DOI: 10.3901/JME.2021.06.001

基于频域可变的大型钢结构钢板腐蚀 电磁检测仪器的开发*

沈功田¹ 武新军² 王宝轩¹ 胡斌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)

摘要: 钢板腐蚀是大型钢结构失效的主要原因之一。钢板构件往往面积巨大,且由于密闭空间或附属结构,使得单一检测方式难以完成有效检测。在分析漏磁检测、电磁超声检测和电磁超声导波检测技术特点及检测机理的基础上,提出基于频域可变的电磁检测理念。优化漏磁、电磁超声测厚和导波检测传感模块,实现三种检测模块的一体化设计,开发复合检测传感器。针对三种检测方法信号激励和采集的特点,研发一体化电路,开发了基于频域可变的电磁检测试验平台。针对不同工况需求,开发了储罐底板腐蚀在油检测仪和系列自动爬行电测检测仪。通过现场成功应用,验证了基于频域可变的电磁检测技术的有效性和巨大应用潜力。

关键词: 大型钢结构; 钢板腐蚀; 频域可变; 电磁检测

中图分类号: E07; TH17

Development of Electromagnetic Testing Instrument for Plate Corrosion of Large Steel Structure Based on Variable Frequency Technique

SHEN Gongtian¹ WU Xinjun² WANG Baoxuan¹ HU Bin¹

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

2. School of Mechanical Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Corrosion of steel plate is one of the main reasons for the failure of large steel structures. Steel plate components often have large area, and due to the confined space or attached structure, it is difficult to complete the effective testing by single method. The technical mechanism and characteristics of magnetic flux leakage testing, electromagnetic ultrasonic testing and electromagnetic ultrasonic guided wave testing are analyzed, and the concept of electromagnetic testing based on variable frequency technique is proposed. The magnetic flux leakage, electromagnetic ultrasonic thickness measurement and guided wave testing sensor modules are optimized, to realize the integrated design of the three detection modules, thus the composite testing sensor is developed. According to the characteristics of signal excitation and acquisition of the three testing methods, an integrated circuit is designed, and the electromagnetic testing experimental platform is developed. According to the requirements of different testing conditions, the in-service detector for oil tank bottom plate corrosion and a series of automatic electromagnetic testing instrument and are developed. And the effectiveness and great application potential of electromagnetic detection technology based on variable frequency domain are verified by practical applications.

Key words: large steel structure; steel plate corrosion; variable frequency technique; electromagnetic testing

0 前言

大型钢结构在能源、建筑、仓储、运输等行业

得到广泛应用,我国保有量巨大,且不断大型化。钢板是其中的主要构件,如大型储油罐的底板和壁板、大型压力容器壁板、大口径管道、风机塔筒、大型起重机和桥梁箱型梁体等。这些设备和构件往往储存易燃、易爆、有毒等介质,或承受较高的工作载荷,一旦发生失效,可能造成严重后果,使生

* 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ090175)和国家重点研发计划(2017YFF0209701)资助项目。20201221 收到初稿,20210224 收到修改稿

命财产和周边环境遭受严重损失^[1]。以大型石油储罐为例,据不完全统计^[2],1962—2013年期间国内54起和国外29起石油储罐火灾爆炸事故,共造成445人死亡和巨额财产损失以及严重的环境污染,其他如管道泄漏和桥梁钢结构失效^[3-4]也造成严重生命、财产和环境损失。

腐蚀是造成钢板构件失效的主要原因^[5-8],对其有效检测具有十分重要的意义。当前采用的无损检测方法有射线、超声、漏磁、导波等方法^[9]。其中射线检测成本较高,存在射线伤害风险^[10];压电超声需要耦合剂,对检测表面要求较高;漏磁检测^[11-12]和电磁超声检测^[13-14]为非接触式检测、操作简单,便于大面积钢结构的快速检测,但存在漏磁检测对均匀腐蚀减薄不敏感、电磁超声对于点状腐蚀不敏感等问题;超声导波检测^[15]可快速进行较远距离检测,但无法进行直接壁厚测量,且由于频率较低无法发现较小缺陷。

上述检测方法各有特点,然而钢结构中仍存在大量场景缺少高效的检测手段。以大型储罐为例,底板检测仍以人工的漏磁和超声方法为主,作业环境恶劣,人工检测劳动强度大,且需要定期开罐进行检测,成本较高^[16],急需不开罐的在油检测技术。漏磁和电磁超声检测采用非接触扫查方式,适合自动化设备的搭载,可分别完成腐蚀坑和腐蚀减薄的检测。然而底板存在附属结构,部分区域无法进行扫查,且油液环境中导航运动困难,盲目扫查效率低下。导波检测定点激发、远距离检测的特点可以完成不易达区域的检测和重点检测区域的指引。然而储罐结构入口狭小,多种检测设备进行检测工序复杂、效率低下,而不同检测设备的简单组合则会大幅增加体积和重量,无法工程应用。其他钢结构高耸部位、密闭空间中的大面积钢板的检测也存在类似情况。针对上述问题和工程需求,作者团队在长期研究漏磁、电磁超声、电磁超声导波检测技术的基础上,提出了集三种技术于一体的基于频域可变的电磁检测技术理念,并在此基础上开发了集漏磁、电磁超声、超声导波功能于一体的基于频域可变的电磁检测仪器。

1 基于频域可变的电磁检测技术研究

1.1 基于频域可变的电磁检测总体技术路线

漏磁检测、电磁超声检测、电磁超声导波检测技术分别可以进行腐蚀坑/裂缝的检测、剩余壁厚的测量、不易达区域的缺陷检测,是近年来应用于储

罐底板和壁板、管道和其他大型钢结构的新型检测方法。

其中漏磁检测采用永磁铁或电磁铁对被检测的铁磁材料进行磁化,使其达到临界饱和状态,通过对漏磁场的检测确定缺陷尺寸及位置^[11]。电磁超声方法是通过电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)在导体中激励和接收超声波信号进行检测^[13,17],需要永磁铁或电磁铁提供的偏置磁场和交流线圈的协同作用,激发不同模式的超声波,进行缺陷的检测或厚度的测量。构件中超声导波的激励和接收方式有压电式、电磁式和脉冲激光式等,其中电磁方式在检测过程中不需要耦合剂、传感器和试件之间可以有一定的脱离距离,有利于实现快速无损检测^[18]。

这三种检测方式分别工作在不同的电磁/声波频段,漏磁信号为低频信号(5 kHz以下),电磁超声导波检测使用的频域区间为5~300 kHz,电磁超声检测信号的频域区为300 kHz~3 MHz,信号特征各有不同,但都需要磁化器对构件进行磁化或通过动静态磁场的协同作用进行信号的激励和接收。因此可以通过动静态磁化器的合理布置,通过不同频域的信号激励和接收方式,实现三种检测技术的一体化有机融合。即一个一体化的传感器,在不同的工作频段上进行三种不同的检测作业,实现基于频域可变的电磁复合检测。

这种同一套传感器和仪器电路、通过工作频域的改变实现不同检测功能的技术路线,可以实现具备多种检测功能的传感器与仪器主机的小型化设计和检测功能的有机融合。基于频域可变的电磁检测仪器可以实现漏磁、电磁超声、电磁超声导波复合检测,发挥各自特点,实现优势互补,大幅提升检测效率。检测过程中首先利用电磁超声导波定点激励、长距离检测的特点,对大面积钢板进行快速检测,对腐蚀严重部位进行初步定位,然后将传感器移至该区域,利用漏磁方法对缺陷位置和大小进行精确检测,并通过电磁超声测厚方法对扫查区域进行剩余壁厚的精确测量;此外对于传感器不易到达的位置,采用超声导波方法进行远距离检测;同时小型化的传感器和仪器主机可以保障狭小空间的通过性。

1.2 基于频域可变的电磁检测的理论基础

漏磁检测、电磁超声检测和电磁超声导波检测方法均需要对被检构件进行磁化,但对磁化场的要求不同。其中漏磁方法需要对两磁极间构件进行水平均匀近饱和磁化从而实现腐蚀缺陷的检测。而

EMAT 结构中不同偏置磁场和静态、动态线圈可以激发出不同模态的超声波，从而实现厚度测量或导波检测。

EMAT 结构中电磁场和弹性场之间的能量传递有洛伦兹力 f^L 、磁化力 f^M 和磁致伸缩应变 ε^{MS} 三种耦合机理^[19]，其计算公式分别为

$$f^L = J_e \times B_0 \quad (1)$$

$$f^M = \nabla^*(M \cdot H) \quad (2)$$

$$\varepsilon^{MS} = S^H \sigma + DH \quad (3)$$

式中, J_e 为交变磁场在试件中引起的电流(涡流)密度 (A/m^2), B_0 为静态偏置磁场作用下试件中的磁感应强度(T), H 为磁场强度(A/m), M 为试件在外加偏置磁场作用下的磁化强度(T), S^H 表示恒定磁场的柔度矩阵, σ 为试件在外加力作用下引起的内应力 (N/m^2), D 表示试件的压磁应变系数。对于非导磁试件, 仅有洛伦兹力作用, 而铁磁试件中涉及到三种耦合方式, 其中磁化力的效应相对较弱, 在分析中往往忽略其作用, 而洛伦兹力和磁致伸缩应变的强弱则取决于外加磁场的强度^[20]。

不同磁场方向和感应电流/磁场方向相互作用时, 洛伦兹力和磁致伸缩应变可产生多种振动形式, 进而激发出不同的波型。典型的竖直和水平均匀静态偏置磁场中洛伦兹力和磁致伸缩耦合机制如图 1、2 所示。图 1 所示, 在均匀静态竖直磁场 B_0 中(设试件水平放置), 若载流线圈激发的交变涡流 J_e 平行于水平面且与磁场方向垂直, 则产生的洛伦兹力 f^L 使质点垂直于磁场和涡流方向振动, 即在水平方向振动。振动沿竖直方向在试件内传播, 产生横波。而图 2 所示, 在均匀静态水平磁场中, 若线圈激发的动态磁场 ΔH 也平行于表面时, ΔH 作用于磁畴, 则产生动态变化的磁致伸缩应变 ε^{MS} 也与试件表面平行, 从而使质点产生沿水方向的振动。而实际磁场分布多为非均匀分布, 如在磁极下方时, 空间中不同位置偏置磁场的方向和大小不一致, 这时动态磁场激励的超声波型成分比较复杂。交变线圈激励

的动态涡流和动态磁场与不同偏置磁场中的试件相互作用产生不同方向的质点振动, 从而激发横波、纵波、表面波等不同波型。

图2 磁致伸缩耦合机理

电磁超声检测中, 可在磁极正下方布置环形线圈。交变线圈在被测试件中感应出涡流成环形, 与试件表面平行, 当线圈中激励电流频率较高时, 感应电流主要集中在趋肤层中。而磁极正下方趋肤层中偏置磁场垂直分量远远大于水平分量, 洛伦兹力机理产生的质点振动垂直于涡流方向且与试件表面平行, 与声波传播方向垂直, 主要激励出横波。

而在如图 3 所示的空间周期分布的静态偏置磁场中布置跑道型线圈, 线圈直线部分位于周期磁场内, 被测试件中感应出的涡流与试件表面平行, 洛伦兹力作用下质点振动方向垂直于涡流方向且与试件表面平行, 振动沿水平方向传播, 激励出水平剪切(Shear horizontal, SH)波。线圈正下方试件表面的动态磁场方向与偏置磁场垂直且平行于试件表面, 磁致伸缩作用下也可激励出 SH 波。SH 波激发的导波模态更加单一, 信号较为纯净, 在导波检测中具有突出优势。

图3 空间周期静态磁场 EMAT 结构

1.3 基于频域可变的电磁检测仪的设计

通过上述分析可知, 不同形式的超声波可通过偏置磁场中不同磁场分布区域中静态磁场与不同频段的动态磁场的相互作用激励产生, 合理设计的共享磁化器可以同时满足漏磁、超声导波检测和电磁超声测厚对于静态偏置磁场的要求, 从而实现三种传感器的一体化设计和三种方法的协同检测。

这种基于频域可变的电磁检测方法结构原理如图 4 所示。其中磁化器由空间变周期分布的永久磁铁阵列与衔铁构成, 包括左侧的主磁化单元和右侧

图1 洛伦兹力耦合机理

图 4 频域可变电磁检测传感器结构原理图

的周期磁化单元。磁化器与被检构件形成励磁回路，被检构件内及其附近磁场分为均匀磁场区和周期变化磁场区及边缘区域。

在均匀磁场区中部布置磁场测量传感器如霍尔原件，可以实现腐蚀缺陷的漏磁检测；将高频线圈置于均匀磁化区边缘的磁铁正下方，则高频涡流与试件趋肤层中近似竖直均匀分布的偏置磁场作用可产生超声横波，实现电磁超声检测，获取试件厚度等信息；而周期变化磁场区中的中低频跑道型线圈则可激励出沿水平方向传播的 SH 波，从而实现超声导波检测。

EMAT 换能效率较低，传感器中激励和接收线圈要求不同频域的大功率激励电路和微小信号处理电路。不同频域的功率放大和信号处理在电路设计上存在相通之处和各自特点，因此需要基于共用电路部分并对不同频域的特点进行优化，实现电路的一体化，进而实现仪器主机的一体化。而三种检测结果在分析和显示方面要求不同，结合各自特点选择漏磁检测全波形实时显示、电磁超声测厚结果实时显示和导波检测结果的分时显示方式，并开发相应的检测结果分析和显示软件。

基于频域可变的电磁检测仪器结构示意图如图 5 所示，仪器设计围绕频域可变电磁检测理念，可以实现三种检测方法在传感器、仪器主机、上位机分析软件等层面的有机融合，实现高效复合检测。

图 5 频域可变电磁检测仪示意图

2 基于频域可变的复合传感器研制

由图 4 所示的基于频域可变的三合一复合传感器原理可知，复合传感器磁化器结构包括左侧两块磁铁构成的主磁化单元和右侧的周期磁化单元，磁铁采用钕铁硼永磁铁制作。为实现漏磁检测功能，在主磁化单元两磁极中间布置磁感单元，漏磁磁感单元结构如图 6 所示，左侧为俯视图，右侧为截面图。漏磁传感单元外壳采用黄铜制作，中间排列圆孔内布置磁敏感原件，圆孔阵列两侧安装聚磁片。霍尔元件具有体积小、灵敏度高、性能稳定等特点，因此采用霍尔元件进行漏磁场的感知，并采用聚磁片结构以增强信号。连接弹簧的传感支架可在一定范围内弹性浮动，以确保霍尔元件与被检测面间距的稳定。

图 6 漏磁传感单元结构图

1. 限位槽 2. 霍尔元件 3. 聚磁片 4. 传感支架 5. 弹簧

电磁超声检测则采取在主磁化单元一侧磁铁正下方布置环形线圈的方式实现，激励线圈为 D25(直径 25 mm)双层线圈，接收线圈为 D25 单层线圈，如图 7 所示。其中单层线圈布置在更靠近构件检测面一侧，以更好地接收和转换超声回波信号。而超声导波的激发和接收则采取跑道型线圈，布置在周期磁化单元下方，激励与接收线圈匝数分别为 17 匝和 33 匝，如图 8 所示。同样的，接收线圈也被布置在更靠近构件检测面一侧。

图 7 电磁超声检测线圈

制作完成的三合一频域可变电磁检测传感器如图 9 所示，该传感器包括 16 个漏磁检测通道、8 个电磁超声测厚通道和 1 个电磁超声导波检测通道。除上述传感单元外，还包括支持滑动扫查的轮组和测量检测距离的编码器。

图 8 电磁超声导波检测线圈

图 9 磁声复合传感器

为验证传感器的检测性能，在试板上分别进行漏磁检测、测厚和导波检测的性能测试。漏磁检测性能的测试在厚度为 8 mm 的漏磁试板上进行，结果如图 10a 所示。图中缺陷信号依次对应深度为 6.4 mm、4.8 mm、3.2 mm、1.6 mm 的直径为 20 mm 的球头铣刀加工的球形孔缺陷和直径为 10 mm 深度

图 10 复合探头测试结果

为 1 mm 的盲孔。可以看出复合传感器可有效检出较小缺陷，且可准确反映缺陷当量。电磁超声导波的测试在厚度为 8 mm 的导波试板上进行，结果如图 10b 所示，其中缺陷信号为距离传感器 1 m 直径 10 mm 深 3.2 mm 盲孔的导波信号。电磁超声测厚的测试在标准厚度试块上进行，结果如表 1 所示，从测试结果中可以看出电磁超声测厚精度可达 0.2 mm。上述测试结果表明复合传感器的单项检测能力均达到相关检测标准的精度要求，各个检测模块之间未产生相互干扰，这也证明了基于频域可变的电磁复合检测方法的有效性。

表 1 复合探头电磁超声测厚测试结果

参数	数值			
标称厚度/mm	10.0	9.8	9.6	9.4
	9.9	9.8	9.7	9.4
仪器示值/mm	10.0	9.9	9.6	9.4
	9.8	9.9	9.6	9.3

3 基于频域可变的电磁检测仪器研制

3.1 关键电路的研制和优化

漏磁检测、电磁超声测厚和电磁超声导波检测技术在信号激励和信号处理方面存在较大差异，信号激励/处理电路的一体化也是检测仪器一体化的关键。其中漏磁检测不需要额外的激励，磁敏原件将漏磁场信号转换为电信号并上传处理。漏磁检测为扫查式检测，信号具有连续性，信号采集和处理电路需要满足实时性要求，并且由于单个磁敏感元件扫查宽度有限，漏磁检测需要多个通道以保障检测宽度。其电路主要包括多通道信号采集模块、信号缓存模块、通信模块和主控芯片等。电磁超声测厚和导波还需要信号的激励，由于电磁式传感器的耦合效率远低于压电式，因此需要较高的激励能量，对电路部分的要求还包括信号发生、D/A 转换、功率放大电路等。导波检测时，只需单点激励，即可实现长距离检测，通常情况下，单通道导波信号就能实现检测目的；电磁超声测厚则是扫查模式，一般需要较多通道进行较大宽度的扫查。

电磁超声测厚和电磁超声导波检测对激励信号的要求是能量高、失真小、带宽窄，以提高信号幅值，减少频散现象和声束发散对检测造成的不利影响。电磁超声测厚和超声导波检测工作在不同的频带，分别为 300 kHz 至 3 MHz 的高频和 5 kHz 至 300 kHz 的中低频，因此需要在器件选择和放大电路设计中进行针对性的优化，最终完成高功率放大电路和中功率放大电路的设计和制作。在中低

频放大电路中, 突出问题是功率管的严重发热。场效应管大电流导通时, 会有一定的发热, 较高工作频率时, 由于信号占空比低, 工作时间短, 易于散热。然而当工作频率较低时, 信号的占空比增加, 发热量急剧增加, 可能造成电路损坏。因此在中低频功率放大电路上使用导通电阻极低的场效应管, 降低了场效应管的发热。而在高频放大电路中, 需要实现 MHz 频率下的功率放大, 这对功率放大管和变压器的频率响应都提出了更高的要求。因此采用栅极电荷极低的场效应管和分布电容与漏感较低的传输线变压器以实现高频下的功率放大。经过优化后的中频和高频放大电路均可实现 16 kW 的瞬时输出功率。

漏磁、超声测厚和导波信号经过磁敏原件或 EMAT 转换后获取的信号十分微弱, 为进行后续处理需要进行信号的放大。低频信号的放大较为简单, 采取正负供电的三级放大结构, 即可实现 80 dB 的放大, 其电路制作的重点在多通道的高度集成。中频和高频微弱信号处理器对电路的要求较为接近, 可在同样的电路结构中使用不同截止频率的滤波器进而实现中频或高频微弱信号的处理, 其结构简图如图 11 所示。电路设计的重点在于不同频段的滤波器的设计和实现。经过优化的中频和高频微弱信号处理器均可达到 120 dB 的放大倍率。

图 11 中频和高频微弱信号预处理器结构简图

数据采集方面, 漏磁检测信号经过放大滤波电路后进行等时间或等空间采样, 检测数据需实时采集发送; 电磁超声测厚信号在进入系统前经过高速比较器电路, 将比较器的结果送入现场可编程门阵列 (Field-programmable gate array, FPGA) 内, 进行脉冲间隔的计数, 进而获得厚度值, 并将其随漏磁检测数据一同发送; 导波检测时采样频率较高, 数据量大, 但不要求实时发送检测数据, 为降低对系统要求, 可采用先采集后发送的方式。数据的传输则采用 FPGA+以太网的方案, 也可采用 USB、WiFi、Zigbee 等通讯方式, 以适应不同的工况要求。

3.2 基于频域可变的电磁检测试验平台的搭建

根据上述工作, 制作相应电路, 完成基于频域可变的电磁检测试验平台的搭建, 如图 12a 所示。

该试验平台可支持 128 通道漏磁检测、64 通道电磁超声测厚和 8 通道电磁超声导波检测, 可通过以太网的方式与计算机连接, 并通过检测软件进行检测参数的设置和检测的控制, 软件界面如图 12b 所示。该试验平台可以连接多个不同通道数的三合一复合传感器, 进行传感器的测试验证、检测参数的调整和检测工艺的开发, 是专用检测仪器和检测工艺开发的综合试验和开发平台, 试验和开发功能如表 2 所示。

(a) 主机面板

(b) 软件界面

图 12 基于频域可变的电磁检测试验平台主机及软件界面

表 2 电磁检测试验平台功能列表

平台	内容
检测机理研究	缺陷位置、形貌表征方法; 不同材质信号特征; 工件载荷状态影响机理等
检测工艺开发	缺陷位置判断与定量方法; 新检测对象参数选定; 不同工况检测工艺制定等
检测仪器开发	平面与大直径构件爬壁检测仪器; 小管径专用自动检测仪器; 管道内检测仪器; 潜水潜油检测机器人等

3.3 储罐底板腐蚀在油检测仪的研制

上述检测试验平台主机和传感器的开发和测试验证并实现了基于频域可变的复合电磁检测技术, 然而在实际工程应用中还需要开发专门的搭载方法和装置, 研制专用的检测仪器, 以完成特定场景下的检测。例如三合一复合检测远距离检测和近距离扫查相结合的特点, 使其适用于大型原油储罐底板的不开罐在油检测, 然而潜入原油底部对底板进行检测, 对密封防爆、在油环境导航、高黏度介质中运动、远距离信号传输和控制等具有较高要求。因

此围绕储罐底板在油检测工艺和特殊环境要求，针对上述技术难点，研制了储罐底板腐蚀在油检测仪，如图 13 所示。该仪器具有 8 个漏磁检测通道、4 个电磁超声测厚通道、1 个超声导波检测通道；通过静态、动态密封技术和正压防爆技术，实现在油环境的安全防护；优化设计了油泥环境的驱动装置，解决高粘度介质中驱动难题；通过声时测量定位技术，实现大型原油储罐内油液下的定位和导航；并设计了专门的密封光纤通信装置，保障远距离的信号传输和检测控制。

图 13 储罐底板腐蚀在油检测仪

根据大型储罐实际工况和检测要求，对储罐底板腐蚀在油检测仪关键性能指标进行了测试，测试结果如表 3 所示，表明该仪器可以满足大型储罐底板腐蚀的在油检测要求。

表 3 储罐底板腐蚀在油检测仪关键参数测试结果

关键参数	测试结果
适用对象	最大 80 m 直径储罐底板腐蚀在油条件的检测
介质要求	轻质原油、成品油、食用油、水
最大潜油深度	≥ 20 m
检测厚度	6~18 mm 厚度钢板有效检测
导波检测灵敏度	可检测壁厚 8 mm 试件上 1.0 m 范围内 $\phi 10$ mm 深 3.2 mm 的盲孔
导波检测检出率	壁厚 8 mm 试件上 1.0 m 范围内 $\phi 10$ mm 深 3.2 mm 的盲孔 30 次检测全部检出
漏磁检测灵敏度	可检测壁厚 8 mm、12 mm 试件上 $\phi 1.6$ mm 通孔和 $\phi 10$ mm 深 1.6 mm 的盲孔
漏磁检测检出率	壁厚 8 mm 试件上 $\phi 1.6$ mm 通孔和 $\phi 10$ mm 深 1.6 mm 的盲孔 30 次检测全部检出
壁厚测量精度	6~18 mm 钢板测厚精度 0.2 mm
扫查速度	自动扫查，最大速度 0.5 m/s

现场应用测试表明该仪器通过漏磁检测、电磁超声测厚和导波检测的有机融合，并配合声时测量定位装置，可以有效进行大型原油储罐底板腐蚀的不开罐、不卸油的快速检测。

此外还针对压力容器、管道、大型游乐设施和常压储罐等大型钢结构中平面钢板和大直径钢管外检测需求，开发了具备变曲面吸附爬行、无线远距离信号传输和控制、三合一复合检测功能的系列自

动爬行电磁检测仪器，如图 14 所示。

图 14 系列自动爬行电磁检测仪

4 结论

(1) 综合分析了漏磁检测、电磁超声检测和电磁超声导波检测的检测机理和工作频域特征，提出了基于频域可变的电磁检测理念，即采用一体化的传感器，在不同的工作频段上进行三种不同的检测作业，从而满足大型钢结构中钢板腐蚀的快速复合检测。

(2) 从漏磁、电磁超声和电磁超声导波的共性特点出发，通过偏置磁场的优化设计，实现漏磁、电磁超声测厚和电磁超声导波传感模块的一体化设计，开发了高集成度小型化的三合一复合传感器。

(3) 针对三种检测方式信号激励和采集处理的特点，研发一体化的中高频段高压高功率激励电路、多频段弱信号处理电路、多频段混合数据采集电路等，开发完成基于频域可变的电磁检测开发试验平台。

(4) 在开发试验平台的基础上，针对不同检测需求，开发了储罐底板腐蚀在油检测仪和系列自动爬行电磁检测仪，实验室测试和现场工程应用验证了基于频域可变的电磁检测方法的可行性和有效性。

基于频域可变的电磁检测技术有机融合的三种检测方法优势，其远近结合、快速检测特点使其可以满足多种钢结构中钢板腐蚀的快速检测。并且适用于机器人等自动化设备的搭载，可以取代人工进行大区域或密闭空间、高耸结构、有毒有害区域的快速检测，从而降低劳动强度和人身风险、提升检测效率，具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 沈功田, 贾国栋, 钱健雄. 特种设备安全与节能 2025 科技发展战略[M]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
SHEN Gongtian, JIA Guodong, QIAN Jianxiong. Science and technology development strategy in 2025 for special

- equipment safety and energy saving[M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2017.
- [2] 蒋晓武, 周良锋, 周领. 石油储罐火灾案例与安全现状调查分析[J]. 安全、健康和环境, 2016, 16(3): 29-32.
- JIANG Xiaowu, ZHOU Liangfeng, ZHOU Ling. The investigation and analysis of oil tank fire cases and present situation[J]. Safety Environment Health, 2016, 16(3): 29-32.
- [3] 王超. 国内外天然气管道事故分析[J]. 化工管理, 2016 (14): 257.
- WANG Chao. Analysis of domestic and overseas natural gas pipeline accidents[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(14): 257.
- [4] 徐伟华. 桥梁钢结构的大气腐蚀寿命预测[J]. 中国住宅设施, 2010(2): 58-59.
- XU Weihua. Atmospheric corrosion life prediction of steel structures for bridges[J]. China Housing Facilities, 2010(2): 58-59.
- [5] 李光海. 常压储罐检验检测技术[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 509-512.
- LI Guanghai. Inspection technique of atmospheric storage tanks[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(7): 509-512.
- [6] 郑茂盛, 周根树, 赵新伟, 等. 现役油气管道安全性评价研究现状[J]. 石油工程建设, 2004, 30(1): 1-6.
- ZHENG Maosheng, ZHOU Genshu, ZHAO Xinwei, et al. Current status of safety evaluation for pipeline at active service[J]. Petroleum Engineering Construction, 2004, 30(1): 1-6.
- [7] 张莲芳, 宋淑云. 原油储罐安全分析及预防措施[J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(6): 44-47.
- ZHANG Lianfang, SONG Shuyun. Safety analysis and preventive measures for crude oil storage tanks[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2008, 24(6): 44-47.
- [8] 周红波, 高文杰, 黄誉. 钢结构事故案例统计分析[J]. 钢结构, 2008, 23(6): 28-31.
- ZHOU Hongbo, GAO Wenjie, HUANG Yu. Statistical analysis of steel construction accidents[J]. Steel Construction, 2008, 23(6): 28-31.
- [9] 沈功田, 胡斌, 徐永昌, 等. 中国无损检测 2025 科技发展战略[M]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- SHEN Gongtian, HU Bin, XU Yongchang, et al. Development strategy of NDT 2025 in China[M]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [10] 黄爱民. 射线检测技术在无损检测中的应用[J]. 山东工业技术, 2015, (14): 218-219.
- HUANG Aimin. Application of radiographic testing technology in nondestructive testing[J]. Shandong Industrial Technology, 2015, (14): 218-219.
- [11] 沈功田, 王宝轩, 郭锴. 漏磁检测技术的研究与发展现状[J]. 中国特种设备安全, 2017, 33(9): 43-52.
- SHEN Gongtian, WANG Baoxuan, GUO Kai. Review of research and development of magnetic flux leakage technique[J]. China Special Equipment Safety, 2017, 33(9): 43-52.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 31212-2014 无损检测, 漏磁检测, 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 31212-2014 Non-destructive testing - Magnetic flux leakage testing - General principles[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [13] 丁秀莉, 武新军, 郭锴, 等. 电磁超声传感器工作原理与结构[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 96-100.
- DING Xiuli, WU Xinjun, GUO Kai, et al. Working principle and structure of electromagnetic acoustic transducers[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(1): 96-100.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 34885-2017 无损检测 电磁超声检测 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 34885-2017 Non-destructive testing - Electromagnetic ultrasonic testing - General principles[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 31211-2014, 无损检测 超声导波检测 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 31211-2014 Non-destructive testing - Ultrasonic guided wave testing - General principles[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [16] 杜华章. 立式金属储罐底板不开罐检测技术研究与应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2010.
- DU Huazhang. Research and application of inspection technology of vertical metal tank bottom plate without opening[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2010.

- [17] 任晓可. 电磁超声技术在钢板缺陷检测中的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
REN Xiaoke. Research on electromagnetic ultrasonic technology in steel plate defect detection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008
- [18] 武新军, 徐江, 沈功田. 非接触式磁致伸缩导波管道无损检测系统的研制[J]. 无损检测, 2010, 32(3): 13-17.
WU Xinjun, XU Jiang, SHEN Gongtian. Development of the noncontact guided wave non-destructive testing system for the pipeline based on the magnetostrictive effect[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(3): 13-17.
- [19] HIRAO M. EMATs for science and industry noncontacting ultrasonic measurements[J]. Springer Berlin, 2014, 140(3-4): 247-255.
- [20] THOMPSON R B. A model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1978, 25(1): 7-15.

作者简介: 沈功田, 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为特种设备安全与无损检测新技术。

E-mail: shengongtian@csei.org.cn

武新军(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为无损检测新技术。

E-mail: wxjkyh@263.net

王宝轩, 男, 1985 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为电磁无损检测技术及应用, 电磁和电化学多物理场模拟。

E-mail: wangbaoxuan@csei.org.cn

胡斌, 男, 1977 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为电磁无损检测技术、智能无损检测监测技术。

E-mail: hubin@csei.org.cn