

基于 LSTM 的 ACFM 在线缺陷判定方法

卞向南¹, 高 宇², 王宇欣², 郑岳山², 袁新安³, 李春棚³, 尚亚期³

(1. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;
3. 中国石油大学(华东) 海洋油气装备与安全技术研究中心, 青岛 266580)

摘要: 交流电磁场检测(ACFM)技术在进行缺陷判定时, 存在检测数据追溯、现场判定缺陷困难等问题。分析了 ACFM 检测信号特征, 开发了一种部署在云服务器上的在线数据存储、检测信息显示以及缺陷智能判定的方法。该系统主要由检测仪与云端服务器组成, 检测时仪器采集检测信号, 将检测信息实时传输至云服务器, 云服务器存储检测信息并通过网页显示, 同时基于长短期记忆神经网络(LSTM)的缺陷判定算法分析检测信息并返回结果至检测仪。以铝板试件作为检测对象, 对系统进行功能测试。试验结果表明, 开发的在线缺陷判定算法实现了交流电磁场检测系统数据存储、信息查看、缺陷判定的目标。

关键词: 交流电磁场; 缺陷判定; 云服务器; 长短期记忆神经网络

中图分类号: TP216; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)02-0040-04

ACFM online defect determination method based on LSTM

BIAN Xiangnan¹, GAO Yu², WANG Yuxin², ZHENG Yueshan², YUAN Xin'an³, LI Chunpeng³, SHANG Yaqi³

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 3. Center for Offshore Equipment and Safety Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: When the alternating current field measurement(ACFM) technology is used for defect determination, there are some problems such as traceability of detection data and difficulty in determining defects on site. The characteristics of ACFM inspection signals is analyzed in this thesis, and the method is proposed which deploys online data storage, inspection information display, and intelligent determination of defects method on the cloud server. The detection system is mainly composed of a detector and a cloud server. The instrument collects detection signals and transmits the detection information to the cloud server in real time. The cloud server stores the detection information and displays it on the web. At the same time, the detection information is analyzed by the defect judgment algorithm based on long short-term memory neural network (LSTM), and the results are returned to the detector. Taking the aluminum plate specimen as the detection object, the functional test of the experimental system is carried out. The experimental results show that the developed online defect determination algorithm achieves the goals of data storage, information viewing and defect determination in the ACFM detection system.

Key words: alternating current electromagnetic field; defect determination; cloud server; long short-term memory neural network

交流电磁场检测技术(ACFM)具有无需耦合

剂、对提高不敏感等优点, 被广泛应用于核电、水下结构、压力容器、航空航天等领域的无损检测中^[1-2]。

目前交流电磁场检测设备在进行缺陷判定时, 存在检测数据追溯、现场判定缺陷困难等问题。针对上述问题, 分析了交流电磁场检测的信号特征, 研究了一种部署在云服务器上的在线数据存储、检测

收稿日期: 2022-08-17

基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX06002006)

作者简介: 卞向南(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为核电厂非标设备设计

通信作者: 袁新安(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能可视化无损检测技术, xinancom@upc.edu.cn

信息显示以及缺陷智能判定的方法。

1 交流电磁场检测原理

交流电磁场检测技术的检测原理为:当通入交流电的激励线圈靠近被测铁磁性材料时,交变磁场作用于被测件使其产生感应电流。当被检件表面无缺陷时,在被检件表面会产生相互平行的均匀感应电流;当存在缺陷时,材料的缺失导致电导率不连续,使得感应电流在缺陷两端与底部绕过,产生不均匀分布的感应电流,从而引起空间中的磁场变化,通过磁传感器拾取磁场畸变信号,即可实现缺陷的检测^[3-4]。交流电磁场检测原理示意如图 1 所示,图中 B_x 为 x 方向的磁感应强度, B_z 为 z 方向的磁感应强度。

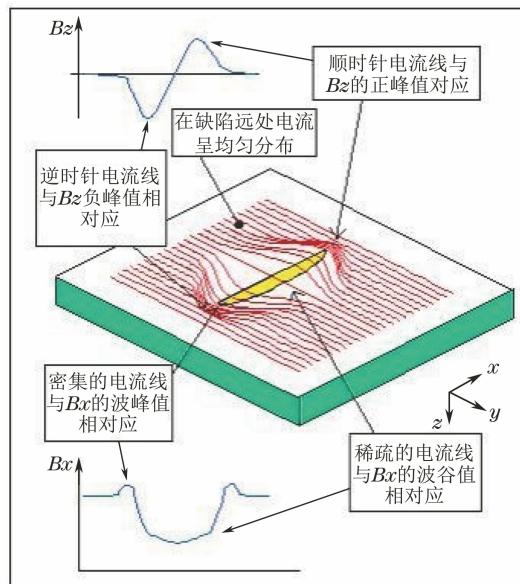


图 1 交流电磁场检测原理示意

2 检测信号分析与 LSTM 算法原理

如图 1 所示,ACFM 检测时,缺陷处磁场信号变化曲线在 x 方向上呈现凹坑状,在 z 方向上呈波峰波谷状,在无缺陷处检测信号基本为直线,构建判断形状信息的算法模型即可实现缺陷判定^[5]。

形状分类可以使用神经网络算法,其中循环神经网络(RNN)多用于处理时间序列算法,但由于检测信息数据量较大,笔者选择循环神经网络算法中的长短期记忆神经网络(LSTM)算法,可以解决长时间序列带来的梯度爆炸或消失问题。

3 LSTM 缺陷智能判定算法

采集缺陷处与非缺陷处的具有典型形状特征的

检测信息,建立数据库,构建 LSTM 神经网络模型并进行计算,分析训练结果并进行验证。

3.1 检测信息收集

首先建立检测信息数据库,收集 100 组缺陷处与非缺陷处 B_x 与 B_z 方向的检测信息,包括 50 组不同长度、深度缺陷的检测信息,其中参杂有略微抖动的检测信号;50 组无缺陷的检测信息,其中包括提离信号以及抖动信号等。典型的检测信息示例如图 2 所示。

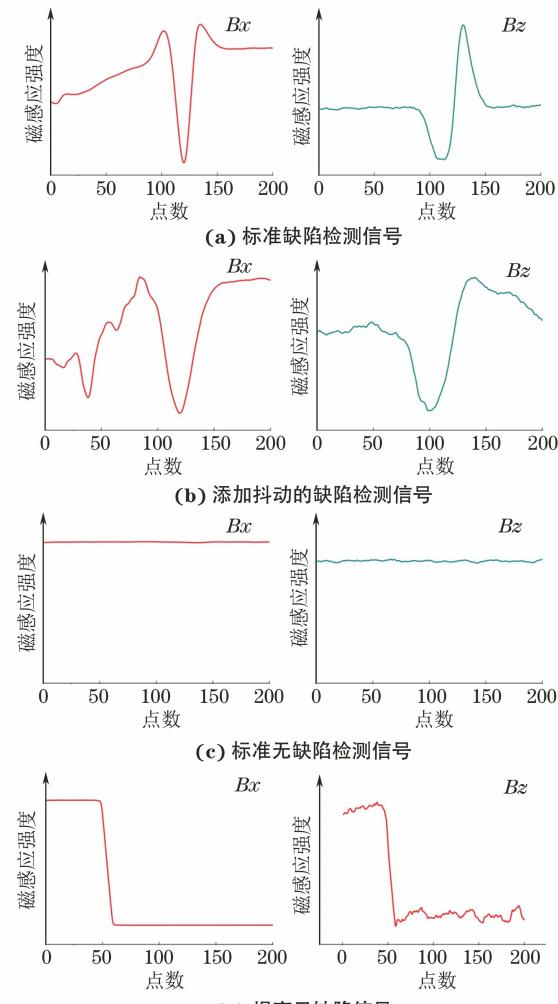


图 2 典型的检测信息示例

由于数据库包含了不同缺陷处的检测信息,每组信号磁场强度各不相同,为了更好地反映形状特征,需对每组信息进行处理,将每组数据扩充或压缩,保证每组信息维度为(2,200),并对其进行归一化与标定。将 100 组数据按 7:3 的比例分为训练集与验证集,训练集与验证集中缺陷处信息组数与无缺陷信息组数比例为 1:1。

3.2 LSTM 模型构建与计算

使用 MATLAB 软件构建神经网络模型,

LSTM 神经网络模型如图 3 所示, 图中左侧为模型代码, 右侧为神经网络工具箱设计的神经网络, 共分为 7 层, 分别为输入层、两层 LSTM 隐藏层、两层全连接层、softmax 层、输出层^[8]。

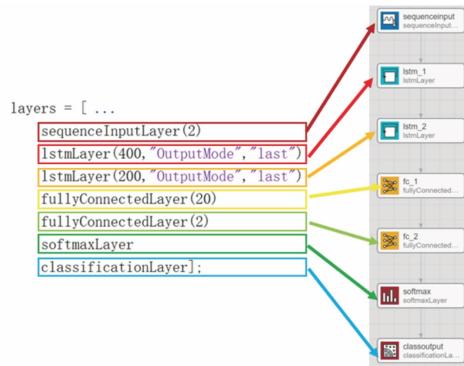


图 3 LSTM 神经网络模型

3.3 训练结果分析

对训练完成的 LSTM 模型进行测试, LSTM 模型训练结果如图 4 所示, MATLAB 软件高度集成了训练集与验证集的计算过程, 在计算结束后可以很直观地看到训练结果, 其中 30 组验证集数据的准确率为 93.33%。

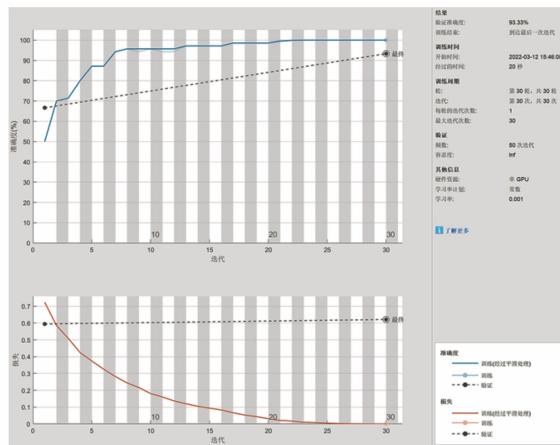


图 4 LSTM 模型训练结果

4 在线判定方法研究

通过搭建云服务器, 部署缺陷智能判定算法, 实现了检测数据的实时传输、存储与缺陷判定。

4.1 云服务器软件开发

服务器软件端结构如图 5 所示, 服务器使用 Flask 架构进行开发^[8]。服务器软件开发分为 3 部分, 即数据接收与储存、缺陷判定算法、前端显示。检测仪通过 Wi-Fi 实时传输数据至云服务器进行存储, 部署在云服务器上的缺陷判定算法在线判定检测信息并将结果反馈给检测仪, 同时工作站人员可

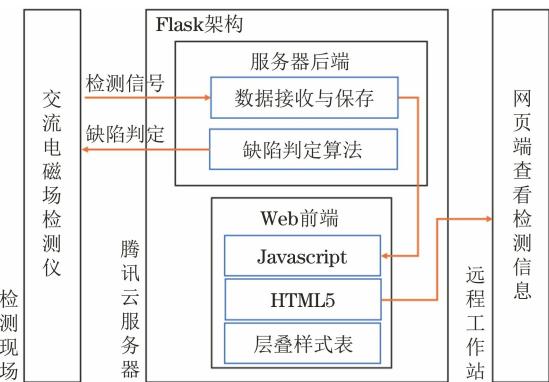


图 5 服务器软件端结构示意

以登录网页端查看检测信息。

4.2 部署在线缺陷判定算法

手持检测探头平稳地扫描缺陷, 由于每次扫描速度以及缺陷尺寸不同, 会使得缺陷处检测信息长度亦不相同, 同时实时上传的检测数据为持续增长数据, 故在线缺陷判定算法有两个难点, 即缺陷不定长输入问题与数据的持续输入问题, 为此笔者使用多线程并发竞争方法进行算法部署。

(1) 解决缺陷不定长输入问题

创建 5 个进程, 分别将 50 个、100 个、150 个、200 个、250 个 B_x 与 B_z 检测点信息扩充或压缩至 200 个, 将处理后的检测数据代入缺陷判定算法模型计算结果, 当存在任意进程得到计算结果为“yes”时, 则表示检测到缺陷信息。

(2) 解决数据持续输入问题

以 50 个点的读取进程为例, 第一次读取第 0~49 个检测信息点并扩充至 200 点, 代入缺陷检测模型计算, 第二次读取第 4~54 点, 依次递推 5 个点进行检测, 当判定检测到缺陷时, 通知其他 4 个进程从当前位置开始新一轮检测。

5 实际检测

搭建交流电磁场检测系统, 使用检测仪扫描带有人工裂纹的试块, 测试该系统的检测能力与缺陷判定算法的识别能力。

5.1 检测系统

交流电磁场检测系统构成如图 6 所示, MCU (微控制单元) 控制信号发生器与功率放大器产生激励信号作用于激励线圈, 磁传感器拾取磁场信息, 经由信号放大电路、滤波与 RMS-DC (交流转直流) 电路, 由 MCU 采集信号并通过 Wi-Fi 将检测数据实时传输至远程服务器^[9]。该系统主要由交流电磁场检测仪、检测探头、被检件、网页端等构成。

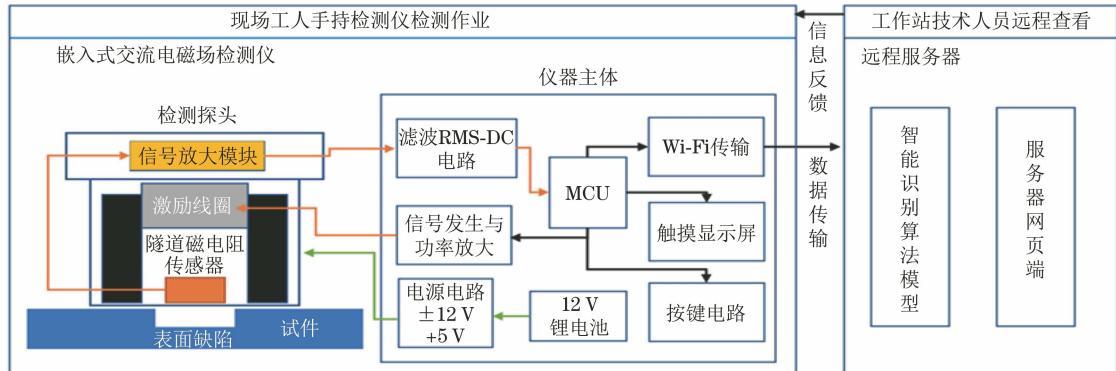


图 6 交流电磁场检测系统构成

5.2 检测对象

检测对象为带有人工裂纹的铝板试件,其实物如图 7 所示,缺陷 1~5 长度相同,深度递减,缺陷 6~10 深度相同,长度递增,最小裂纹尺寸为 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (长 \times 深)。

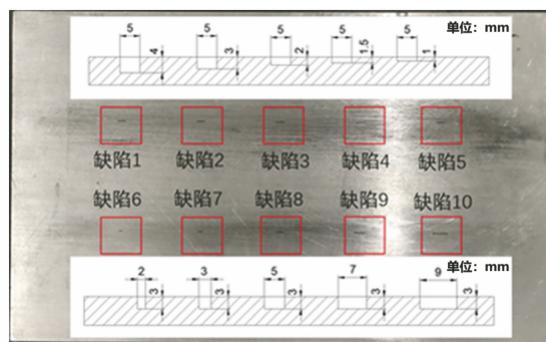


图 7 铝板裂纹试件实物

5.3 检测结果

手持探头贴紧铝板试件,从缺陷 5 匀速扫描到缺陷 1,得到的缺陷特征信号 B_x 和 B_z 如图 8 所示;然后从缺陷 6 匀速扫描到缺陷 10,其检测结果如图 9 所示。

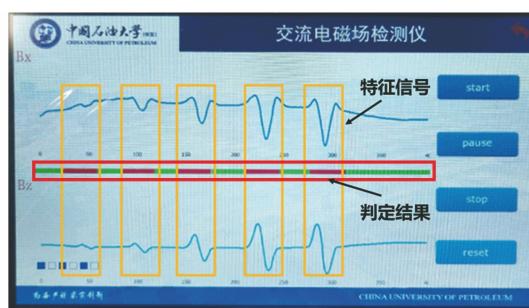


图 8 缺陷 1~5 检测结果(上 B_x ,下 B_z)

图 8,9 中 B_x, B_z 特征信号处分别对应图 7 中的缺陷 1~10,中间部分表示缺陷判定算法返回结果,红色条状表示对缺陷进行预警提示。试验结果表明,该系统可以在线检出铝板长 2 mm,深 3 mm 的微小裂纹并对缺陷进行准确判定。

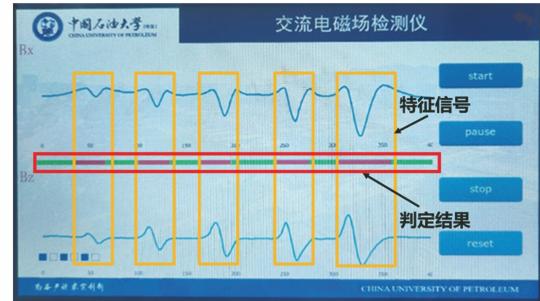


图 9 缺陷 6~10 检测结果(上 B_x ,下 B_z)

6 结语

针对交流电磁场检测中的检测数据追溯、现场判定缺陷困难等问题,分析检测信号特征,收集并建立检测信号数据库,开发了基于 LSTM 的智能缺陷判定算法,进行了模型构建、计算与验证,并进行云服务器软件开发与缺陷判定算法部署,搭建了一套完善的检测系统。

开展了铝板裂纹检测试验,试验结果表明所开发的基于 LSTM 的 ACFM 在线缺陷判定算法能实现交流电磁场检测数据实时传输、存储与缺陷判定,对交流电磁场检测技术的应用和改进有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] 葛玖浩,杨晨开,胡宝旺,等.交流电磁场检测技术钢轨表面裂纹高速检测研究[J].机械工程学报,2021,57(18):66-74.
- [2] 王景林,任尚坤,张丹,等.基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究[J].中国测试,2019,45(1):40-46.
- [3] 袁新安,李伟,殷晓康,等.基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究[J].机械工程学报,2020,56(10):27-33.

(下转第 65 页)

的裂纹检测试验系统,获取环形激励线圈的结构参数对裂纹检测性能的影响规律,得出了以下结论。

(1) 降低线圈高度、增加线圈匝数可以显著提高探头的裂纹检测灵敏度。线圈高度 h 由 7 mm 降低至 5 mm 时,探头的裂纹检测灵敏度增加 48.14%;匝数 z 由 100 匝增加到 200 匝,灵敏度增加了 58.68%。

(2) 研制的裂纹涡流检测探头可以实现 1 mm 宽度裂纹的有效识别,同时该探头对管道自然裂纹具备一定的识别能力。

参考文献:

- [1] 《中长期油气管网规划》发布[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 114.
- [2] 陈金忠, 段礼祥, 马义来, 等. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测数值计算[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 113-117.
- [3] 胡朋, 陈金忠, 康小伟, 等. 长输油气管道内检测数据的比对[J]. 无损检测, 2021, 43(7): 90-94.
- [4] 辛佳兴, 陈金忠, 李晓龙, 等. 油气管道内检测技术研究前沿进展[J]. 石油机械, 2022, 50(5): 119-126.
- [5] 陈金忠, 王俊杰, 马义来, 等. 基于电流测量的管道阴极保护状态内检测技术[J]. 无损检测, 2018, 40(6): 9-11, 31.
- [6] SHI Y, ZHANG C, LI R, et al. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15 (12): 31036-31055.
- [7] SONG S P, NI Y J. Ultrasound imaging of pipeline crack based on composite transducer array [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31 (1): 1-10.
- [8] 沈佳园, 熊治坤, 张响, 等. 小口径漏磁内检测磁化装置的设计与运动分析[J]. 无损检测, 2022, 44(3): 27-31.
- [9] AHMADIAN MAZRAEH A, ISMAIL F B, KHAKSAR W, et al. Development of ultrasonic crack detection system on multi-diameter PIG robots[J]. Procedia Computer Science, 2017, 105: 282-288.
- [10] YANG L J, HUANG P, BAI S, et al. An effective method for differentiating inside and outside defects of oil and gas pipelines based on additional eddy current in low-frequency electromagnetic detection technique[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59(9): 096505.
- [11] SHE S B, CHEN Y F, HE Y Z, et al. Optimal design of remote field eddy current testing probe for ferromagnetic pipeline inspection[J]. Measurement, 2021, 168: 108306.
- [12] 王志刚, 罗清旺, 师奕兵, 等. 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.
- [13] 周德强, 闫向阳, 尤丽华, 等. 脉冲涡流矩形传感器参数的仿真优化与实验[J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (5): 13-16.
- [14] 黄松岭, 徐琛, 赵伟, 等. 油气管道变形涡流检测线圈探头的有限元仿真分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(3): 390-394.
- [15] 赵宏达, 任学冬, 乔海燕, 等. 托卡马克内部线圈导体偏心缺陷涡流检测探头参数优化[J]. 无损检测, 2016, 38(5): 14-17.
- [16] 姜贺. 涡流检测阵列探头信号数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

(上接第 43 页)

- [4] 郑玲慧, 任尚坤, 王景林. ACFM 技术的表面裂纹识别和尺寸反演算法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(5): 80-85, 106.
- [5] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks

(1): 81.

- [6] 李冰洁. MATLAB 图像处理技术在车牌识别中的应用[J]. 上海电气技术, 2022, 15(1): 45-48.
- [7] 李相霏, 韩珂. 基于 Flask 框架的疫情数据可视化分析[J]. 计算机时代, 2021(12): 60-63, 68.
- [8] 胡四海, 李志华. 基于 STM32 和 LabVIEW 的无线温湿度检测系统[J]. 中国测试, 2015, 41(5): 99-102.