

无线自动爬行漏磁检测仪的开发研制

沈功田^{1,3}, 武新军², 郭 锴³, 万 强³, 李 建¹

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074;

3. 中特检科技发展(北京)有限公司, 北京 100029)

摘 要: 根据压力容器、压力管道和大型常压储罐长周期运行不停机检测的迫切需求, 基于漏磁检测原理, 并采用无线遥控电机驱动、可调节可浮动传感器、基于无线局域网的数据传输与通讯等先进技术, 研制了无线自动爬行漏磁检测仪。该检测仪可对铁磁性管状或板状构件的腐蚀等缺陷进行有效的检测与评估。仪器主要由驱动模块、传感模块、信号处理模块、位置记录装置及信号采集与分析软件组成。经测试及现场应用证明, 该仪器可检测出 8 mm 厚板或管试件上 $\phi 1.6$ mm 的通孔和 $\phi 10$ mm \times 20% 壁厚的球形孔缺陷, 具有较高的检测灵敏度。

关键词: 漏磁; 无线遥控; 无线数据传输; 铁磁构件; 检测仪

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)08-0001-06

Development of Wireless and Automatic Crawling Instrument Based on Magnetic Flux Leakage Technique

SHEN Gongtian^{1,3}, WU Xinjun², GUO Kai³, WAN Qiang³, LI Jian¹

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Zhongtejian Technology & Development (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: Due to the urgent need of long-periodic safe running and in-service testing for pressure vessel, pressure piping and large-scale atmospheric tank, the wireless and automatic crawling instrument has been developed based on the principle of magnetic flux leakage testing technique. Some advanced technology such as wireless remote control, adjustable and floating sensor, and wireless local area network (WLAN) data transmission and communication have been utilized in this instrument. The equipment is mainly composed of drive module, sensor module, signal processing module, device of recording signal positions and signal acquisition and analysis software. It can make effective detection and assessment about corrosion defects for ferromagnetic specimens. The instrument has a high detection sensitivity through testing and field application. It can detect man-made defects of $\phi 1.6$ mm hole and $\phi 10$ mm \times 20% thickness spherical pit for pipes and plate specimens with 8mm thickness.

Key words: magnetic flux leakage; wireless remote control; WLAN data transmission; ferromagnetic specimens; testing instrument

压力容器、压力管道和大型常压储罐在石油化

工、冶金、制药、食品等领域得到了广泛的使用。然而这些设备及装置的安全事故却时有发生, 造成了严重的环境污染、经济损失, 甚至危及人身安全, 而腐蚀是其主要失效模式之一^[1]。为了满足我国对能源的需求和降低生产成本, 我国大型石化装置常处于长周期运行状态。为了确保这些设备的安全运行, 业内对不停机检测设备的需求变得较为迫切。

漏磁(MFL)检测方法是一种电磁无损检测方

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目 (2012YQ090175)

作者简介: 沈功田(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为声发射、红外和电磁等无损检测新技术

通信作者: 沈功田, shengongtian@csei.org.cn

法,适合检测腐蚀等体积型缺陷,其具有磁吸附特性以及无需耦合剂的特点,易于实现检测的自动化,在压力容器、压力管道和大型常压储罐的不停机检测中逐步得到了推广与应用。然而,现有漏磁检测仪器多为手动式^[2],检测费工费时,且易受操作人员影响,高空作业时还需搭建脚手架,不仅增加了检测成本,还增加了安全风险,有时不可能进行不停机检测。

根据压力容器、压力管道和大型常压储罐长周期运行不停机检测的需求,同时为了提高检测可靠性及检测效率,降低检测成本和规避安全风险,笔者所在课题组在国家重大科学仪器设备开发项目的支持下,开发了能够满足现场工况需求的无线自动爬行漏磁检测仪。笔者将对这台先进仪器的整机设计、硬件开发、软件开发、整机和性能测试及现场应用情况进行系统介绍。

1 漏磁检测方法概述

漏磁检测方法的原理示意如图1所示。当铁磁性构件被外加磁化器磁化后,构件内可产生磁场,若构件上存在腐蚀或机械损伤等缺陷,其磁导率将会变小、磁阻变大,从而使磁力线泄漏到构件外部,构件表面形成漏磁场;此时,如在磁化器中部放置一个磁场传感器(通常采用霍尔元件或线圈等磁场传感器),则可探测到该漏磁场,由于漏磁场强度与缺陷深度和大小有关,因此可通过对漏磁场信号的分析来获得构件上缺陷的情况。图2为测量不同漏磁场分量时的典型信号示意^[3]。

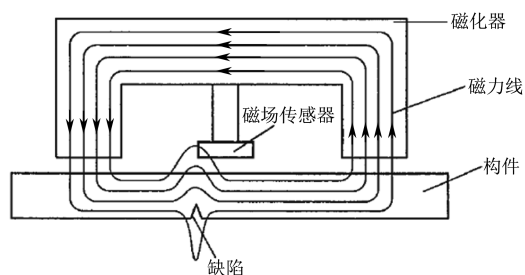


图1 漏磁检测原理示意

从图1可知,漏磁检测方法可对铁磁性构件进行非接触扫查检测,但不能用于非铁磁性构件的检测。在检测铁磁性构件时,虽然会受到扫查速度与方向、提离值、被检工件的几何尺寸和电磁特性及检测仪器的磁化能力等因素的影响^[3],但该方法具有的非接触特性,使得通常情况下无需对被检件表面进行特殊处理,具有检测速度快、成本低的优点,既可用于制造过程中的检测,还可用于在役和在线检测,故研制相应检测仪器具有重要意义。

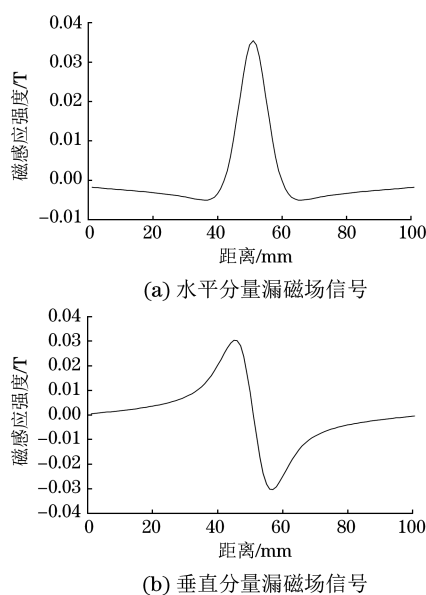


图2 典型漏磁信号示意

2 整机设计

为提高研制效率和便于调试改进,采用模块化的设计思想对自动爬行漏磁检测仪进行整体设计。该仪器应具有扫查运动、传感、信号采集与处理、指令与信号无线传输、信号存储与分析的功能,这些功能由驱动、传感和信号处理模块实现。

图3为漏磁检测仪总体结构框图。其中,驱动模块用于实现和控制检测仪的扫查运动。出于安全因素的考虑,需确保运动控制指令无线传输的实时性和可靠性,为此将该类指令的传输功能列入驱动模块中实现。传感模块用于拾取铁磁性构件表面的漏磁场并将其转换为电信号,以便后续处理。信号处理模块用于对传感模块获取的电信号进行放大、滤波、A/D转换、存储、显示、分析等处理,以及对检测控制指令和检测信号进行无线传输。此外,还需

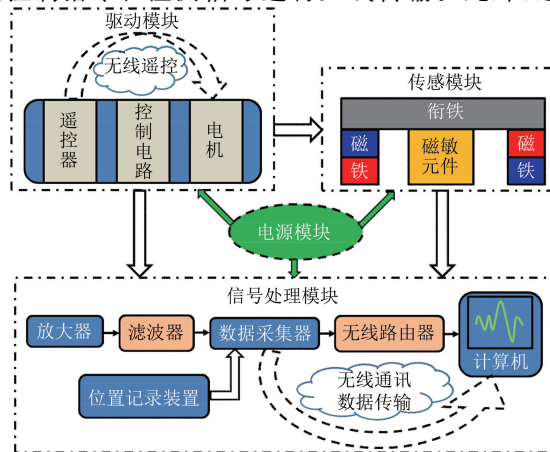


图3 漏磁检测仪总体结构框图

电源模块对上述 3 个模块供电。

3 硬件开发

硬件开发主要包括驱动模块、传感模块、信号处理模块和电源模块的硬件开发。

3.1 驱动模块

驱动模块需实现和控制检测仪的扫查运动,且应确保运动控制指令无线传输的实时性和可靠性,因而其主要由图 4 所示的无线遥控器、控制电路和电机等组成。其中,无线遥控器用于发送运动指令,选用频率为 2.4 GHz 的工业遥控器即可满足现场遥控操作的要求^[2]。控制电路用于接收运动指令,并根据运动指令控制电机的正转、反转和停止,从而控制检测仪的前进、后退和停止。为保障爬行器运动的可靠性及检测的安全性,爬行器每个轮子都配有 1 个 24 V 供电的电机。

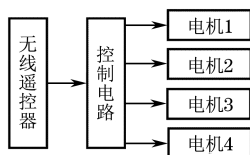


图 4 驱动模块结构框图

3.2 传感模块

传感模块应具有拾取铁磁性构件表面的漏磁场并将其转换为电信号的功能,因而其主要由图 5 所示的磁化器和磁感装置组成,前者用于磁化被检测对象,后者用于拾取漏磁场并将其转换为电信号。

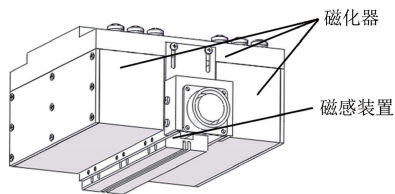


图 5 漏磁检测仪传感模块结构示意图

为磁化被检测对象,同时便于漏磁场的拾取,磁化器主要由磁铁和衔铁组成。其中,磁铁选用高磁能积、高矫顽力的 N52 磁铁作为磁源;衔铁选用磁导率高且易加工的低碳钢制成,以便形成磁路对被检测对象进行磁化。

为拾取漏磁场并将其转换为电信号,磁感装置内安装有体积小、灵敏度高且性能稳定的霍尔元件。在霍尔元件两侧,布置有高磁导率材料制成的聚磁片,以提高霍尔元件的有效检测范围并均化漏磁信号^[5]。为使传感模块具有一定的越障能力,将霍尔元件与聚磁片安装于传感支架上,在弹簧和外力的

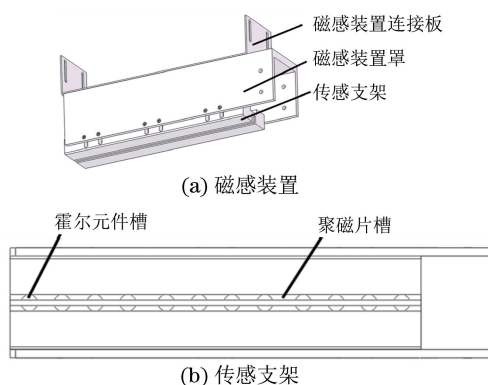


图 6 磁感装置结构示意图

作用下随着传感支架在磁感装置罩内移动,移动的最大行程由安装在磁感装置罩上的限位螺钉限定。为获得较高信噪比的漏磁检测信号,需使传感模块工作在提离最优的情况下,而最优提离与被检对象和工况有关,因而传感模块的提离设计成可通过磁感装置连接板上的螺钉位置来调节。

3.3 信号处理模块

信号处理模块需具有对传感模块获取的电信号进行放大、滤波、A/D 转换、存储、显示、分析等处理的功能,以及具有对检测控制指令和检测信号进行无线传输的功能,据此开发的漏磁信号处理模块硬件结构框图如图 7 所示。信号处理硬件模块包括预处理单元(放大、滤波)、A/D 转换单元、FPGA(现场可编程门阵列)以及 WIFI 通讯单元等。其中信号预处理单元负责漏磁模拟数据的放大、滤波与多通道选择。对于局部急剧变化的信号,采用交流放大,消除信号中的低频或直流分量;对于缓慢变化的信号采用直流放大^[6]。A/D 转换单元负责将漏磁模拟信号转换为数字信号,通过 FPGA 控制 A/D 芯片进行模/数转换,将采集到的数字信号通过 WIFI 通讯单元传输至计算机^[7-8]。WIFI 通讯单元具有无线网络通讯功能,通过 TCP/IP 协议与计算机进行交互,传递数据、指令及信息等。

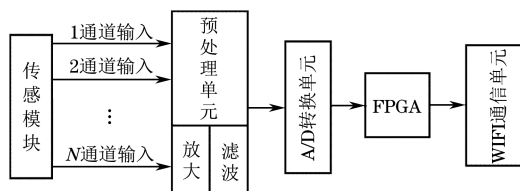


图 7 漏磁信号处理模块硬件结构框图

此外,当漏磁检测传感器在扫查时,还需根据检测信号对缺陷进行定位分析,因而选用旋转编码器记录位置信息,在此基础上设计的位置记录装置如图 8 所示。该位置记录装置由编码器、编码器罩、轮

轴、行走轮和轮架组成,其中,编码器罩与轮架相连,编码器的转动轴与行走轮的轮轴相连;当行走轮滚动时带动编码器旋转,检测仪在扫查的同时,漏磁信号的位置信息也被记录。

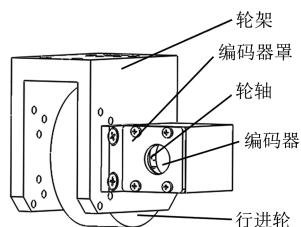


图8 位置记录装置结构示意图

3.4 电源模块

电源模块用于对驱动模块、传感模块及信号处理模块供电。为减小驱动模块对传感模块及信号处理模块的影响,以及满足连续供电6 h以上的要求,同时考虑到整机的便携性,选用容量为5 200 mA·h,输出电压为24 V,尺寸(长×宽×高)为144 mm×43 mm×60 mm的锂电池为驱动模块的电机供电;选用容量为10 000 mA·h,输出电压为5 V,尺寸(长×宽×高)为91 mm×60.4 mm×22 mm的锂电池为传感模块中的霍尔元件及信号处理模块中的放大器、滤波器、数据采集器和位置记录装置供电。

4 信号采集与分析软件开发

为便于无线自动爬行漏磁检测仪的使用,在VC平台下开发了配套的信号采集与分析软件,其主要界面如图9所示。

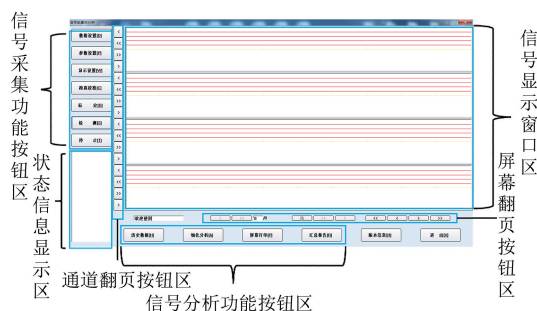


图9 信号采集与分析软件主界面

信号采集与分析软件的主界面包括信号采集功能按钮区、信号分析功能按钮区、信号显示窗口、状态信息窗口、屏幕翻页按钮区和通道翻页按钮区。信号采集功能按钮区与信号分析功能按钮区用于对漏磁检测数据进行采集显示、存储、分析等操作,其主要包括检测、显示设置、历史数据、汇总报告等功能按钮。点击检测按钮时,弹出文件存储对话框,操作者可可将数据存储为自定义文件格式,与此同时多

通道漏磁数据以曲线形式显示于信号显示窗口区;点击显示设置按钮可以调整显示方式包括对数据波形的整体放大或缩小、显示范围及通道选择显示等;点击历史数据按钮可对已储存的漏磁数据进行显示分析;点击汇总报告按钮,可生成检测记录及漏磁检测报告^[3,9]。信号显示窗口用于将漏磁数据以波形方式显示出来,其上面设有信号阈值线,不同阈值范围的信号以不同的颜色显示,便于观察分析漏磁检测结果。状态信息窗口用于显示漏磁检测数据的文件名、时间、操作员等信息。屏幕翻页按钮区及通道翻页按钮区用于对漏磁数据进行翻页显示,方便查找漏磁异常信号的位置。信号采集与分析软件界面简洁、操作方便、功能完善、易于升级,实现了对漏磁数据的采集显示、存储、显示、分析等多种功能。

操作软件进行信号采集及分析的主要流程如下:点击检测按钮,数据采集器将获取的漏磁信号通过无线局域网(WLAN)实时传输至计算机,并以波形的形式动态显示于软件的“信号显示窗口区”,仪器操作者可以实时观察检测信号;点击停止按钮,漏磁检测数据将以文件的形式存储在计算机中。点击历史数据按钮可查看已经保存的漏磁检测数据,点击屏幕翻页按钮可对检测的所有漏磁数据进行查看并查找疑似的缺陷信号。缺陷信号的波形峰值较大,且波形颜色以红色或黄色显示;且典型的漏磁缺陷波形信号类似为正弦波、余弦形、单峰形或单谷形等,这些特征可用于漏磁缺陷的识别。

5 整机与性能测试

5.1 整机

研制的无线自动爬行漏磁检测仪整机实物图片如图10所示。在用该仪器对被检测对象进行检测时,通过遥控器控制检测仪扫查行进,仪器在电机驱动下对被测对象进行扫查,同时位置记录装置记录采集的漏磁数据的位置信息,数据通过无线网络传输至计算机,当探头完成对整个对象扫查后,用计算机软件对检测的数据进行存储、读取、显示、分析等

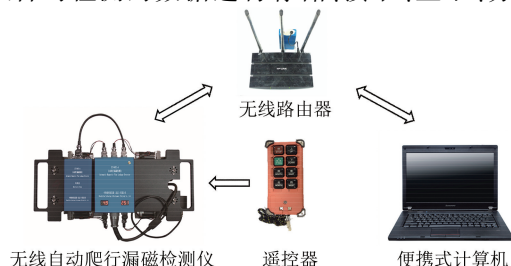


图10 漏磁检测仪整机实物图片

处理,最终完成对被测对象腐蚀等缺陷的检测评估。

为测试漏磁检测仪的性能,制作了如图 11 所示的钢管及钢板试件,试件材料为 Q235 和 Q345 钢。其中现场常用的试件有尺寸(外径 \times 壁厚,下同)为 $\phi 219\text{ mm}\times 8\text{ mm}$, $\phi 219\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, $\phi 273\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的管道及尺寸(长 \times 宽 \times 厚,下同)为 $1\ 400\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的试板。



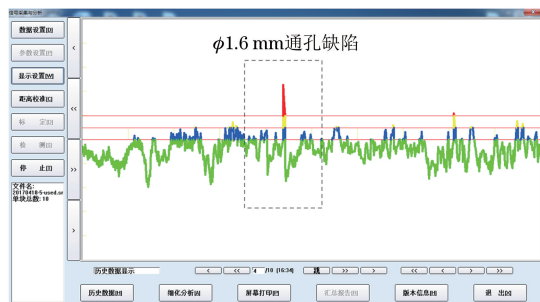
图 11 漏磁检测试件实物图

5.2 性能测试

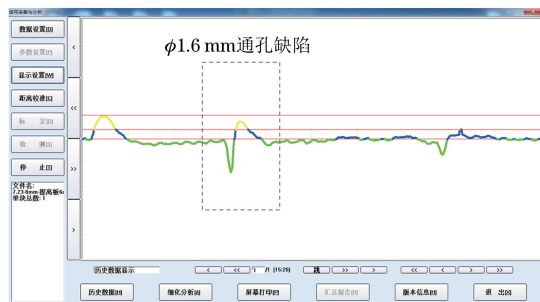
利用研制的漏磁检测仪对上述常用试件进行信号测试试验,操作遥控器控制检测仪分别在钢管与钢板上往复多次扫查,漏磁数据通过无线路由器传输至计算机,在软件上实时显示并分析数据,得到测试结果如下。

5.2.1 $\phi 1.6\text{ mm}$ 通孔缺陷检测

在 $\phi 219\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管与 $1\ 400\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢板上分别对研制的漏磁检测仪进行缺陷信号测试试验,其中钢管与钢板上设有 $\phi 1.6\text{ mm}$ 通孔^[10]缺陷,得到的检测结果如图 12 所示。



(a) 钢管上通孔缺陷的测试信号



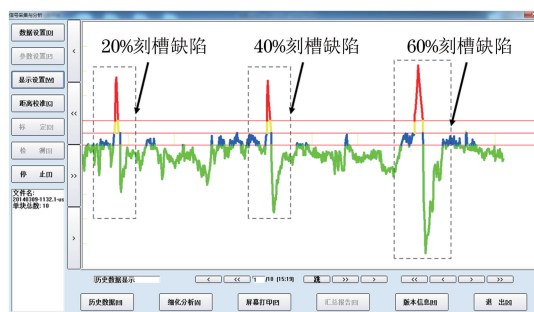
(b) 钢板上通孔缺陷的测试信号

图 12 漏磁检测仪对 $\phi 1.6\text{ mm}$ 通孔缺陷的测试信号

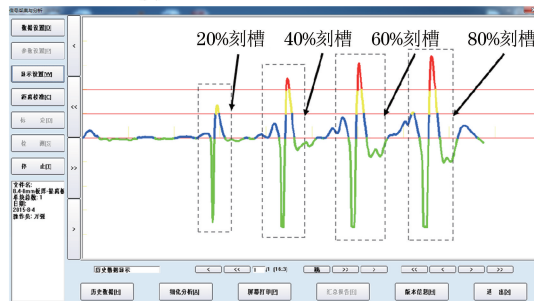
示。由图 12 可见,对于钢管与钢板均可检测出 $\phi 1.6\text{ mm}$ 通孔缺陷,且缺陷定位准确,检出率在 95% 以上。

5.2.2 刻槽缺陷检测

在 $\phi 219\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管与 $1\ 400\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢板上分别对研制的漏磁检测仪进行缺陷信号测试试验,其中钢管与钢板上分别刻有占壁厚 20%, 40%, 60%, 80% 的矩形刻槽缺陷,得到的检测结果如图 13 所示。由图 13 可见,对于管道与试板,该仪器均可检测出 20%, 40%, 60%, 80% 壁厚损失的矩形刻槽缺陷,且缺陷定位准确。其中由于仪器运动空间受限,在管道上检测到 20%, 40%, 60% 壁厚损失的矩形刻槽缺陷。



(a) 钢管上刻槽缺陷的测试信号



(b) 钢板上刻槽缺陷的测试信号

图 13 漏磁检测仪对刻槽缺陷的测试信号

5.2.3 球孔缺陷检测

在 $\phi 273\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管与 $1\ 400\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢板上分别对研制的漏磁检测仪进行缺陷信号测试试验,其中钢管与试板上设有 20%, 40%, 60%, 80% 壁厚损失的球形盲孔缺陷,得到检测结果如图 14 所示。由图 14 可见,对于钢管与钢板,40%, 60%, 80% 壁厚损失的球形盲孔缺陷信号明显清晰,且缺陷定位准确;而 20% 壁厚损失缺陷显示不太清晰。

6 现场检测应用

为验证该漏磁检测仪的可靠性及现场检测能力,对广州某天然气站的天然气输送管道和消防水

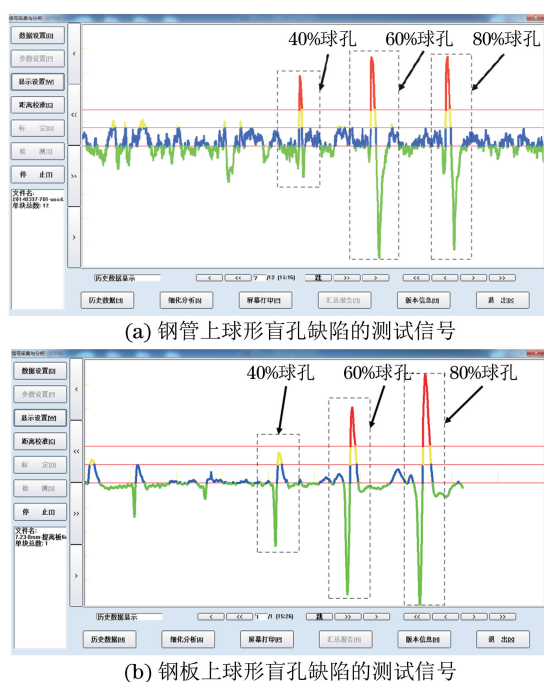


图 14 漏磁检测仪对球形盲孔缺陷的测试信号

管道进行现场检测应用,发现消防水管道中存在严重腐蚀缺陷。

利用漏磁检测仪对消防水管道进行遥控扫查,得到检测信号如图 15 所示,可见某部位出现了大量疑似缺陷信号,该部位信号杂乱且检测波形变化明显,出现了大量峰值较大的信号。对缺陷信号最强的部位进行超声波复验,出现壁厚明显减小的结果,并发现该位置有穿孔缺陷出现,实际缺陷位置与信号缺陷位置对应。图 16 所示为缺陷管段实物图。

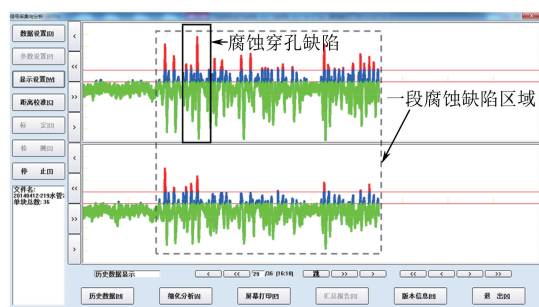


图 15 广州某天然气站现场检测漏磁信号

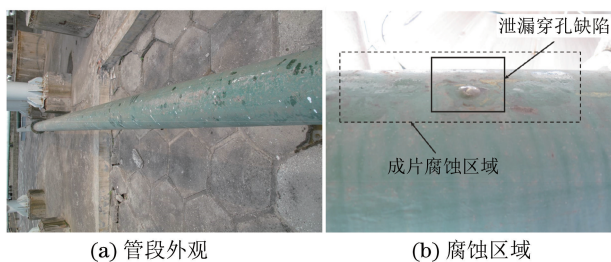


图 16 缺陷管段实物图

同时,对缺陷信号其他峰值较大的部位也进行了超声波复检,同样发现管道壁厚明显减小,证实该消防水管道在该管段存在一段腐蚀区域,腐蚀最严重的部位出现了穿孔。由于消防水使用的是河水,管道确实容易受到腐蚀。

7 结论

根据漏磁检测原理,以局部磁化技术为基础,采用模块化设计思想,利用无线遥控和无线局域网数据传输技术,研制了一套无线自动爬行漏磁检测仪。通过试验测试和现场应用,得出以下结论:

(1) 仪器的传感模块脱离值灵活可调节且具有越障能力;具有无线遥控电机驱动,避免了脚手架搭建等辅助工作;具有自动化程度高及检测效率高等特点。

(2) 仪器具有无线数据采集及无线数据传输功能,避免了现场工况线缆缠绕等干扰;其软件兼容性较高,操作便捷,易于升级。

(3) 仪器可检测出 8 mm 厚试件上 $\phi 1.6$ mm 通孔缺陷、20% 壁厚损失刻槽缺陷、40% 壁厚损失球形孔缺陷,具有较高的检测灵敏度。

(4) 仪器适用于外径大于 200 mm,壁厚 4~22 mm 的管状或板状铁磁性构件腐蚀等缺陷的检测与评估;在储罐外壁板、管道、起重机横梁等构件上进行了测试试验及现场应用,效果良好,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李光海. 常压储罐检验检测技术[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 509-512.
- [2] 程世奇, 武新军, 郭锴, 等. 架空工业管道漏磁无线检测系统的研制[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42(5): 492-495, 522.
- [3] GB/T 31212-2014 无损检测 漏磁检测 总则[S].
- [4] 康宜华, 武新军, 杨叔子. 磁性无损检测技术中的磁化技术[J]. 无损检测, 1999, 21(5): 206-209.
- [5] 王学宇. 储气井漏磁内检测关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013, 36-40.
- [6] 林俊明. 漏磁检测技术及发展现状研究[J]. 无损探伤, 2006, 30(1): 1-5.
- [7] 李永忠. 无线局域网 WLAN 及其数据传输技术[J]. 仪器仪表学报, 2004 (Z1): 1003-1005.
- [8] 刘乃安. 无线局域网(WLAN)——原理、技术与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 498-545.
- [9] NB/T 47013.12-2015 承压设备无损检测 第 12 部分: 漏磁检测[S].
- [10] GB/T 12606-1999 钢管漏磁探伤方法[S].