号与偏置电压通过差分放大器连接方式使信号整体下降, 成为可激励传感器的交流信号。

2.2.4 信号处理模块

实验中由于检测线圈和激励线圈尺寸的因素, 激励线圈激发涡流场及检测线圈产生的检测信号比较微小, 其变化在毫伏级别。检测信号中除与激励信号同频的缺陷信号, 还包含大量噪声, 很难从噪声中直接提取出缺陷信号, 故需要设计信号调理模块去除噪声得到缺陷信号, 有利于对缺陷信号进行完整性分析和传感器检测能力评定。

本文对于涡流检测信号的处理采用锁相放大方式, 选取锁相放大芯片 AD630 作为特征值提取电路核心。AD630 具有较宽的带宽范围, 通常在几十 kHz 到数百 kHz 之间。同时芯片还采用了低噪声设计, 能够提供高信噪比的信号放大和解调。芯片具有高转换效率, 能够实现高灵敏度和低功耗的信号处理, 其也可以在较宽的工作电压范围内正常工作, 提供较大的供电电压容忍度。AD630 芯片常用于相位敏感检测、调制解调、锁相放大等应用。主要包括前置放大、相敏检波和滤波 3 个模块, 下面对各个模块进行详细介绍。

本文所设计传感器为涡流阵列传感器, 存在两组差分检测线圈, 因此需要两组锁相放大电路分别对信号进行处理, 由于是并行对两组检测信号进行处理, 其参考信号均取自于激励源信号, 相位与激励源信号一致。

2.2.5 信号采集模块

本文所设计阵列涡流传感器为两组检测信号, 为将通过处理后的检测信号采集后传输至上位机, 需要设计相对应的信号采集电路进行信号分配处理。信号采集电路如图 6 所示。单片机采集电压范围为 0~3.3 V, 但检测信号经过信号处理后存在负电压, 为避免信号失真, 需要进行电压的偏置处理, 使处理后的信号位于单片机可采集的电压范围内。偏置电路采用差分放大电路实现, 运放芯片采用 AD620, AD620 为精密差分放大器, 适用于高精度测量, 有着低噪声、高增益、良好的共模抑制比等特点, 双电源供电情况下可实现正负电压信号的放大, 适用于锁相放大后信号的处理。单片机一个时刻只能采集一组数据并进行传输, 针对多个检测信号需要设计分时复用电路。选择常用逻辑控制芯片 74HC4051, 此芯片是一款高速 CMOS 器件, 含有 8 个单独通道作为模拟多路选择器或多路信号分配器。

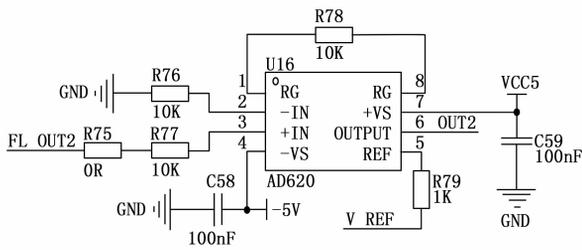


图 6 信号采集电路

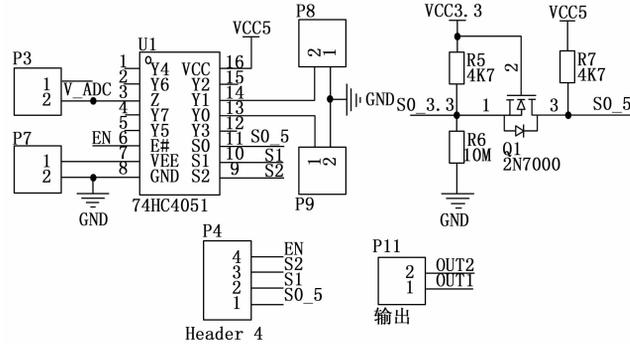


图 7 集成化系统图

2.3 系统硬件设计

上述针对各个模块的设计实现了检测系统的传感器激励信号产生和检测信号处理与采集，各模块功能经过实验与验证，满足最终的检测要求。模块调试完后需要将各个模块合并为一块完整的电路，考虑系统的组成以及减小检测系统集成化的体积，硬件电路分为两个部分，分别为电源激励部分和信号处理采集部分，系统组成如图 7 所示。

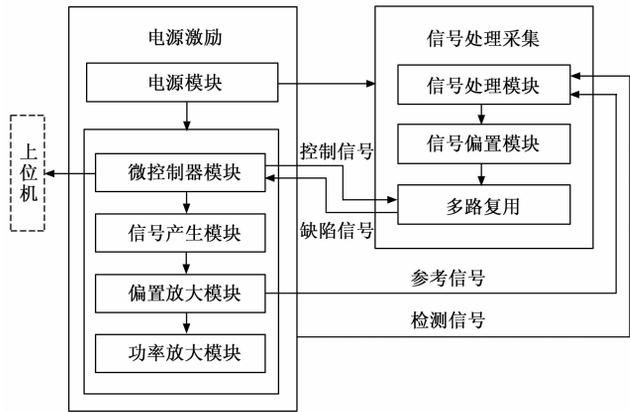


图 7 集成化系统图

电源激励电路包括电源模块、微控制器模块、正弦波发生模块、电压偏置放大模块及功率放大模块。信号处理采集电路包含检测信号处理模块、信号偏置模块及多路复用模块。将两集成化电路通过上下排针组合，为便于在实际检测中使用此集成化电路，将系统进行小型化，使用封装盒将电路进行整合，将电源充电口、系统开关、滑轨电机控制和涡流激励及检测信号引出，小型

化系统如图 8 所示。



图 8 检测系统封装

2.4 软件设计

为实现微控制器与上位机的数据信号传输，需要进行微控制器与电脑的通讯。本系统选用串口通讯方式实现微控制器与电脑的通讯。结合串口通讯的扩展性和无线传输的便利性，在串口通讯之间增加蓝牙模块实现数据的无线传输，增加了系统的便捷性与实用性。在选择通讯方式后，在上位机上编写相应的控制软件，其实现的功能包括扫查控制、通道选择、数据解析与显示。上位机软件界面如图 9 所示。

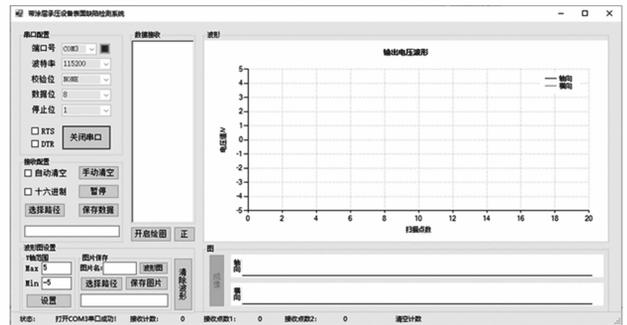


图 9 上位机软件界面

1) 扫查模块:

上位机通过发送指令控制微控制器，控制带动传感器的扫查架开始移动或者停止移动，同时指令可以控制微控制器是否向上位机发送数据。只有当传感器移动时微控制器才会向上位机发送数据，使得数据点数与试件位置相对应，增加扫查的精确性，同时便于对缺陷进行定位。上位机控制方式为向上位机发送预设指令，实现框图如图 10 所示。

2) 通道数据解析与显示:

通道数据解析处理主要包括了数据的解析和通道数据的分配，串口接收的数据经过设置的串口通讯参数进行解析，得到微控制器传输的数据，可用于文本显示。微控制器传输数据格式为“channel1: (通道 1 电压值) \r \n channel2: (通道 2 电压值)”，其中“\r \n”为换行符，根据传输数据的前缀标识，将两路检测信号解析后分别保存到两个数组中，用以进行后续的数据显示工作。

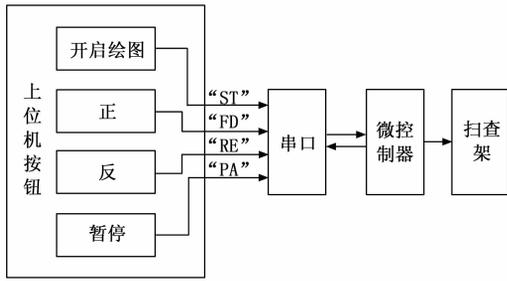


图 10 扫查控制示意图

串口接收数据后, 使用预设串口协议解析数据, 可直接将数据以文本形式显示在上位机界面的“数据接收”处。数据解析后的数据保存在缓存中, 缓存的数据赋值给波形纵坐标变量, 以接收的点数作为横坐标, 使用绘图函数绘制点, 不断更新横轴长度实现接收数据的波形动态显示。

波形显示功能中, 数据会被保存在定义的列表变量中, 作为成像的源数据, 首先计算波形峰峰值对应色域的最小最大值, 以此为映射可计算出源数据中每个数据对应的颜色, 连续绘制数据对应颜色的柱状图即可实现波形的成像。

3) 下位机设计:

下位机设计主要针对微控制程序设计, 程序使用 C 语言进行编程, 主要包括主程序初始化和各模块功能的初始化及调用, 其中包含 ADC 程序、定时器程序、信号发生控制程序、串口程序、分时复用程序、扫查架控制程序和指示灯程序, 程序运行如图 11 所示。程序初始化主要用于引脚的分配、引脚时钟使能、引脚数据传输速度设置、引脚工作模式设置, 同时主函数中初始化运行中会调用的其他子函数。图 12 为对一组缺陷进行扫查时, 上位机获取数据并进行解析、显示和成像。

3 实验结果与分析

3.1 实验参数确定与系统搭建

3.1.1 激励频率确定

将硬件用于实际检测之前, 还需要对所设计传感器进行实验, 检测其灵敏度并确定激励频率和激励电压两个参数, 参数确定后才可对硬件进行编程控制以及固化设置, 保证其输出正弦波保持为最佳激励信号。

实验通过改变激励参数, 对同一缺陷进行扫查, 对得到的检测信号进行对比分析。扫查长 20 mm、宽 0.3 mm、深 2 mm 的矩形裂纹缺陷, 由于扫查方向垂直于缺陷且传感器中心与缺陷中心对齐, 故仅轴向线圈有信号输出, 横向线圈输出保持基准值不变, 信号分析时对轴向线圈输出缺陷信号的峰峰值 ΔP 作为对比指标, 即传感器检测灵敏度。首先对传感器的激励频率进

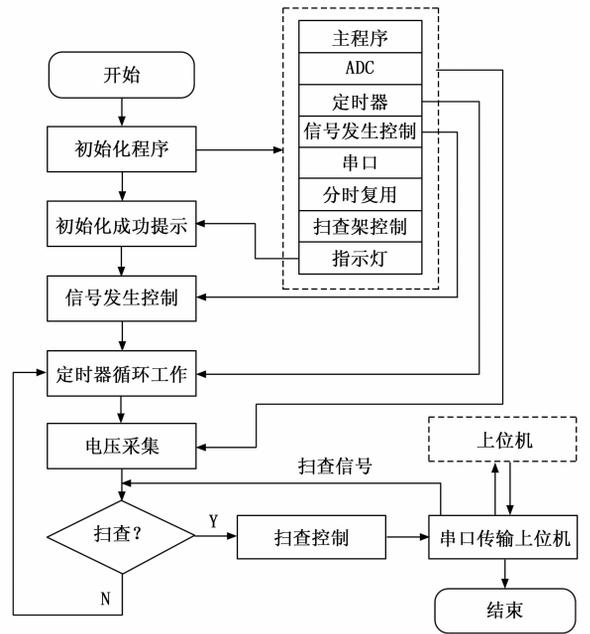


图 11 下位机设计图

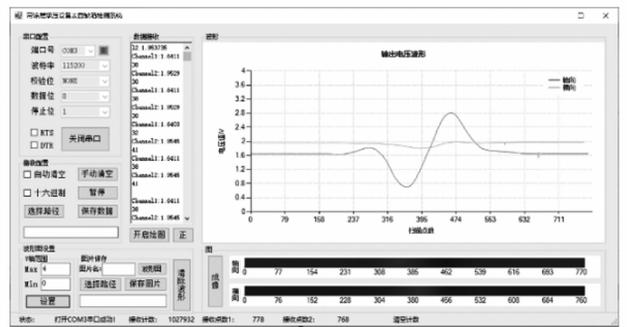


图 12 上位机缺陷检测示意图

行实验, 研究激励频率对传感器检测灵敏度的影响同时寻求最佳激励频率。检测灵敏度 ΔP 表达式如下所示:

$$\Delta P = V_{P-P} = V_{\max} - V_{\min} \quad (1)$$

激励正弦信号频率选取有: 以 10 kHz 为间隔从 10~200 kHz 及 250、300、400、500 kHz, 缺陷扫查时对传感器输出检测信号进行采集处理, 得到传感器检测灵敏度随频率变化曲线如图 13 所示。由图中信息可知, 随着频率的逐渐增加, 检测信号峰峰值呈现先增大再减小的规律, 到 200 kHz 后减小速度逐渐变缓, 在 50 kHz 处存在最大值。

实验表明, 低频率激励下的检测灵敏度较高, 都能对缺陷进行检测, 在 50 kHz 激励频率下检测信号峰峰值有最大值, 由此得到所设计传感器最大检测灵敏度对应最佳激励频率为 50 kHz。

激励信号频率确定后, 需要对激励信号电压进行实验, 激励频率选择 50 kHz, 实验时激励电压以 2 V 为间隔从 2 V 逐渐增大到 20 V, 记录扫查时传感器输出

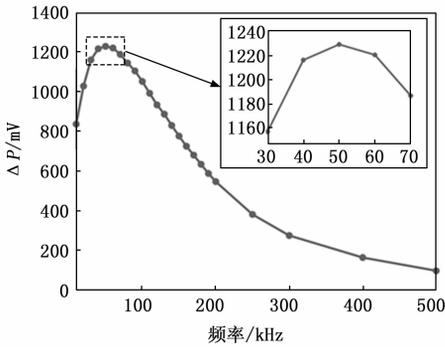


图 13 检测灵敏度随激励频率变化曲线

的检测信号，传感器检测灵敏度随激励电压变化曲线如图 14 所示。

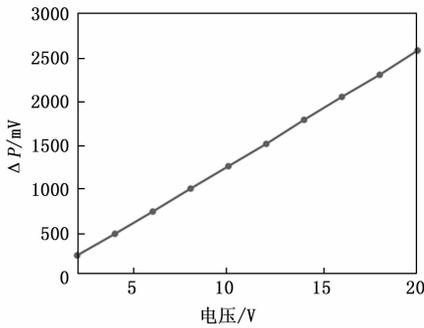


图 14 检测灵敏度随激励电压变化曲线

综合以上对激励频率和激励电压的实验，分析激励电压与传感器输出关系，电压的增大会使得缺陷信号更加明显，考虑传感器激励线圈电压承受能力，同时在硬件系统中常见的电源选择为±12 V，在留出 4 V 余量后，选定频率为 50 kHz、峰峰值电压为 20 V 的正弦波信号作为传感器激励信号。

3.1.2 实验系统搭建

分析上述实验结果分析，确定了激励频率为 50 kHz，激励峰峰值为 20 V 的正弦波为传感器最佳激励信号。对硬件电路进行修改后，基于第四章所设计其他硬件电路以及编写的上位机软件，实现了涡流检测设备的集成化，大大缩小了实验系统，改进之后的实验系统如图 15 所示。



图 15 集成化涡流检测系统

3.2 提离实验

涡流检测中提离效应会直接对检测结果造成影响，提离高度为传感器底部离试件的距离，对于所设计的传

感器来说，提离效应会影响传感器激励线圈激发涡流场强度和检测信号的强度，最终影响传感器对缺陷的检测能力。为研究提离效应对传感器的检测影响，同时对所设计涡流集成检测系统进行测试，在不同提离下对同一缺陷进行检测，缺陷尺寸设置为长 20 mm、宽 0.3 mm、深 2 mm，实验中分别设置探头与缺陷的垂直距离（即提离高度）为 0~10 mm，并以 1 mm 步进，激励频率与电压选用上文实验确定参数。实验中对缺陷进行检测时，传感器移动方式与上一节实验相同，只需要提取轴向线圈检测信号峰峰值，得到的传感器检测灵敏度随提离高度的变化曲线如图 16 所示。

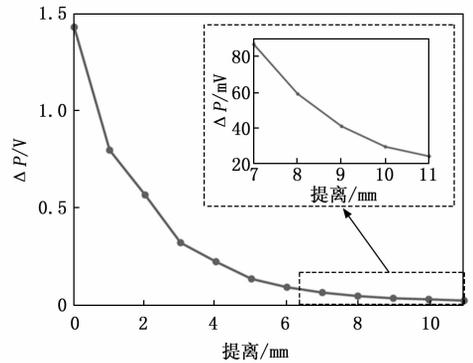


图 16 检测信号峰峰值随提离的变化曲线

通过对实验结果进行分析，发现检测信号随提离的变化与仿真中检测信号随提离变化趋势一致，提离增加导致激励线圈和检测线圈与试件的垂直距离增大，激励线圈所能在试件中引起的涡流场减弱，导致检测信号减弱，最终传感器对缺陷的检测灵敏度降低。由图 16 可得，当提离增加到 10 mm 时，虽然相比于小提离下检测信号的峰峰值减少许多，但是峰峰值仍旧有 29.5 mV，可清晰辨别出缺陷。

3.3 实验结果及主要技术参数分析

实验采用控制变量法对各个缺陷类型进行扫查，对缺陷扫查时提离高度设为 1 mm 模拟试件表面涂层厚度，记录保存轴向线圈与横向线圈数据，由于扫查方向垂直于缺陷长边，且扫查路线过各缺陷中点，在对长度、宽度、深度变化的缺陷从小到大进行扫查时，横向线圈由于关于缺陷时刻对称，两个线圈输出差分电压保持基准值不变，故仅对轴向线圈输出电压峰峰值进行提取分析。

每种不同类型不同尺寸的缺陷（如同深度、宽度、角度但不同长度缺陷）均设置 5 个不同尺寸，在试件上水平排列，传感器依次扫过。

传感器对不同长度的缺陷的扫查结果如图 17 所示，扫查缺陷长度分别为 5、10、15、20、25 mm，图（a）表示传感器轴向与横向线圈输出的差分电压，图（b）

表示对应轴向线圈的输出信号随缺陷长度变化产生的峰峰值变化。实验结果可知, 在缺陷长度变化时, 轴向线圈输出随着缺陷长度的增加不断增加, 检测灵敏度也随之增加, 同时检测灵敏度增长速度减缓。由图可以发现, 所设计的传感器对于长度大于 10 mm 的长度缺陷具有较为明显的检测能力, 而对于 5 mm 缺陷虽然有信号输出, 但却有一定变形。

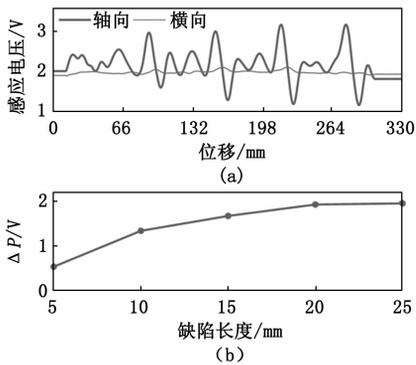


图 17 缺陷长度变化时传感器输出信号

对缺陷宽度分别为 0.1、0.3、0.5、0.75、1 mm 进行扫查, 实验结果如图 18 所示。在检测缺陷宽度变化时, 随着缺陷宽度增加, 由图 (b) 可知传感器检测灵敏度基本呈线性增加, 宽度不断增加导致其对涡流场扰动越大, 对于检测线圈所输出的信号也就越大, ΔP 随之增加。传感器可以明显实现对 0.1 mm 宽度缺陷的检测。

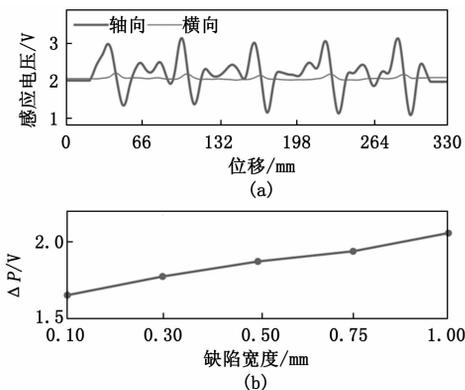


图 18 缺陷宽度变化时传感器输出信号

缺陷深度变化时的检测结果如图 19 所示, 图 (a) 中缺陷深度分别为 0.5、1、1.5、2、2.5 mm, 轴向线圈峰峰值随着深度的增加出现明显的上升趋势, 当缺陷深度增加时, 裂纹体积当量增大, 对于涡流场的扰动变大, 导致接收线圈的输出差分电压随之增大。传感器可以完成对低至 0.5 mm 深度缺陷的检出。

当缺陷角度变化时, 横向线圈关于缺陷不再对称, 扫查过程中缺陷引起的涡流场扰动会使得横向线圈差分

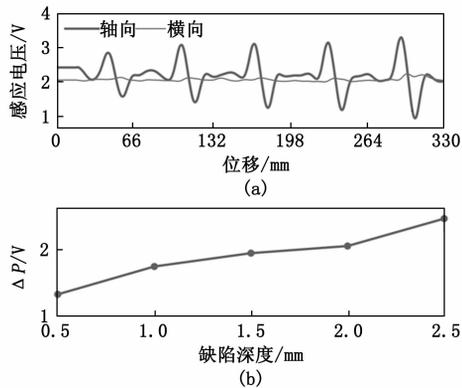


图 19 缺陷深度变化时传感器输出信号

输出也产生变化, 输出不再维持为基准值, 故角度缺陷研究需要对轴向线圈和横向线圈均进行研究分析, 缺陷角度指与传感器扫查路线的夹角, 缺陷扫查时传感器轴向线圈与横向线圈实验结果分别如图 20 和图 21 所示。两图分别表示轴向与横向线圈输出信号变化与检测灵敏度变化, 分析轴向线圈信号可以看出, 轴向线圈输出信号随着缺陷角度增加逐渐减小, 在 60° 时取得最小值, 当缺陷角度大于 60° 时信号逐渐上升。

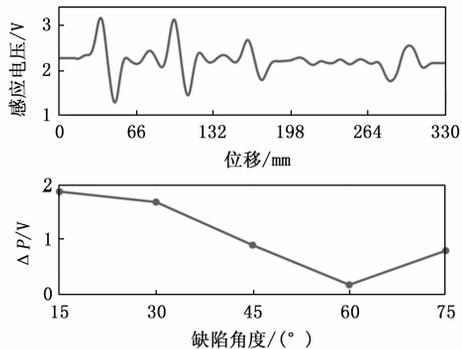


图 20 传感器轴向线圈输出信号

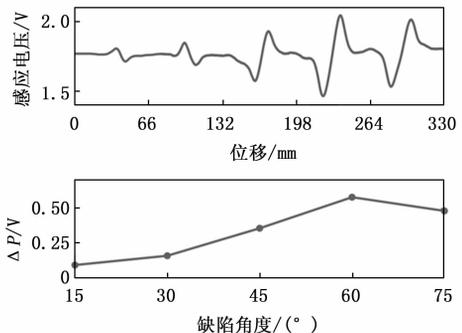


图 21 传感器横向线圈输出信号

单独两线圈信号无法直接有效表征缺陷角度, 因此对两线圈信号进行再差分。差分信号如图 22 所示, 从图中可以看出随着角度的增加, 传感器输出缺陷信号逐

渐减小, 在 60° 之前缺陷信号明显, 75° 时产生一些畸变, 但仍旧存在波峰波谷。故传感器可以实现 75° 以下缺陷检出。

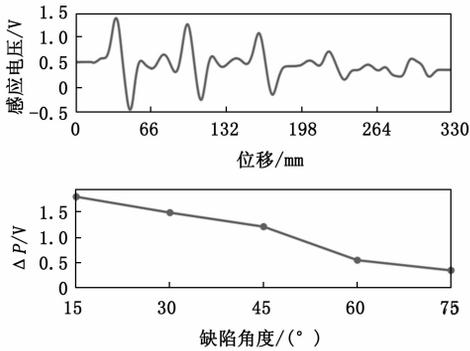


图 22 轴向横向信号再差分之后信号

4 结束语

本文针对带涂层压力容器表面的不去涂层检测需求, 对比常见检测技术优缺点, 选用非接触式、灵敏度高、适用性广、检测范围大、检测速度及效率高的阵列涡流检测技术作为检测手段。本文开展了基于阵列涡流检测技术对不去涂层的压力容器表面缺陷检测研究, 提出一种由一个激励线圈与两组检测线圈组成的阵列涡流传感器, 搭建实验平台通过仿真与实验相结合的方法验证传感器的可行性, 并进行检测系统的硬件集成化设计, 实现对不同种类缺陷的检测。实验结果表明: 所设计的检测系统最小可以实现 5 mm 长度缺陷、0.1 mm 宽度缺陷、0.5 mm 深度缺陷以及低于 75° 的角度缺陷的检出。电磁涡流无损检测技术可有效地在不去涂层情况下对压力容器的表面缺陷进行检测, 同时设计的集成化涡流检测系统为涡流检测仪器化提供参考。

参考文献:

- [1] CHEN S L, CHEN C L, TIN C C, et al. An experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 23 (3/4): 133-144.
- [2] 王明生, 庄文斌, 张国兴. 大型电厂锅炉高温热腐蚀防护研究进展综述 [J]. *沈阳工程学院学报 (自然科学版)*, 2023, 19 (3): 40-44.
- [3] 渠沛然. 石油石化储运罐区“安全锁”待升级 [N]. *中国能源报*, 2023-03-27 (008).
- [4] 齐国利. 中国工业锅炉定型产品变化情况研究 [J]. *中国特种设备安全*, 2020, 36 (1): 2-6.
- [5] 刘 晴, 赵得强, 李 京, 等. 油气储运管道的腐蚀机理与防腐技术研究 [J]. *全面腐蚀控制*, 2023, 37 (8): 123-124.
- [6] SEREDNYTSKYA. Polyurethane materials as anticorrosive coatings of pipelines [J]. 2000, 36 (3): 415-421.
- [7] 王永才, 厉嘉滨, 王 海, 等. 液化天然气储罐用水性防腐涂层体系的制备与应用研究 [J]. *涂料工业*, 2020, 50 (10): 39-43.
- [8] CHANG J I, LIN C C. A study of storage tank accidents [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19 (1): 51-59.
- [9] ZHANG L. Application of nondestructive testing in inspection of boiler and pressure vessel and pressure piping [J]. *Tehnic Kivjesnik*, 2021, 28 (6): 1864-1870.
- [10] 张颖志, 徐志祥. 带涂层金属零件表面缺陷的无损检测综述 [J]. *仪器仪表与分析监测*, 2015 (2): 1-5.
- [11] KASAI N, TAKADA A, FUKUOKA K, et al. Quantitative investigation of a standard test shim for magnetic particle testing [J]. *Ndt & E International*, 2011, 44 (5): 421-426.
- [12] KUTMAN M K, MUFTULER F Z B, HARMANSAH C, et al. Use of bacteria as fluorescent penetrant for penetrant testing (PT) [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39: 1-6.
- [13] LIU B, LUO N, FENG G. Quantitative study on mfl signal of pipeline composite defect based on improved magnetic charge model [J]. *Sensors*, 2021, 21 (10): 3412.
- [14] 梁丽华, 贺建军. 电磁感应技术在压力容器无损检测中的应用 [J]. *中国设备工程*, 2011 (9): 5-7.
- [15] ALI K B, ABDALLA A N, RIFAI D, et al. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization [J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2017, 11 (4): 338-351.
- [16] RIFAI D, ABDALLA A N, RAZALI R, et al. An eddy current testing platform system for pipe defect inspection based on an optimized eddy current technique probe design [J]. *Sensors*, 2017, 17 (3): 579.
- [17] 胡 健, 张子健, 沈建民, 等. 基于阵列涡流和全聚焦相控阵技术的承压设备应力腐蚀开裂检测 [J]. *无损检测*, 2021, 43 (5): 12-15.
- [18] GARCÍA M J, GÓMEZ G J, VÁZQUEZ S E. Non-destructive techniques based on eddy current testing [J]. *Sensors*, 2011, 11 (3): 2525-2565.
- [19] CHEN K, GAO B, TIAN G Y, et al. Differential coupling double-layer coil for eddy current testing with high lift-off [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21 (16): 18146-18155.
- [20] YAO Z, PAN J, YU C, et al. A universal digital lock-in amplifier design for calibrating the photo-detector responses with standard black-bodies [J]. *Sensors*, 2023, 23 (21): 8902.