

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107735

基于平衡电磁技术的管道裂纹全角度检测方法*

杨理践, 郑文学, 李佳音, 高松巍, 刘斌

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:针对管道表面裂纹缺陷方向各异的问题,提出一种基于平衡电磁技术的裂纹全角度检测方法。通过麦克斯韦方程分析了时谐电磁场下管道内表面的电磁分布,根据磁通与感应电流的畸变分析了管道表面各方向裂纹的检测机理与检测信号规律,并证明了平衡电磁技术对管道裂纹全角度检测的有效性。利用有限元方法计算分析了裂纹与检测方向成七种不同角度时管道内表面的电磁畸变程度,并通过仿真得到相应的感应电压信号,根据仿真结果进行有效性试验,结果表明,平衡电磁检测技术能够对管道表面裂纹实现全角度检测,检测信号特征以检测方向与裂纹成 30° 夹角为分界, $0^\circ \sim 30^\circ$ 信号特征为先波谷后波峰,检测信号幅度随着角度增加逐渐减小,峰谷间距快速变小; $30^\circ \sim 90^\circ$ 信号特征为先波峰后波谷,检测信号幅度随着角度增加逐渐增大,峰谷间距缓慢变小;当检测方向与裂纹成 30° 时,感应电压信号为双峰谷特征,且峰峰值最小。该方法为管道表面裂纹角度的量化研究提供了理论依据和实验基础。

关键词:平衡电磁技术;裂纹角度;管道内检测;电磁场畸变;交流激励;全角度

中图分类号: TH878 TM154 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Full-angle detection method of pipeline crack based on balanced electromagnetic technology

Yang Lijian, Zheng Wenxue, Li Jiayin, Gao Songwei, Liu Bin

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problem of different directions of crack defects on the surface of the pipeline, a crack detection method based on balanced electromagnetic technology is proposed. The electromagnetic distribution of the inner surface of the pipeline under the time-harmonic electromagnetic field is analyzed by Maxwell's equations. According to the distortion of magnetic flux and induced current, the detection mechanism and signal law of cracks in all directions on the pipeline surface are analyzed, and the effectiveness of the balanced electromagnetic technology for all angle detection of pipeline cracks is proved. The finite element method is used to calculate and analyze the electromagnetic distortion degree of the inner surface of the pipeline when the crack is at seven different angles to the detection direction, and the corresponding induced voltage signal is obtained through simulation. According to the simulation result, the validity test is carried out. Results show that the balanced electromagnetic detection technology can realize the full angle detection of the surface crack of the pipeline. The detection signal feature is divided by the detection direction and the crack at an angle of 30° . The $0^\circ \sim 30^\circ$ signal feature is the first trough followed by the peak. The amplitude of the detection signal gradually decreases as the angle increases, and the peak-to-valley spacing decrease rapidly. $30^\circ \sim 90^\circ$ signal features a peak first and then a trough. The amplitude of the detection signal gradually increases as the angle increases, and the peak-to-valley spacing slowly decreases; when the detection direction is 30° to the crack, the induced voltage signal has a double peak-valley feature, And the peak-to-peak value is the smallest. This method provides a theoretical basis and experimental basis for the quantitative study of the crack angle on the pipe surface.

Keywords: balanced electromagnetic technology; crack angle; in-pipe inspection; electromagnetic field distortion; AC excitation; Full-angle

收稿日期:2021-04-09 Received Date: 2021-04-09

* 基金项目:国家自然科学基金(61871450)项目资助

0 引言

管道以其运量大、输送成本低等优点成为运输油气的主要方式。而油气管道在建设施工和运行管理过程中,由于管材制造缺陷、局部应力集中及腐蚀缺陷等因素影响,会产生裂纹并扩展,使管道易出现脆断、疲劳破坏和腐蚀破坏等失效现象^[1],严重地影响着油气管道的使用性能和可靠性能。为了降低因裂纹带来的管道泄漏等安全隐患及经济损失风险,保障管道的安全稳定运行,对于管道裂纹的有效检测具有重要意义。

油气管道因其服役环境的特殊性,无损检测方式被广泛应用于国内外的管道缺陷检测中。其中漏磁内检测技术最为常用,杨理践等^[2]通过仿真分析了直流励磁条件下裂纹角度与磁化方向夹角对检测信号的影响,并得到漏磁有效检测最小的裂纹角度;刘斌等^[3-4]针对管道轴向裂纹分别研究了周向激励的漏磁检测方法与弱磁法,建立轴向裂纹检测模型并分析了弱磁检测信号的传播规律;吴德会等^[5-6]对传统漏磁检测管道裂纹进行了瞬态仿真分析,并提出了一种复合励磁的漏磁检测方法,同时获得轴向和周向的检测管道裂纹的能力,弥补了传统漏磁技术的检测盲区;超声波检测技术作为一种可靠且公认的手段也被用于管道裂纹检测,Qi等^[7]研究了弯头角度对超声导波检测管道裂纹的影响,分析了不同裂纹位置与模式转换的检测灵敏度;钟立强等^[8]利用仿真与实验分析了裂纹尺寸与超声导波反射系数的影响,基本实现对管道横向斜纹的周向定位;Baumeister等^[9]研制了一种超声波探伤仪,将超声裂纹检测探头连接到ILI工具体上,减少焊缝对检测信号的影响,可实现平行于和靠近焊缝的裂纹检测。马天天等^[10]优化了常规TOFD检测方法,并建立了提高探头中心距情况下的厚壁管道倾斜裂纹定量公式,提高了倾斜裂纹长度和角度的定量精度。针对传统超声技术对微裂纹检测的敏感性较差的问题,Jiao等^[11]将振动声调制技术用于管道的微裂纹检测,分析了可行性并研究了振动频率与振幅对调制指数的影响。电磁无损检测技术以不接触、无需耦合等优点也普遍在管道裂纹检测中应用,李伟等^[12-13]设计了一种赫姆霍兹线圈式探头,通过检测管道表面的电磁场扰动实现对管道内表面轴向裂纹的全周向检测。以上的多种检测技术对于管道裂纹检测都有不同的适应范围。

本文提出了基于平衡电磁技术的管道表面全角度裂纹检测方法,该技术结合交流漏磁与交变电磁检测技术,利用麦克斯韦方程建立了平衡电磁技术实现全角度裂纹检测的理论依据,对与检测方向成不同角度的管道裂纹

进行了有限元仿真分析,并结合实验验证了平衡电磁技术对管道表面裂纹全角度检测的有效性,得到了检测信号特征与裂纹角度的变化规律。

1 管道平衡电磁技术检测原理

平衡电磁技术是一种基于交流激励的检测手段,在被检管道表面同时产生交变磁场与涡流场,通过检测管道表面电磁的变化实现裂纹缺陷的检测。

1.1 平衡电磁技术检测原理

平衡电磁技术采用空间对称结构的传感器进行检测,利用激励线圈与检测线圈的彼此正交的排布方式,使得激励线圈在交流激励下产生交变磁场,U形铁氧体将磁场导至被检管道表面,在被检管道表面形成平衡电磁场,检测结构如图1所示。

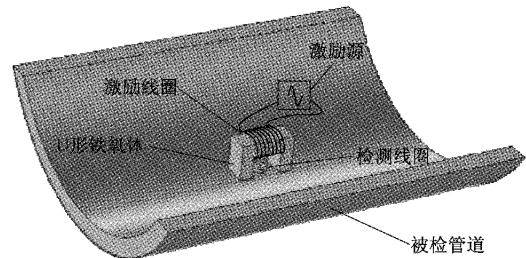


图1 管道平衡电磁技术结构

Fig.1 Structure of pipeline balance electromagnetic detection

平衡电磁技术传感器置于管道表面,交变电流激励会在管道表面形成变化的磁场,进而形成涡流场。当管道表面无缺陷时,与激励线圈垂直的方向上产生的磁通量不会穿过检测线圈,整体保持电磁平衡状态,传感器中不产生信号;当存在周向裂纹缺陷时,通以交变电流的激励线圈在管道表面产生的磁通被周向裂纹缺陷阻碍流动,从而扰乱管道表面的空间磁通量,使得一部分磁通穿过检测线圈,在检测线圈中产生电信号;当存在轴向裂纹缺陷时,管道表面感应出的涡流与裂纹缺陷正交,轴向裂纹缺陷阻碍涡流流动从而干扰空间磁场,使得检测线圈中产生电信号。

1.2 管道平衡电磁检测有限元分析

由于裂纹开口尺寸小,为了分析裂纹造成的管道表面电磁分布畸变,用有限元方法对管道表面电磁分布进行分析,平衡电磁检测技术在管道表面产生的磁场满足麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{D} 为电位移矢量; t 为时间; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度; ρ 为体电荷密度; ∇ 为哈密顿算子。

根据磁通连续性原理并引入库伦规范,可得到空间电磁场与矢量磁势之间的关系:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

由于管道采用铁磁性材料,在交流激励下,磁导率 μ 一定时,管道表面形成的稳定磁场强度 \mathbf{H} 与磁感应强度 \mathbf{B} 之间的关系,可表示为:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

利用哈密顿算子公式: $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \Delta \mathbf{A}$ 联立式(1)和式(5)可以得到管道表面电磁场分布的微分方程:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (7)$$

由于激励频率远小于10 MHz,可以忽略位移电流的影响,对式(7)进行简化:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (8)$$

由于管道为几何对称,对于无缺陷的管道表面建立的场为轴对称电磁场,对式(8)进行柱坐标系下分析,当激励线圈中通入角频率为 ω 的交变电流时,平衡电磁检测管道表面的电磁场分布微分方程为:

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} - \frac{\mathbf{A}}{r^2} \right) = \mathbf{J}_s - j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (9)$$

式中: σ 为被测管道的电导率; \mathbf{J}_s 为激励源电流密度。根据电磁场理论,上式微分方程和泛函极值的解等价,可通过对泛函求极值对电磁场求解,在给定边界条件和区域后,求解过程中可以得到各个节点的矢量磁位 \mathbf{A} ,通过矢量磁位可以得到各处磁感应强度等参数。

2 平衡电磁技术全角度裂纹检测信号机理

由于裂纹存在多方向性,基于平衡电磁技术检测原理分析了管道表面磁感应强度与感应电流的分布,对与平衡电磁技术检测传感器检测方向成各种角度的裂纹分别采用漏磁检测与交变电磁检测的方法分析。考虑平衡电磁检测为交流激励,激励电流随时间变化,管道表面产生的磁通密度与感应电流也随时间变化,故在复数形式下分析任意角度裂纹对管道表面电磁分布的影响。

2.1 管道表面电磁分布

平衡电磁技术检测传感器在1 kHz频率下工作,故可用时谐电磁场理论分析。电场与磁场的关系可以用麦

克斯韦方程的复数形式表示:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}} \quad (10)$$

引入复数形式下的本构关系:

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu \dot{\mathbf{H}} \quad (11)$$

结合式(10)与(11),可得到通以交变电流的激励线圈产生的磁感应强度 $\dot{\mathbf{B}}_j$ 与激励电流密度 $\dot{\mathbf{J}}_j$ 的关系:

$$\nabla \times \dot{\mathbf{B}}_j = \mu \dot{\mathbf{J}}_j \quad (12)$$

式(12)表示,由激励电流产生的磁感应强度与激励电流空间垂直,且相位相同。由U形铁氧体将激励电流产生的磁场以一定比例导至管道表面,管道表面的磁感应强度 $\dot{\mathbf{B}}_s$ 与激励电流产生的磁感应强度 $\dot{\mathbf{B}}_j$ 方向一致,相位滞后 φ ^[14]。由式(5)得时谐电磁场下管道表面磁通密度引起的管道表面矢量磁位 $\dot{\mathbf{A}}_s$ 的关系:

$$\dot{\mathbf{B}}_s = \nabla \times \dot{\mathbf{A}}_s \quad (13)$$

从式(13)可以看出由管道表面磁通密度 $\dot{\mathbf{B}}_s$ 引起的管道表面矢量磁位 $\dot{\mathbf{A}}_s$ 二者空间垂直,相位相同。此时,管道表面的感应电流密度 $\dot{\mathbf{J}}_g$ 与管道表面矢量磁位的关系为:

$$\dot{\mathbf{J}}_g = -j\omega \gamma \dot{\mathbf{A}}_s \quad (14)$$

其中, γ 为管道的电导率。由式(14)可知管道表面的感应电流密度 $\dot{\mathbf{J}}_g$ 与管道表面矢量磁位 $\dot{\mathbf{A}}_s$ 空间方向平行,且滞后 90° 。综上所述,管道表面且位于铁氧体两脚间的磁感应强度 $\dot{\mathbf{B}}_s$ 与管道表面的感应电流密度 $\dot{\mathbf{J}}_g$ 空间呈垂直关系,管道表面电磁分布如图2所示,且管道表面的感应电流密度 $\dot{\mathbf{J}}_g$ 比管道表面矢量磁位 $\dot{\mathbf{B}}_s$ 滞后 90° 。

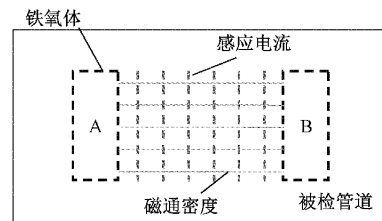


图2 管道表面电磁分布

Fig. 2 Electromagnetic distribution on the pipe surface

图2中A、B区域为铁氧体两脚在管道表面投影。由于传统的交流漏磁检测与单一的交变电磁检测均存在一定检测盲区^[15-17],从图2可以看出平衡电磁技术利用单一结构可以在管道表面同时形成交变磁场与涡流场,当管道表面存在缺陷时,管道表面的磁感应强度与管道表面的感应电流密度空间垂直的关系使得对交流漏磁与交变电磁检测范围互相补充,管道表面任意角度裂纹均

能有漏磁通或者电流畸变情况发生。

2.2 管道表面裂纹的漏磁检测原理分析

通有交变电流的激励线圈产生的磁通密度由U形铁氧体导至管道表面,当管道表面存在与平衡电磁技术传感器两脚连线(检测方向)夹角为 θ 的裂纹时,磁通密度向裂纹两端集中^[2],如图3所示。

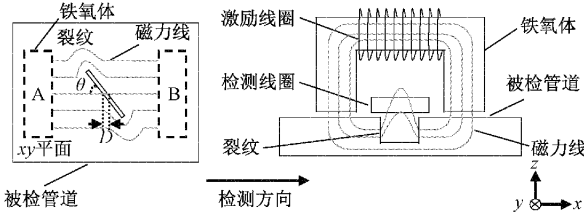


图3 漏磁检测

Fig. 3 Magnetic flux leakage detection

由于管道表面裂纹关于检测方向的对称性,故只分析 $0^\circ \sim 90^\circ$ 管道表面裂纹即可。当 θ 值较大时,可用漏磁检测技术原理对裂纹处漏磁通进行分析。当 θ 为 90° 时,漏磁通最大,随着 θ 的减小,漏磁通相应减小,且当 θ 小于 30° 时漏磁通极为微弱^[2]。随着 θ 的减小传感器经过裂纹的相对宽度 D 逐渐变长,且变化率较小。当 θ 值一定时,传感器处于裂纹中心位置,穿入与穿出检测线圈的漏磁通相等,当传感器在裂纹两壁位置穿入或穿出检测线圈的漏磁通最多。

在裂纹缺陷处由管道表面漏磁通引起的检测线圈感应电压 \dot{V}_c 表示为:

$$\dot{V}_c = -j\omega N_c \int_s \dot{B}_c \cdot ds = -j\omega N_c \dot{\phi}_c \quad (15)$$

其中, N_c 为检测线圈的匝数; \dot{B}_c 为泄露至空气中的磁感应强度,与管道表面的磁感应强度 \dot{B}_s 相位相同, $\dot{\phi}_c$ 为垂直穿过检测线圈的漏磁通。由漏磁通引起的感应电压 \dot{V}_c 比 $\dot{\phi}_c$ 相位滞后 90° ,由漏磁通引起的感应电压 \dot{V}_c 比管道表面的磁感应强度 \dot{B}_s 相位滞后 90° 。由式(15)结合漏磁通随角度变化规律可以得到,由漏磁通引起的感应电压随裂纹与检测方向夹角 θ 的减小而减小,感应电压在裂纹两壁出现峰值或谷值,峰谷间距随着经过裂纹相对宽度 D 变化,结合相对宽度 D 随角度变化规律,得到峰谷间距随裂纹与检测方向夹角 θ 的减小而缓慢增大。

2.3 管道表面裂纹的交变电磁检测原理分析

当管道表面存在与平衡电磁技术传感器两脚连线(检测方向)夹角为 θ 的裂纹时,管道表面感应电流会向裂纹两端集中^[18],产生感应电流畸变,如图4所示。当 θ 值较小时,可用交变电磁检测技术原理对裂纹处畸变电流进行分析。

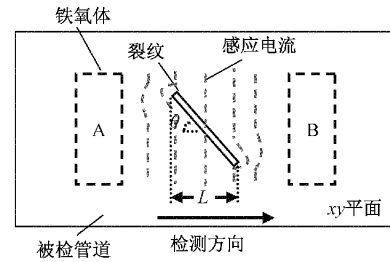


图4 交变电磁检测

Fig. 4 Alternating electromagnetic detection

当 θ 为 0° 时,感应电流畸变程度最大,随着 θ 的增大,感应电流畸变程度相应减小,且当 θ 大于 40° 时感应电流畸变程度极为微弱^[17]。随着 θ 的增大传感器经过裂纹的相对长度 L 变短,且变化率较大。当 θ 值一定时,传感器处于裂纹中心位置,由畸变电流引起的磁通穿入与穿出检测线圈的量相等,当传感器在裂纹两端位置穿入或穿出检测线圈的磁通量最多。

由式(15)可知,检测线圈敏感到的感应电压是磁通量的函数,由于平衡电磁技术传感器的结构使激励线圈产生的感应电流始终在与检测线圈平行的平面流动,对于管道表面由缺陷造成涡流场的畸变,利用式(5)的复数形式引入矢量磁位,分析感应电流引起磁感应强度与感应电压的关系。

管道表面由感应电流引起的接收线圈处的矢量磁位 \dot{A}_g 为^[18]:

$$\dot{A}_g = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\dot{J}_g}{l} dV \quad (16)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; l 为管道表面感应电流密度与检测线圈的距离; V 为管道表面感应电流密度的体积。由式(16)可以看出,由管道表面的感应电流引起的接收线圈处的矢量磁位 \dot{A}_g 与管道表面的感应电流密度 \dot{J}_g 同相位。

结合磁感应强度与矢量磁位的关系,根据磁感应强度与感应电压的关系可得检测线圈接收到管道表面由感应电流引起的感应电压 \dot{V}_d 为:

$$\dot{V}_d = -j\omega N_c \int_s \dot{B}_g \cdot ds = -j\omega N_c \int_s \nabla \times \dot{A}_g \cdot ds \quad (17)$$

引入斯托克斯公式,上式变为:

$$\dot{V}_d = -j\omega N_c \int_c \dot{A}_g \cdot dl \quad (18)$$

由感应电流引起的感应电压 \dot{V}_d 比感应电流引起的矢量磁位 \dot{A}_g 相位滞后 90° ,结合式(13)与式(14)可以得到由感应电流引起的感应电压 \dot{V}_d 比管道表面的磁感应强度 \dot{B}_s 相位滞后 180° ,根据前述由漏磁通引起的感应电压 \dot{V}_c 比管道表面的磁感应强度 \dot{B}_s 相位滞后 90° 。可得感

应电流引起的感应电压 \dot{V}_d 比漏磁通引起的感应电压 \dot{V}_c 滞后 90° 。由式(18)结合管道表面感应电流畸变情况可以得到,由感应电流畸变引起的感应电压随裂纹与检测方向夹角 θ 的增大而减小,感应电压在裂纹的两端点处出现峰值或谷值,峰谷间距随着经过裂纹相对长度 L 变化,结合相对长度 L 随角度的变化规律,得到峰谷间距随裂纹与检测方向夹角 θ 的增大而快速减小。

在正弦交流信号激励下,由漏磁通引起的感应电压可以表示为:

$$V_c = A_1 \sin(\omega t + \varphi) \quad (19)$$

由感应电流引起的感应电压可以表示为:

$$V_d = A_2 \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ) \quad (20)$$

其中, A_1 、 A_2 分别为漏磁通引起的感应电压与感应电流引起的感应电压各自的幅值, φ 为管道表面的磁感应强度 \dot{B}_s 在管道表面传播的延迟相位。

由于平衡电磁检测线圈敏感到的信号为缺陷造成的管道表面磁场畸变与涡流场畸变的叠加,故检测线圈的电压 V 表示为:

$$V = A_1 \sin(\omega t + \varphi) + A_2 \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ) \quad (21)$$

根据三角函数诱导公式,式(21)可以写成:

$$V = A_1 \sin(\omega t + \varphi) + A_2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (22)$$

结合 2.1 与 2.2 的研究,当管道表面裂纹与检测传感器运行方向夹角 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,是交变电磁检测单独作用,此时 A_1 幅值为 0,检测信号特征为先谷后峰^[18],峰谷间距由传感器经过裂纹相对长度 L 度量,传感器经过裂纹的相对长度 L 随裂纹角度增大的变化率较大,峰谷间距减小较快;当 θ 在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时,为漏磁检测与交变电磁检测的共同作用,由传感器在管道表面激励出的磁通密度与感应电流的分布可以得到, A_1 、 A_2 不同时为 0,从式(22)可以看出,检测线圈敏感到的电压为时间 t 的函数,在检测裂纹缺陷过程中检测线圈能够时刻存在检测信号;当 θ 在 $40^\circ \sim 90^\circ$ 时,是漏磁检测的单独作用,此时 A_2 幅值为 0,检测信号特征为先峰后谷,峰谷间距由传感器经过裂纹相对宽度 D 度量,传感器经过裂纹的相对宽度 D 随裂纹角度增大的变化率较小,峰谷间距减小较慢。综上,平衡电磁技术对管道表面全角度裂纹的检测没有检测盲区。

3 管道内表面不同角度裂纹仿真分析

利用 COMSOL 有限元分析软件,针对平衡电磁技术的交流激励情况,选择在频域下对管道内表面不同角度的裂纹缺陷进行求解分析,根据裂纹相对于检测方向的对称性,以第一象限角度为例,仿真计算管道内表面 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的裂纹,分析管道表面的电磁能量畸变情况与检测线圈敏感到的感应电压。

3.1 模型建立

根据平衡电磁技术传感器的结构,建立管道内表面不同角度裂纹检测的三维仿真模型如图 5 所示,其中管道的材料为 X65 钢;空气层建立为球体;检测传感器中 U 形铁氧体相对磁导率为 2 000、电导率为 0.01 S/m;激励线圈与检测线圈均为铜材质,激励线圈缠绕至 U 形铁氧体上厚度为 2 mm、长度为 12 mm,检测线圈缠绕匝数为 400 匝;给激励线圈施加频率 1 kHz,大小为 10 V 的交流电为模型提供交变磁场;具体的模型尺寸参数如表 1 所示。

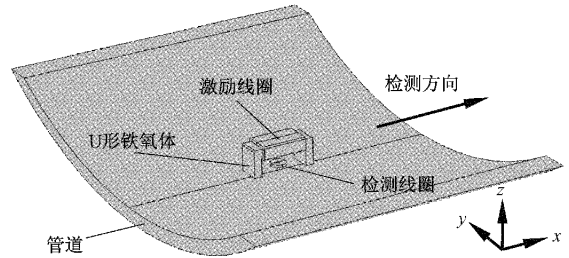


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

表 1 模型尺寸参数

Table 1 Model size parameters

结构	外径/mm	内径/mm	长度
管道	457	447	200
检测线圈	8	2	2
空气	600		

图 6 为仿真得到的管道内表面的电磁分布,从中可以看出管道表面磁感应强度与感应电流密度都是均匀分布,整体呈现电磁平衡,与原理分析一致。此时,检测线圈不会产生感应电压信号。

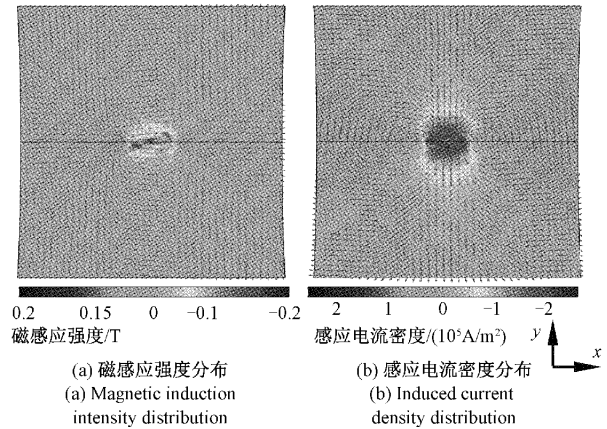


图 6 管道表面无缺陷时电磁分布

Fig. 6 Electromagnetic distribution on the surface of pipeline without defects

3.2 不同角度裂纹仿真分析

为了分析不同角度裂纹下管道内表面电磁分布律,基于3.1中建立的仿真物理模型,以 x 轴正方向为检测方向,在 xy 平面分别建立与检测方向成 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 的裂纹,其中,裂纹尺寸均按照长6 mm、宽1 mm、深3 mm设置,针对以上7种角度裂纹进行仿真,得到结果如图7所示。

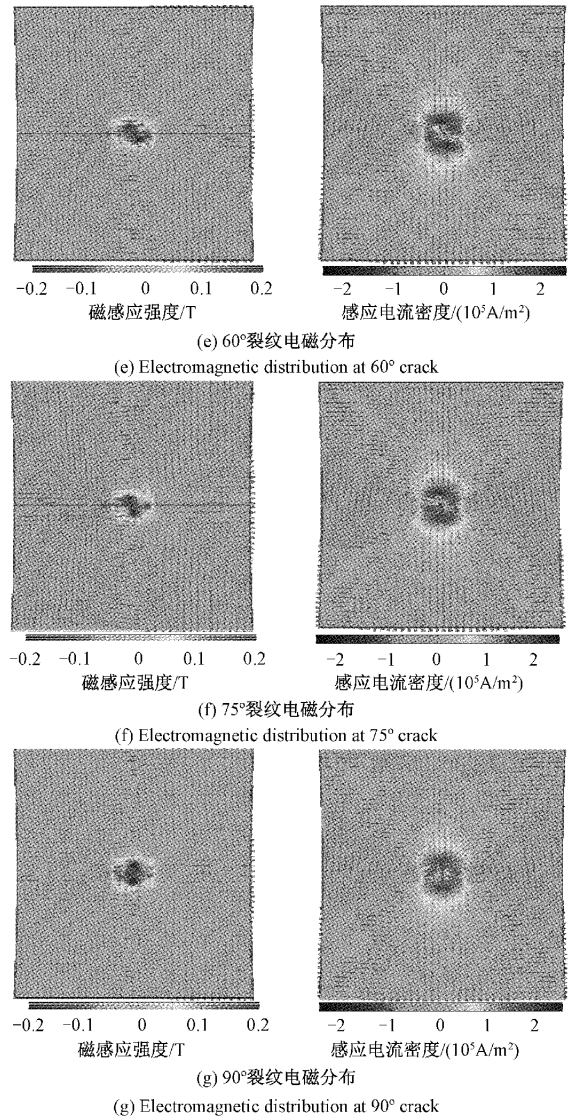
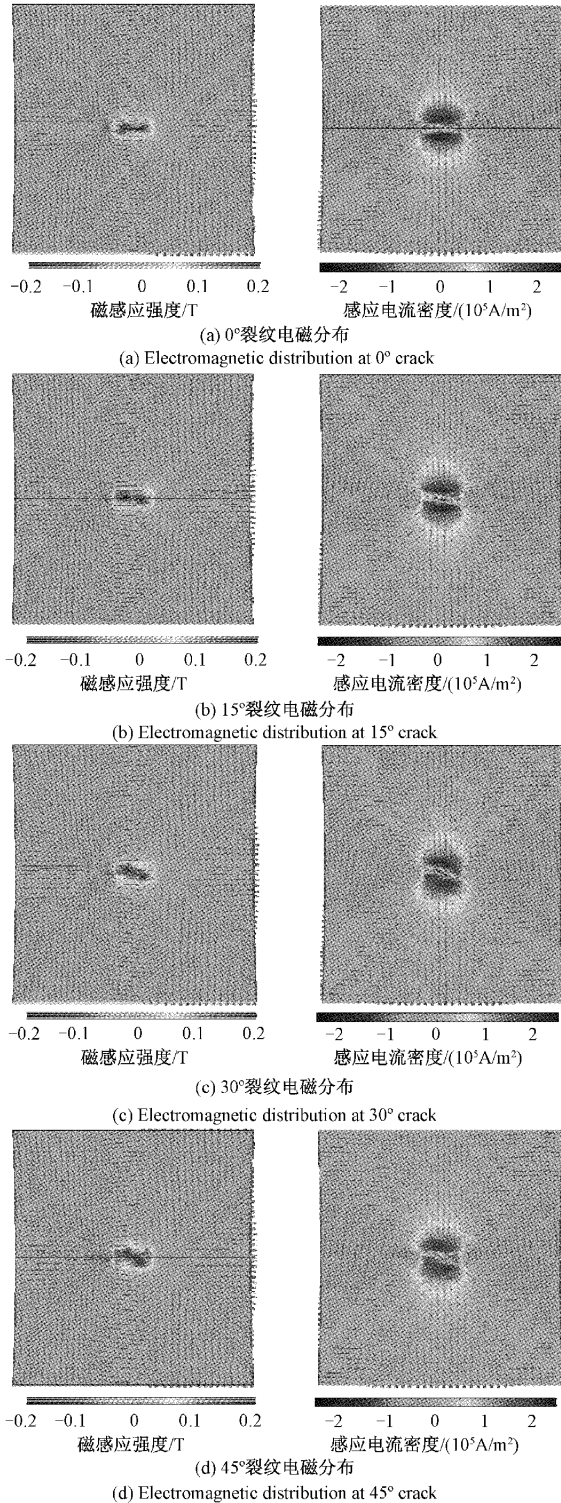


图7 管道表面不同角度裂纹的电磁分布
Fig. 7 Electromagnetic distribution on the surface of pipeline without defects

从图7可以看出,与管道表面无缺陷情况对比,存在裂纹时,管道表面的磁感应强度与感应电流密度根据裂纹角度的不同呈现不同程度的畸变,管道表面电磁场的均匀分布被打断,裂纹周围的部分磁通向磁导率更低的空气流动(沿 z 方向通过检测线圈),感应电流为了满足连续性也在裂纹的两端集中。裂纹与检测方向夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,随着裂纹角度的增加,磁感应强度颜色由浅至深,感应电流密度颜色由深至浅,表示在管道表面且位于检测传感器U形铁氧体两脚中间的磁感应强度畸变程度逐渐增大,感应电流密度畸变程度逐渐减小,在裂纹角度为 0° 时,感应电流密度颜色最深,表示感应电流密度的畸变程度最大,检测线圈只敏感到涡流场的变化,在裂纹角度为 90° 时,磁感应强度的颜色最深,对应磁感

应强度的畸变程度最大,检测线圈只敏感到漏磁通带来的影响,与平衡电磁技术全角度裂纹检测机理分析一致。

3.3 不同角度裂纹检测信号仿真分析

采用逐点扫描的方式模拟实际的探头检测,以图5所示的模型,令传感器沿 x 轴正方向在管道表面进行移动,选取裂纹中点为原点,以坐标 $(-20,0,0)$ 为起点,坐标 $(20,0,0)$ 为终点,步进为 0.1 mm ,对裂纹与检测方向成 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 7种角度的裂纹进行电压信号仿真分析,如图8所示。

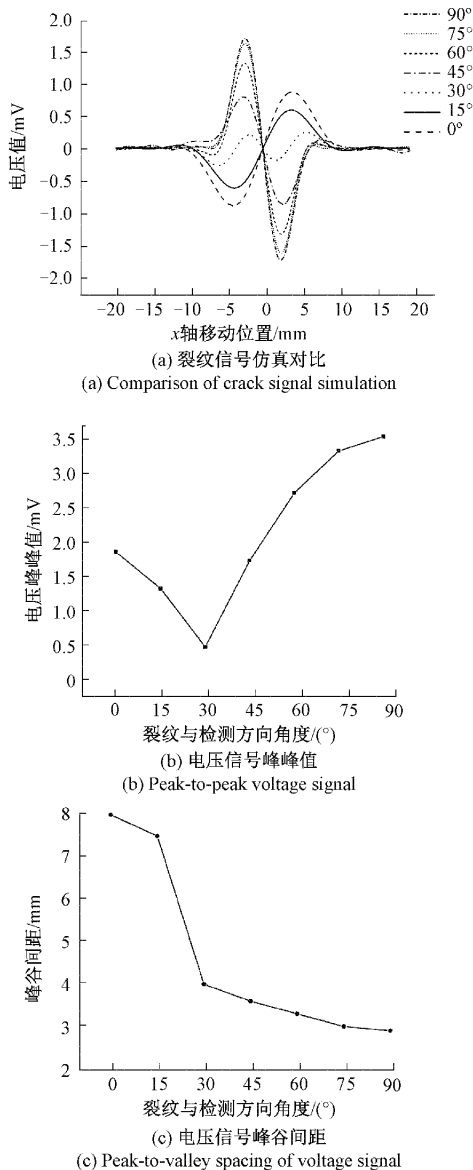


图8 管道表面不同角度裂纹的信号仿真对比

Fig. 8 Signal simulation comparison of cracks at different angles on the pipe surface

从图8(a)可以看出,以上7个角度的裂纹均存在检测信号,说明平衡电磁技术可以对管道表面全角度裂纹

进行检测。结合管道表面电磁分布规律,从检测电压信号特征上分成3类,以 30° 为分界, $0^\circ \sim 30^\circ$ (不包括 30°)时检测电压信号呈现先波谷后波峰的特征,此时主要是感应电流畸变发生作用; $30^\circ \sim 90^\circ$ (不包括 30°)时检测电压信号与 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时的信号特征相反,呈现先波峰后波谷的特征,此时主要是漏磁通发生作用;在裂纹与检测方向成 30° 时检测电压信号呈现双波峰波谷峰特征,此时为感应电流畸变与漏磁通共同作用。

为进一步分析不同角裂纹之间电压信号的特征,分别对以上7组角度的裂纹检测电压信号的峰峰值与波峰波谷间距进行提取并绘制图8(b)、图8(c),可以看出,对于仿真得到的检测电压信号在裂纹与检测方向为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,随裂纹与检测方向夹角增加峰峰值逐渐减小, 0° 时峰峰值最大;当裂纹与检测方向成 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时,随裂纹与检测方向角度增加峰峰值逐渐增大, 90° 时峰峰值达到最大且大于 0° 时的峰峰值;当裂纹与检测方向成 30° 时,两个峰谷特征的电压信号峰峰值一致且为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中最小。从仿真得到的检测电压信号的峰谷间距可以看出随着裂纹与检测方向夹角的增加,峰谷间距整体呈下降趋势,在裂纹与检测方向成 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时下降剧烈,裂纹与检测方向所成角度越接近 90° ,峰谷间距的变化越平缓。该变化规律与传感器通过不同角度裂纹的相对长度和宽度变化分析相符。

综上,结合不同角度裂纹下管道内表面电磁分布与检测电压信号可以得到,漏磁通与感应电流畸变共同影响着检测电压信号,图8中检测电压信号的变化趋势说明了在裂纹与检测方向成 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中,平衡电磁技术传感器单一结构产生两个场的畸变形成检测范围互相补充,与检测信号机理分析一致。结合信号的峰谷出现次序、信号峰峰值及峰谷间距可对裂纹角度做进一步量化参考。其余象限角度与 $0^\circ \sim 90^\circ$ 成对称关系,检测线圈也能敏感到信号。

4 管道内表面不同角度裂纹实验与分析

为验证平衡电磁技术对管道表面全角度裂纹检测的有效性,设计了平衡电磁检测系统并搭建了检测实验平台,工作原理如图9所示。

以第一象限角度为例,对管道内表面与检测方向成 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 的裂纹进行检测。平衡电磁技术检测实验平台整体分为运动控制系统与平衡电磁检测系统两部分,其中运动控制系统由三轴滑动平台、步进电机、驱动单元、编码器、采集控制模块组成;平衡电磁检测系统由平衡电磁检测传感器、检测信号处理模块、PC机组成。

检测实验过程中,采集控制模块向驱动单元发送控

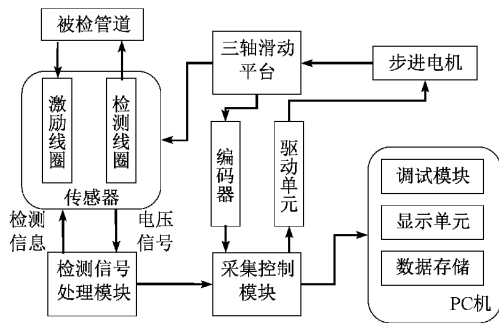


图9 平衡电磁检测实验原理

Fig. 9 Experiment principle of balanced electromagnetic detection

制信号,驱动步进电机进行匀速转动,步进电机的匀速转动带动三轴滑动平台匀速直线运动,平衡电磁技术检测传感器通过弹性支架与三轴滑动平台稳固连接。检测信号处理模块产生频率为1 kHz,大小为10 V的电压信号对平衡电磁技术检测传感器进行激励,同时将检测线圈敏感到的电压信号进行降噪处理。三轴滑动平台每匀速直线运动0.1 mm 带动编码器转动并输出一个脉冲信号,将此脉冲信号作为传感器运动与检测信号采集的同步标志。采集控制模块每收到一个编码器脉冲信号,对降噪处理后的检测信号采集一次,实现0.1 mm 等间距采样,为不同角度裂纹峰谷间距离量化提供实验基础。采集控制模块将检测信号的模拟电压值转换成数字信号传输给PC机,在显示单元观测信号并存储数据,实验平台如图10所示。

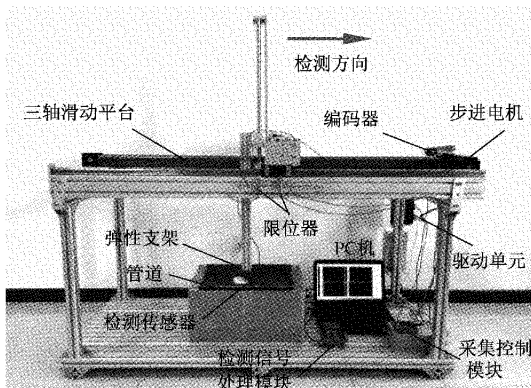


图10 平衡电磁检测实验平台

Fig. 10 Balanced electromagnetic detection experiment platform

为保证检测实验与理论分析条件一致,选择与仿真模型参数一致的 $\Phi 457$ 管道的一部分进行实验。选择7段管道在内壁利用电火花加工与检测方向夹角分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 的裂纹,裂纹尺寸均为长6 mm、宽1 mm、深3 mm。三轴滑动平台在采集控制模块的同步采集控制下,保证每次检测实验的采样间隔均为

0.1 mm。在检测方向一致的前提下,为保证7段不同裂纹角度管道实验的移动距离相同,如图10中指出,在三轴滑动平台上添加相距40 mm限位器 A_0 和 A_1 ,以 A_0 和 A_1 的中心为坐标原点,将裂纹中心与坐标原点重合放置,移动路径为从 A_0 到 A_1 ,确保平衡电磁技术检测传感器从管道无缺陷位置到完整通过整个裂纹缺陷。对7段管道实验的检测电压信号经降噪处理后输出显示,如图11所示。

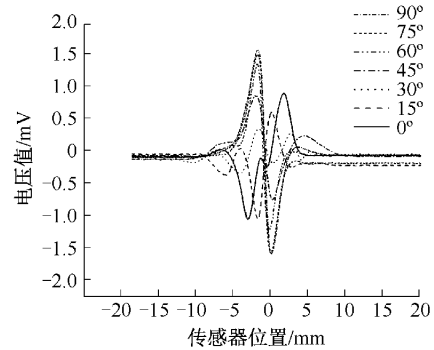


图11 不同角度平衡电磁检测信号对比

Fig. 11 Comparison of balanced electromagnetic detection signals from different angles

从图11可以看出,在相同检测实验条件下,平衡电磁技术对与检测方向成7种不同角度的管道裂纹均有检测电压信号,且检测信号特征与仿真分析一致。在管道裂纹与检测方向夹角为 30° 时,存在双峰特征,其余角度为单峰特征; $0^\circ \sim 30^\circ$ (不包括 30°)时检测电压信号特征为先波谷后波峰; $30^\circ \sim 90^\circ$ (不包括 30°)时检测电压信号特征与 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时的检测信号特征相反,为先波峰后波谷。

为了进一步分析与检测方向成不同角度裂纹的检测信号的幅值变化规律,对七段不同角度管道裂纹实验的检测结果峰峰值与峰谷间距进行提取,并绘制曲线进行对比分析,如图12所示。

从图12(a)可以看出,7组检测实验结果中,检测电压信号峰峰值变化规律与仿真分析趋势一致,也是以裂纹与检测方向夹角为 30° 时分界,在该角度时,检测电压信号峰峰值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中最小;当裂纹与检测方向夹角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,信号特征均为先波谷后波峰,检测电压信号随裂纹与检测方向夹角增加峰峰值逐渐减小, 0° 时峰峰值达到该阶段最大;当裂纹与检测方向夹角在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时,信号特征均为先波峰后波谷,随裂纹与检测方向角度增加峰峰值逐渐增大, 90° 时峰峰值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中最大。

从图12(b)可以看出,检测电压信号的峰谷间距随着裂纹与检测方向角度的增加整体呈下降趋势;当检测方向与裂纹成 0° 时,检测电压信号峰谷间距最大,此时

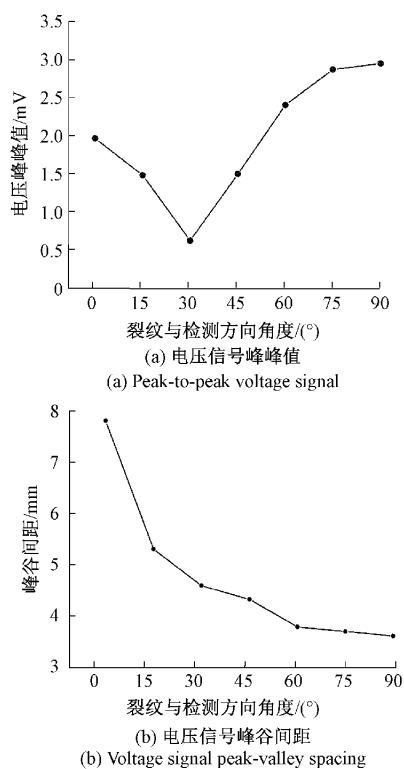


图12 不同角度裂纹的检测信号特征对比

Fig. 12 Comparison of detection signal characteristics of cracks at different angles

传感器通过裂纹的距离为裂纹的长度;当检测方向与裂纹成 90° ,检测电压信号峰谷间距最小,此时传感器通过裂纹的距离为裂纹宽度。

仿真与实验的结果可以看出检测信号峰峰值与峰谷间距在检测方向与裂纹夹角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 与 $30^\circ \sim 90^\circ$ 区间内均单调变化,故裂纹角度可从检测信号的特征信息进行区分。通过分析检测信号峰谷特征出现的先后顺序可先判定裂纹角度所处 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的区间;在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 区间内峰峰值与峰谷间距具有明显区分度,可结合峰峰值与峰谷间距的变化情况对裂纹角度量化分析;在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 区间内峰峰值区分度较高,可依靠峰峰值的变化情况进行裂纹角度量化分析。

5 结 论

针对管道内表面裂纹缺陷方向多样性问题,提出一种基于平衡电磁技术的管道内表面全角度裂纹缺陷检测方法。利用麦克斯韦方程组建立平衡电磁技术管道表面裂纹检测数学模型,根据管道表面产生的磁感应强度与感应电流密度分布情况,结合漏磁与交变电磁检测技术分析了全角度裂纹检测信号的产生机理与变化规律,证明了平衡电磁技术可以检测管道内表面所有角度裂纹;

根据对称性对检测方向与裂纹所成角度在第一象限情况进行有限元仿真分析与实验,二者结合共同验证了理论分析。

研究表明:1)在交流激励下,裂纹与检测方向夹角成 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,检测信号以 30° 为界限依次经历单一感应电流畸变作用、漏磁通与感应电流畸变共同作用、单一漏磁通作用3个阶段;2)检测电压信号特征在管道裂纹与检测方向夹角成 30° 时为双峰双谷,且检测电压峰峰值最小,在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时为先谷后峰,峰峰值单调减小,在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时为先峰后谷,峰峰值单调增加;3)管道裂纹与检测方向夹角成 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,峰谷间距由传感器通过裂纹的相对长度度量,裂纹与检测方向夹角成 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时,峰谷间距由传感器通过裂纹的相对宽度度量,峰谷间距整体呈单调递减趋势;4)结合检测电压信号的峰谷先后顺序、峰峰值与峰谷间距可实现对裂纹角度的量化分析。利用平衡电磁检测方法能够对管道内表面与检测方向成任意角度的裂纹实现有效检测。

参考文献

- [1] 贾心怡,马廷霞,刘维洋.波动载荷下X80管道轴向表面裂纹疲劳扩展研究[J].塑性工程学报,2018,25(4):262-268.
JIA X Y, MA T X, LIU W Y. Study on axial surface crack fatigue propagation of X80 pipeline under fluctuating load[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(4): 262-268.
- [2] 杨理践,郭天昊,高松巍,等.管道裂纹角度对漏磁检测信号的影响[J].油气储运,2017,36(1):85-90.
YANG L J, GUO T H, GAO S W, et al. Influence of the crack angle on the magnetic flux leakage detection signal in pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 85-90.
- [3] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method[J]. Measurement, 2017, 103: 275-282.
- [4] LIU B, MA Z Y, LIU Z Q, et al. Research on internal detection technology for axial crack of long-distance oil and gas pipeline based on micro magnetic method[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 19(1): 147592171987736.
- [5] 吴德会,刘志天,王晓红,等.利用复合激励的无盲点管道裂纹漏磁检测新方法[J].仪器仪表学报,2016,37(10):2259-2266.
WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. Novel MFL method for pipeline crack no blind spot detection using composite excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2259-2266.

- [6] 吴德会,黄松岭,赵伟,等. 油气长输管道裂纹漏磁检测的瞬态仿真分析[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 136-140.
WU D H, HUANG S L, ZHAO W, et al. Transient simulation analysis on magnetic flux leakage detection of cracks in long-distance oil and gas pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 136-140
- [7] QI M, CHEN S, ZHOU S, et al. Crack detection in pipes with different bend angles based on ultrasonic guided wave [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(3): 318-325.
- [8] 钟力强,朱泽群,张匆等. 基于导波的圆管横向裂纹检测的数值模拟与试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(6): 867-872+877.
ZHONG L Q, ZHU Z Q, ZHANG C, et al. Numerical simulation and experiment investigation of circumferential crack detection in pipeline based on guided wave [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(6): 867-872+877.
- [9] BAUMEISTER M BOUAOUA N WOLTERMANN F, et al. Ultrasonic crack-detection in demanding pipeline environments and low diameter pipes [C]. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, 2010: 423-428.
- [10] 马天天,林莉,张东辉,等. 基于 TOFD 周向扫查的厚壁管道倾斜裂纹精准定量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 23-29.
MA T T, LIN L, ZHANG D H, et al. Accurate quantification of inclined cracks in thick-walled pipes based on TOFD circumferential scanning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 23-29.
- [11] JIAO J P, ZHEN L, SONG G R, et al. Vibro-acoustic modulation technique for micro-crack detection in pipeline [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2011, 8321: 83213X.
- [12] LI W, GE J H, WU Y Y, et al. An electromagnetic helmholtz-coil probe for arbitrary orientation crack detection on the surface of pipeline [J]. Materials Transactions, 2017, 58(4): 641-645.
- [13] 李伟,赵建明,葛玖浩,等. 不锈钢管道均匀电磁场内检测探头设计和试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(6): 123-129.
LI W, ZHAO J M, GE J H, et al. Design and experimental analysis of uniform electromagnetic probe for inner inspection of stainless steel pipe [J]. Journal of China University of Petroleum, 2019, 43(6): 123-129.
- [14] ZHAO S, SUN L, GAO J, et al. Uniaxial acfm detection system for metal crack size estimation using magnetic signature waveform analysis [J]. Measurement, 2020, 164: 108090.
- [15] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks-ScienceDirect [J]. NDT & E International, 2016, 79: 123-131.
- [16] 杨理践,梁成壮,高松巍,等. 管道漏磁内检测裂纹缺陷仿真与实验研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(6): 59-63.
YANG L J, LIANG CH ZH, GAO S W, et al. Simulation and experimental research on the crack defect of pipeline magnetic flux leakage inspection [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2020, 40(6): 59-63.
- [17] LI W, CHEN G M, YUAN X A, et al. Analysis of the lift-off effect of a U-shaped ACFM system [J]. NDT & E International, 2013, 53(11): 31-35.
- [18] 杨理践,郑文学,高松巍,等. 基于平衡电磁技术的钢板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 196-203.
YANG L J, ZHENG W X, GAO S W, et al. Steel plate crack defect detection method based on balanced electromagnetic technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 196-203.

作者简介



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888 @ 163.com

Yang Lijian received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981 and received his M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.



郑文学(通信作者), 2016 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为长输油气管道裂纹内检测技术相关理论。

E-mail: 997822911@ qq.com

Zheng Wenxue (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2016. He is currently a Ph.D. student at Shenyang University of Technology. His main research direction is the theory of balanced field detection technology.