DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3274

基于 LabVIEW 的远场涡流检测扫查系统研究

张一冲,路　浩,邢立伟,张　洁
(西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710065)

摘　要:针对金属构件近表面存在的裂纹缺陷,基于远场涡流检测法,建立了包含运动扫查平台、信号激励、数据采集等模块的远场涡流检测扫查系统。运动扫查平台利用 PLC 控制步进电机带动三维扫查架运动;编写 LabVIEW 数据采集程序,控制 NI 采集卡对检测信号进行采集,在 LabVIEW 软件与 PLC 之间使用 MX 组件通讯,使 LabVIEW可以访问 PLC 的寄存器,读取三维扫查架各轴位移信息,软件与硬件相结合,实现缺陷的自动化检测。设计了 2 种不同类型的缺陷,实验结果表明,随着缺陷埋深减少及缺陷宽度增大,得到的缺陷信号也在变大,实际缺陷位置与检测到的缺陷位置误差为 0.001 mm;同时,该方法能够检测出最大埋深为 5 mm、宽度为 0.2 mm 的矩形缺陷。

关键词:远场涡流;LabVIEW 软件;运动检测;缺陷埋深

中图分类号:TG142.15　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)04-0369-07

Research on a Far-field Eddy Current Detection Sweep System Based on LabVIEW

ZHANG Yichong, LU Hao, XING Liwei, ZHANG Jie
(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: For crack defects near the surface of metal components, based on the far-field eddy current detection method, a far-field eddy current detection sweeping system that includes a motion sweeping platform, signal excitation, data acquisition and other modules is established. The motion sweep platform uses PLC to control the stepping motor to drive the three-dimensional sweep frame movement. A LabVIEW data acquisition program was written to control the NI acquisition card to collect the detection signal, and MX components were used to communicate between the LabVIEW software and PLC so that LabVIEW could access the PLC's registers to read the three-dimensional sweep frame displacement information of each axis. Automated detection of defects was achieved by combining software and hardware. Two different types of defects were designed. The experimental results show that with decreasing defect depth and increasing defect width, the obtained defect signal also increases, and the error between the actual defect position and the detected defect position is 0.001 mm; at the same time, the method is able to detect rectangular defects with a maximum depth of 5 mm and width of 0.2 mm, which proves the feasibility of the method.

Key words: far-field eddy current; LabVIEW software; motion detection; buried depth of defect

无损检测[1]作为目前最常用的一种检测金属缺陷的方式,是指在检查机械材料内部不损害或不影响被检测对象[2]使用性能,不伤害被检测对象内部组织的前提下,利用材料内部结构异常或缺陷[3]引起的热、声、光、电、磁等[4]反应变化,以物理或化学方法为手段,借助现代化技术和设备,对试件内部及表面结构[5]、状态及缺陷类型、数量、形状、性质、位置、尺寸、分布及其变化进行检查和测试的方法[6]。

涡流检测作为无损检测技术的一种,其利用电磁感应原理[7],通过测量被检工件内感生涡流的变化[8]来无损地评定导电材料及其工件的某些性能,或发现材料表面和内部缺陷。因此,将涡流检测技术运用到金属材料[9]检测中,可以准确检测出金属材料存在的缺陷,然后通过成像技术[10]将缺陷的大小、深度以图像的形式分级展现出来,对后续评估及修复有着重要的意义。

收稿日期:2023-11-20

作者简介:张一冲,1998 年生,硕士生.研究方向为无损检测.Email: 1764401806@qq.com

通讯作者:路　浩,1981 年生,博士,教授.研究方向为焊接工艺、焊接结构力学及可靠性、焊接检测技术、无损检测技术.
Email: lhhit9@163.com

引用格式:张一冲,路浩,邢立伟,等.基于 Labview 的远场涡流检测扫查系统研究[J].铸造技术,2024,45(4): 369-375.
ZHANG Y C, LU H, XING L W, et al. Research on a Far-field eddy current detection sweep system based on LabVIEW[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 369-375.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

传统涡流检测法受趋肤效应影响，随检测深度的增加，缺陷信号或电导率的变化急剧下降，导致检测失效。远场涡流[11]属于低频涡流检测技术，相比于传统涡流检测，远场涡流检测法受趋肤效应影响小，其检测结果可以直接以电信号[12]输出，进行自动化检测；采用非接触式，检测效率明显提升，并能够检测构件内部近表面缺陷，特别适合用于板材、管材表面及近表面缺陷检测。

程军等[13]在涡流法的基础上，提出了一种基于LabVIEW的二维连续扫查系统，利用电机驱动位移平台对大尺寸构件进行平面扫查，采用晶振时钟脉冲作为采集数据的触发时钟，试验结果得到的裂纹位置与实际裂纹位置基本一致，并能检测出深度为2 mm的缺陷。陈涛等[14]研究了超声检测技术对铝板缺陷检测时近表面埋深缺陷检测盲区问题，利用涡流检测铝板近表面缺陷，观察线圈内径、激励频率等对探头灵敏度的影响，设计了用于铝板浅层埋深检测的涡流探头，实现最大埋深为3 mm、最小宽度为0.1 mm的铝板人工缺陷检测。Zhang等[15]针对复杂表面检测时，难以直观反应缺陷大小、位置等的问题，利用柔性涡流阵列探头对汽轮机叶片缺陷进行扫描，为了增加线圈的电感值，在线圈中间增加铁芯，提高探头检测缺陷的分辨率。实验结果表明，采用该探头检测出的缺陷大小、位置与实际情况一致。李睿等[16]基于涡流法检测油气管道裂纹缺陷机理，设计出一种裂纹检测系统，通过研制不同结构参数的探头，实现宽1 mm的表面裂纹检测。实验结果表明，增加线圈匝数、减小线圈高度可以提高线圈检测能力。杨戈等[17]研究出一套自动化涡流检测系统，设计了多种典型涡轮叶片专用探头，实现了航空发动机涡轮叶片自动化检测，提高了叶片的检测效率。原鹏等[18]针对包覆层下管道腐蚀引起局部减薄对生产造成重大安全隐患的问题，提出利用信号特征评估管道缺陷，通过分析脉冲涡流时域特征信号，提取检测出的电压差分峰值特征量，得到差分电压峰值与缺陷深度之间的关系。实验表明，随着缺陷深度和宽度的增加，差分峰值随之增加，该方法对解决包覆层下管道缺陷具有重要应用价值。秦建柱等[19]通过电磁仿真软件建立三维仿真模型，研制出一种新型横向激励探头。用新型探头对铜管试件人工周向裂纹进行检测，可以有效检测出长度为2 mm的缺陷。

目前，大多数研究主要集中检测构件表面缺陷方面，对近表面缺陷研究较少，且最大检测埋深大多为3 mm左右，因此，需加强对近表面缺陷的检测，并提高检测埋深的范围，以更全面地解决实际应用中的问题。

本文基于远场涡流检测法，建立了包含运动扫查模块、信号激励、采集模块等的远场涡流检测扫查系统。其中，运动扫查模块利用PLC控制步进电机带动三维模组扫查架运动，实现了对金属构件近表面缺陷的自动化检测。该系统能够检测出最大埋深为5 mm的裂纹缺陷，并生成幅值变化图像[20]，为缺陷分析提供参考。

1 远场涡流三维扫查系统

涡流自动化检测系统分为运动扫查平台、信号激励、数据采集等模块。其中运动扫查平台主要由控制器(PLC)、步进电机、驱动器、三维扫查架组成。信号激励模块主要由函数发生器、涡流线圈组成。数据采集显示模块主要由数据采集卡、上位机、Labview软件组成。

涡流线圈由激励线圈、接收线圈组成，函数发生器产生3 V、500 Hz的正弦波作为涡流线圈的激励信号。激励线圈与函数发生器的CH1通道连接，正弦波通过CH1通道将激励信号传送至激励线圈，接收线圈与NI数据采集卡相连。当试件中有缺陷时，涡流分布会发生变化，影响涡流产生的磁场分布，这个磁场反作用对接受线圈中的阻抗造成影响，导致检测线圈输出的电压信号会在幅值、峰值等处发生变化[21]，数据采集卡将变化的幅值采集上传至上位机。

PLC控制三维运动平台带动涡流探头扫描缺陷，Labview程序通过串口读取三维平台的位移信息保存至上位机中，平台位移信息与缺陷信号同步采集，最终将数据上传至上位机分析处理。系统总体框图如图1所示。

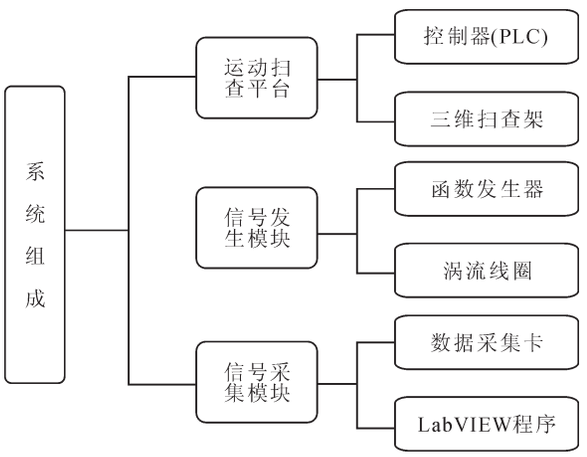

图1 系统框图
Fig.1 System block diagram

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　远场涡流硬件设计

2.1　运动平台

运动平台主要包括主控制器(PLC)、触摸屏、三维扫查架、步进电机、驱动器。运动平台参数如表 1 所示。

表1 运动平台参数表

Tab.1 Parameters of the motion platform

Parameters	Length/mm	Width/mm	Height/mm
Value	800	700	500

主控制器选用三菱 FX5U 型号的 PLC，具有丰富的内置功能，包括内置模拟量输入输出，以太网端口、高速计数和脉冲输出功能，其本体自带轴定位功能，不需要其他模块便可以实现三轴线性运动和定位。

步进电机的输出位移与所输入脉冲数成正比，转动速度与单位时间输入的脉冲数 (即脉冲频率)成正比，转动方向与各相绕组的通电顺序有关。因此，控制输入脉冲数量、频率以及电机绕组通电顺序，便可控制步进电机的输出位移、速度和方向。实验采用 57 式两相四线步进电机，其扭矩为 1.2 N/m，步距角为 1.2°。当步进电机动作时，驱动电流应选择合适的值，电流过大或者过小均会使电机出现丢步、过载等现象，从而导致运动平台不能正常工作，故控制驱动电流在 2~3 A。

三维运动平台使用 PLC 作为主控制器，通过编写梯形图语言使 PLC 发出脉冲信号来控制步进电机，以滚轴丝杆作为传动机构实现快速、精准运动。在触摸屏上编写虚拟按钮，输入控制平台运动信息；PLC 发出脉冲信号至驱动器，驱动器将脉冲信号转化为角位移信号驱动步进电机转动，电机带动滚轴丝杆旋转，滑块置于丝杆上，实现滑块在 x、y、z 三维空间运动，位置精度可以达到 0.5 mm，运动速度为 5~200 mm/s，三维运动平台如图 2 所示。

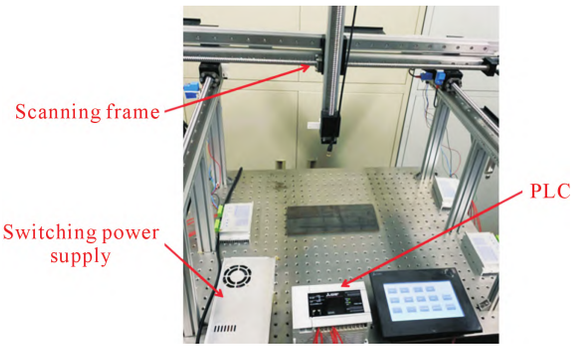

图 2　三维运动平台实物图

Fig.2　Physical drawing of the 3D motion platform

2.2　扫查方式

扫查平台采用平面连续扫查的方式。即探头在每一行扫描期间，只经历一次加速、等速和减速过程，而非通过多个短程的小段移动来累积。这样的扫查方式极大地减少了速度变化的频率，不仅提高扫查效率，还能有效减小加减速操作对采样数据带来的影响。

实验采用连续扫查的方式，探头扫查轨迹如图 3 所示，即从原点开始，沿着 x 轴方向持续运动，运动至右限位点停止，接着沿着轴方向运动设定距离，然后继续沿着 x 轴反向运动，到达左限位点后再沿着 y 轴方向运动设定距离，此为 1 个扫描周期。这种扫查方式不仅提高了扫查速率，而且解决了探头多次匀速加速的过程，使得采集到的数据与空间位置一一对应，让缺陷检测更加准确，以便后期分析。

3　远场涡流采集软件设计

3.1　激励信号输入控制

实验采用函数发生器作为激励信号的输入源。函数发生器是一种电子测试设备，可以产生三角波、矩形波等波形的电信号，在使用时需要手动调节按键、旋钮才能输出相应的波形，为了能够方便快捷地产生激励线圈所需要的波形信号，用 LabVIEW 软件编写程序，实现函数发生器的自动控制。

NI 公司开发的虚拟仪器软件架构 (virtual instruments software architecture, VISA)，是用于与各种仪器进行通信的软件接口标准，用户可以调用 VISA 库函数，配置不同的仪器参数，编写各种 IO 接

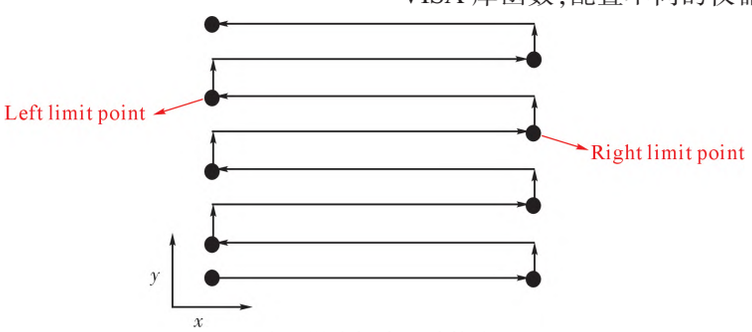

图 3　涡流探头运动轨迹

Fig.3　Eddy current probe trajectory

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

口仪器程序。通过调用 VISA 库函数编写 LabVIEW 程序实现自动控制函数发生器产生相应波形，程序如图 4 所示。

3.2 LabVIEW 与 PLC 通讯

使用 LabVIEW 与 PLC 进行通讯的目的是在三维运动平台带动涡流探头运动的过程中，LabVIEW 能够读取运动平台的位移信号，从而使空间位置与缺陷信号一一对应。

三维平台在运动时，各轴的位移信息会存储在 PLC 内部的寄存器中，使用 MX(MX component)组件及编写相应的 LabVIEW 程序可以将寄存器中的位移信息读取出来。三菱的 MX 组件是三菱官方提供的通信软件包，专门用于 PC 与三菱 PLC 之间的通信，通过使用这个工具，可以在无需具备通信协议及模块知识的状况下，实现从计算机第三方软件至可编程控制器的通信。通过属性节点和调用节点实现 LabVIEW 对三菱 PLC 寄存器访问，进行数据提取，程序框图如图 5 所示。

3.3 数据采集

数据采集部分通过使用 LabVIEW 软件和NI-6009 数据采集卡相结合的方式，在 DAQmx 模块的基础上实现数据的采集、处理、显示及存储。

在数据采集程序中主要使用 DAQmx 创建虚拟通道，不同类型的虚拟通道所实现的功能不同，本实验选用的虚拟通道类型为 AI 电压。根据电涡流位移传感器输出参数对 AI 电压虚拟通道的输入端口进行相应的设定，便可以对传感器输出的信号进行采集。当数据采集模块采集到电涡流位移传感器的输出信号时，需要对采集到的信号进行数据处理。对于数据处理程序的设计，主要使用 LabVIEW 软件自带的选项板来完成程序的设计。具体数据采集和处理程序如图 6 所示。

4 实验设计与检测实验

4.1 实验设计

以钢板作为研究对象，在两块相同尺寸(长250 mm、宽 50 mm、高 6 mm)的钢板上线切割加工出两种不同的缺陷。图 7a 的尺寸为 50 mm×0.2 mm×H(长×宽×埋深)，H 分别为 5、4、3、2 mm 的 4 种等距(两两之间间隔 50 mm)矩形裂纹缺陷；图 7b 的尺寸为 50 mm×W×1 mm (长×宽×埋深)，W 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 mm 的 4 种等距(两两之间间隔 50 mm)矩形裂纹缺陷。

4.2 缺陷检测

基于法拉第电磁感应定律，远场涡流检测通过探头进行扫描，探头包含激励线圈和接收线圈。当激励线圈通过交变电流时，会在导体附近产生一个电涡流，同时电涡流会产生一个磁场，该磁场会与探头的接收线圈相互作用。当导体内部出现损伤时，会对电涡流造成影响，导致反作用于接收线圈的电磁场导常，具体表现为接收线圈上的感应电压变化。

在涡流检测时，当导体中有缺陷(如裂纹、夹杂

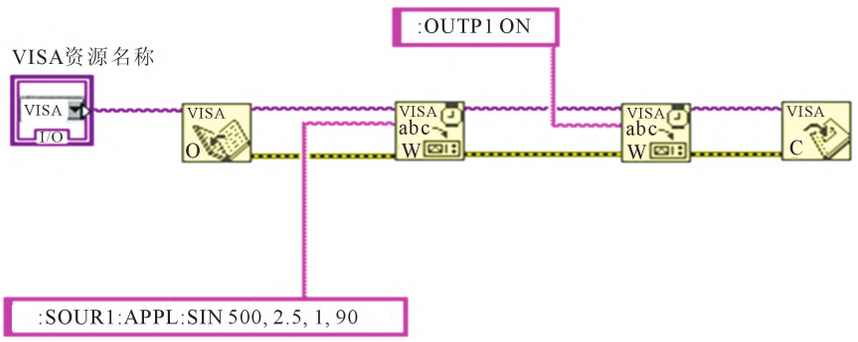

图 4 函数发生器控制程序框图
Fig.4 Block diagram of the function generator control program

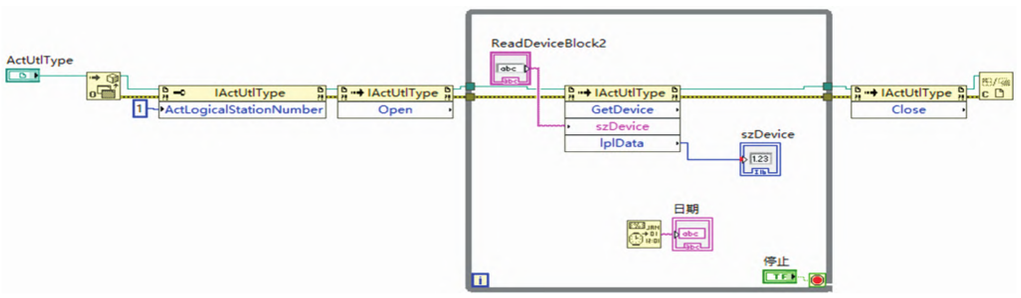

图 5 LabVIEW 与 PLC 通讯框图
Fig.5 Block diagram of communication between LabVIEW and PLC

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

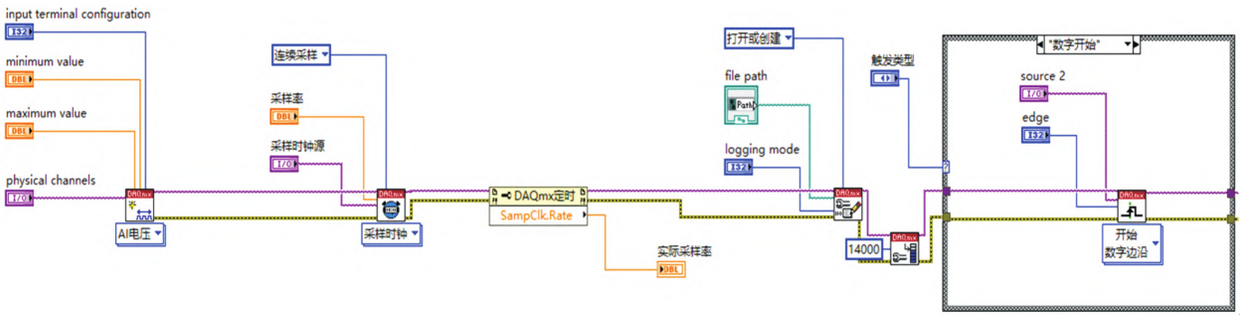

图 6 数据采集框图

Fig.6 Data acquisition block

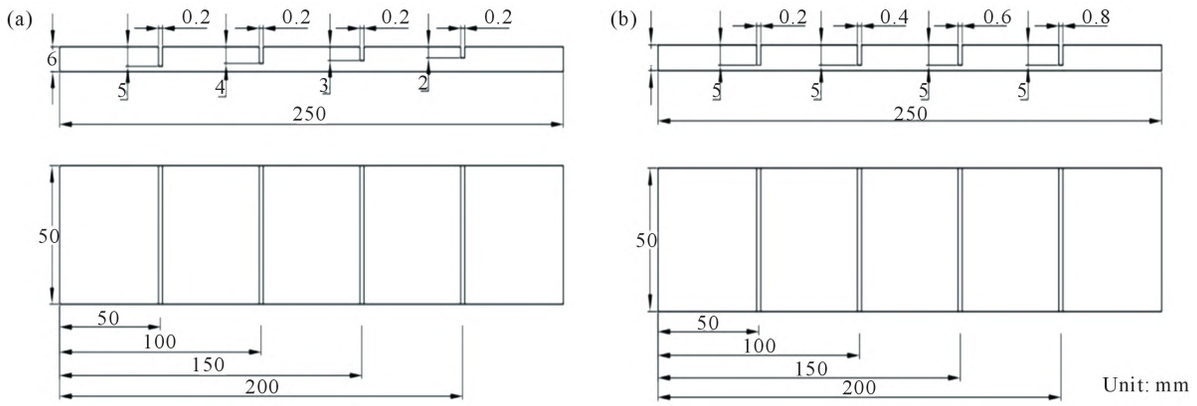

图 7 缺陷加工件：(a) 不同深度；(b) 不同宽度

Fig.7 Defective machining specimens: (a) different depths; (b) different widths

物等)，涡流会在缺陷附近产生畸变，这种畸变会改变检测线圈中感应电动势的幅值和相位。当缺陷深度或宽度增加时，涡流受到的阻碍作用会更大，因为缺陷越深或越宽，涡流需要克服的介质阻力就越大。这种阻碍作用会使涡流在缺陷处的流动受到更大限制，导致涡流的幅值增大。因此，检测幅值会随着缺陷深度和宽度的增加而增大。

对钢板埋深缺陷进行远场涡流检测，涡流探头提离高度为 3 mm，激励线圈与接收线圈中线点距离固定为 20 mm，以 3 V 交流电压、500 Hz 正弦波作为涡流探头的激励信号。在钢板无缺陷时，用涡流探头对其进行检测，幅值变化如图 8 所示。

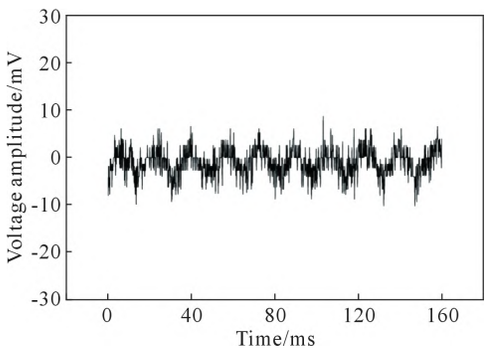

图 8 无缺陷时电压幅值变化

Fig.8 Voltage amplitude variation without defects

将探头静止放置于有缺陷的钢板上，在相同条件下对钢板上的缺陷进行逐个检测，缺陷幅值变化见图 9。图 9a 为缺陷宽度相同(均为 0.2 mm)，改变埋深所得到的幅值变化图像；图 9b 为缺陷埋深相同(均为 1 mm)，改变宽度所得到的幅值变化图像。

对得到的幅值图像取其中一部分峰值数据分析得到图 10。从图 9 和 10 中仔细观察，确实有部分数据不符合幅值变化趋势，这可能是由于系统在采用 PLC 与数据采集卡直接通讯时，数据传输过程中存在部分丢失和偏差。此外，涡流探头在检测缺陷时可能受到外界环境的干扰，这也可能导致数据的偏差。

从图 10a 中可以看出，在宽度不变的时候，改变缺陷距离表面的距离，随着距离越来越近，峰峰值呈现增大的趋势；同样，从图 10b 中可以看出，在深度不变，改变缺陷的宽度，随着宽度增加，峰峰值也在逐步增大。

将探头固定在三维运动平台的 z 轴上，检测缺陷件时，x 轴带动涡流探头由试验件首端开始沿着 x 方向直线运动，运动至试验件末端(即运动轨迹规划的右限位点)，此时 x 轴停止运动，y 轴启动，沿着 y 方向运动相应的距离，然后 y 轴停止运动，x 轴重新启动，沿着 x 方向运动至左限位点。运动平台带动涡流探头匀速运动，扫查钢板上的所有缺陷，幅值变化如图 11 所示。通过图 11a 可以看出，在距钢板边缘 5、10、15、20 cm 处，幅值均有明显波动，随着缺陷距

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

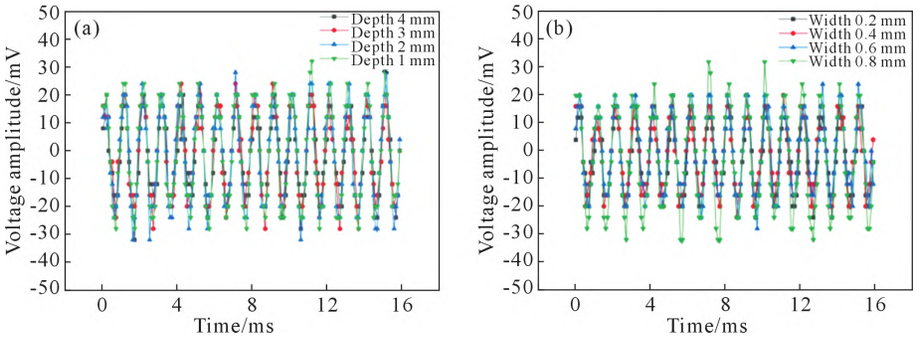

图 9 缺陷加工件电压幅值变化:(a) 不同深度;(b) 不同宽度

Fig.9 Voltage amplitude changes in the defective processed parts: (a) different depths; (b) different widths

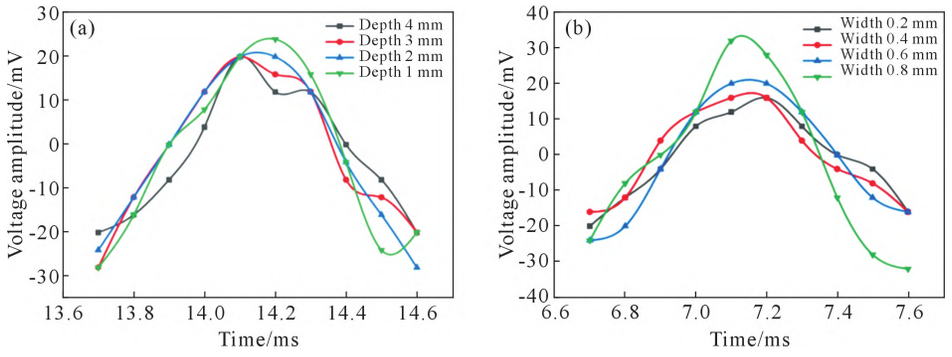

图 10 缺陷加工件电压峰值变化:(a) 不同深度;(b) 不同宽度

Fig.10 Peak voltage variation of the defective processed parts: (a) different depths; (b) different widths

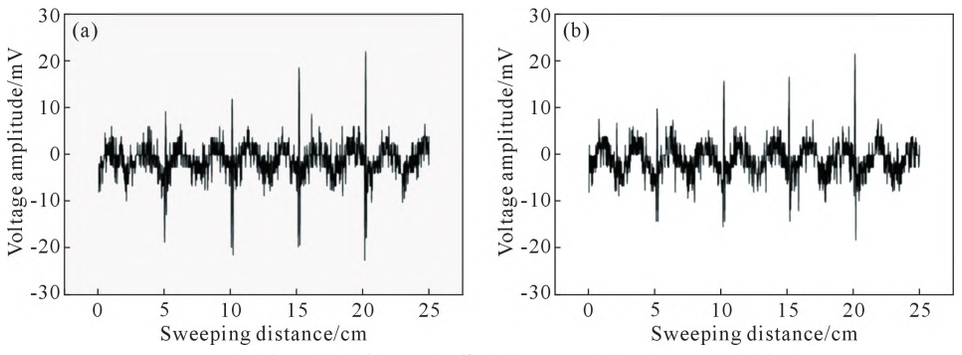

图 11 连续扫查缺陷件电压幅值变化:(a) 不同深度;(b) 不同宽度

Fig.11 Successive sweeps of defective parts showing voltage amplitude changes: (a) different depths; (b) different widths

离表面越来越近，幅值在也增大。图 11b 也有同样的规律,随着缺陷宽度的增加,幅值逐步增大,最小缺陷与最大缺陷幅值相差 15 mV 左右,缺陷幅值变化明显。

5 结论

(1)采用 PLC 控制运动平台,通过 LabVIEW 软件编写程序与 PLC 通讯,实现了不需要借助其他硬件便可读取运动平台的位置信息。通过实验调试证明LabVIEW 软件与 PLC 之间通讯实现信息传递的可行性。

(2)从实验结果中可以看出,涡流探头在运动时检测到的缺陷幅值与探头静止放置于缺陷上时所检测出的幅值变化趋势一致，与预期结果相符;同时,该系统在理论上能够对最大埋深为 5 mm、最小宽度为 0.2 mm 的一般性缺陷进行检测。然而,实际应用中可能需要根据具体情况进行实验验证和校准,以确保准确的检测结果。

参考文献:

[1] 黄松岭,彭丽莎,孙洪宇,等. 航空发动机叶片缺陷无损检测与在线监测技术综述[J]. 测控技术,2023, 42(5): 1-11.
HUANG S L, PENG L S, SUN H Y, et al. Review of nondestructive testing and online monitoring technologies for aero-engine blade defects[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(5): 1-11.

[2] 吕敬祥,徐楚雯. 铝合金材料缺陷检测的磁声电方法[J/OL]. 材料科学与工艺,2023. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1345.TB.20231114.1610.002.html.
LV J X, XU C W. Magneto-acoustic and electrical method for defect detection of aluminum alloy materials[J/OL]. Materials Science and Technology, 2023. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1345.TB.20231114.1610.002.html.

[3] 徐卓. 无损检测技术在压力管道检验中的运用[J]. 化工管理, 2023 (31): 113-115.
XU Z. Application of non-destructive testing technology in pressure piping inspection[J]. Chemical Enterprise Management, 2023 (31): 113-115.

[4] 刘海朝,胡圣忠,梁海明,等. 脉冲涡流检测技术在工业管道检测中的应用[J]. 中国特种设备安全,2023, 39(S2): 81-85.
LIU H Z, HU S Z, LIANG H M, et al. Application of pulsed eddy current detection technology in industrial pipeline inspection[J]. China Special Equipment Safety, 2023, 39(S2): 81-85.

[5] 霍奕宇. 无损检测在埋地金属管道检测中的应用研究[J]. 内燃机与配件,2023(18): 105-107.
HUO Y Y. Research on application of non-destructive testing in buried metal pipeline inspection[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(18): 105-107.

[6] 潘年德. 无损检测技术在锅炉压力管道检验中的应用研究[J]. 中国机械,2023(12): 82-85.
PAN N D. Application of nondestructive testing technology in boiler pressure pipe inspection[J]. Mechine China, 2023(12): 82-85.

[7] 孙艳秋. 电涡流传感器的技术优势及应用[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(3): 99-100.
SUN Y Q. Technical advantages and applications of eddy current sensors[J]. Electronic Components & Materials, 2014, 33(3): 99-100.

[8] 王振飞. 基于低频涡流检测的轴承钢识别与分类方法研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
WANG Z F. Research bearing on steel the identification based on low and classification frequency eddy method current of detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2023.

[9] 黄伟. 钢板无损检测中超声探伤技术的应用分析[J]. 冶金管理, 2023(6): 58-63.
HUANG W. Application analysis of ultrasonic flaw detection tech nology in nondestructive testing of steel plates[J]. China Steel Focus, 2023(6): 58-63.

[10] 马浩. 基于涡流热成像原理的钢桥浅层缺陷无损检测研究[D]. 南京:南京林业大学,2023.
MA H. Study on non-destructive testing of shallow defects in steel bridges based on eddy current thermography principle[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.

[11] 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.
XIAO Q, XU Z Y, WU Q. Outside inspection method for carbon steel pipe defects based on remote field eddy current[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(11): 1684-1689.

[12] 胡敏,郭强,习向东,等. 玻璃钢管材新型无损检测研究进展[J]. 材料导报,2023. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html.
HU M, GUO Q, XI X D, et al. Research progress of new nondestructive testing of GFRP pipes[J]. Materials Reports, 2023. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html.

[13] 程军,李晴,游勇,等. 基于 LabVIEW 的电涡流检测二维连续同步扫查系统设计[J]. 计算机测量与控制,2020, 28(9): 42-45, 52.
CHENG J, LI Q, YOU Y, et al. Design of 2D continuous synchronous scanning system for eddy current detection based on LabVIEW[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(9): 42-45, 52.

[14] 陈涛,曹恒,张赛,等. 涡流检测在铝板超声缺陷检测盲区中的应用研究[J]. 2021, 40(7): 13-16.
CHEN T, CAO H, ZHANG S, et al. Application study of eddy-current detection in blind zone of ultrasonic defect testing for aluminum-plate[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(7): 13-16.

[15] ZHANG W P, WANG C L, XIE F Q, et al. Defect imaging curved surface based on flexible eddy current array sensor[J]. Measurement, 2019, 151: 107280.

[16] 李睿,王长新,富宽,等. 油气管道裂纹涡流检测探头的研制[J]. 无损检测,2023, 45(2): 60-65.
LI R, WANG C X, FU K, et al. Development of eddy current probe for crack inspection of oil and gas pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(2): 60-65.

[17] 杨戈,王婵,张翼,东宋凯. 航空发动机涡轮叶片涡流自动化检测试验研究[J]. 失效分析与预防,2022, 17(5): 334-339.
YANG G, WANG C, ZHANG Y, et al. Test study of automatic eddy current detection of aero-engine turbine blade[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(5): 334-339.

[18] 原鹏,魏治杰,王恪典,等. 脉冲涡流技术对包覆层管道缺陷检测 [J]. 机械设计与制造,2023, 319(9): 55-58, 63.
YUAN P, WEI Z J, WANG K D, et al. Pulse eddy current technology for detection of coating pipe defects[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, 319(9): 55-58, 63.

[19] 秦建柱,唐甸武,殷尊,等. 小径管周向裂纹涡流检测仿真与试验研究[J]. 压力容器,2022, 39(12): 23-29.
QIN J Z, TANG D W, YIN Z, et al. Simulation and experimental study on eddy current testing of circumferential cracks in small diameter pipes[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(12): 23-29.

[20] RIFAI D, ABDALLA A N, RAZAIL 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.

[21] RODRIGUEZ S, GAYOUX V, DUCASSE E, et al. Ultrasonic imaging of buried defects in rails[J]. NDT & E International, 2023, 133: 102737.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net