

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209435

高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究*

耿浩^{1,2}, 夏浩², 王国庆¹

(1. 沈阳工业大学信息学院 沈阳 110870; 2. 大连理工大学工业装备智能控制与优化教育部重点实验室 大连 116024)

摘要:管道内外壁缺陷的有效区分是对缺陷进行有效量化的前提,提出一种基于动生涡流的高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷的定位区分方法,利用涡流磁场与外磁场的耦合作用时内外壁磁场信号的变化差异特征区分缺陷位置。首先建立高速漏磁检测数学模型,分析了涡流分布特点以及涡流磁场与外磁场耦合作用规律,利用有限元方法计算分析不同位置时,耦合作用规律对管道内外壁磁化状态影响及内外壁缺陷漏磁场信号差异特征;设计高速漏磁检测实验平台,对不同运行速度、不同检测位置处钢管内外壁缺陷区分效果进行实验研究。结果表明,接近磁化线圈位置时,管壁内产生的涡流磁场方向与管道外壁磁场方向相同、与管道内壁磁场方向相反,在离开磁化线圈位置时,涡流磁场方向与管道外壁磁场方向相反、与管道内壁磁场方向相同;不同检测位置处,管壁磁场变化规律相反,且速度越快,磁化状态影响受影响程度越大,内外壁漏磁场信号差异特征越明显,高速检测时可有效对管道内外壁缺陷进行定位区分,实验结果和理论分析具有很好的一致性。

关键词:漏磁检测;涡流效应;高速检测;有限元仿真;磁场耦合;内外壁缺陷

中图分类号: TH878 TM153.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing

Geng Hao^{1,2}, Xia Hao², Wang Guoqing¹

(1 School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Key Laboratory of Intelligent Control and Optimization for Industrial Equipment, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The effective differentiation of pipe inner and outer wall defects is the premise of effective quantification of defects. A method of locating and distinguishing pipe inner and outer wall defects in high-speed magnetic flux leakage detection based on dynamic eddy current is proposed. In this method, the defect location is distinguished by the variation characteristics of magnetic field signals in inner and outer walls when the eddy current magnetic field and external magnetic field are coupled. Firstly, the mathematical model of high-speed magnetic flux leakage detection is established, and the eddy current distribution characteristics and the coupling law of eddy current magnetic field and external magnetic field are analyzed. By using the method of finite element analysis, the influence of coupling action law on the magnetization state of the inner and outer wall and the different characteristics of magnetic leakage signal of inner and outer wall defects at different positions are calculated. A high-speed magnetic flux leakage test platform is designed, and the effect of defect discrimination on the inner and outer wall of steel pipe at different running speeds and detection positions is studied experimentally. Results show that when the pipe enters the position of magnetized coil, the direction of the eddy current magnetic field is the same as that of the outer wall of the pipe. But it is opposite to that of the inner wall of the pipe. When the pipe leaves the position of the magnetized coil, the direction of the eddy current magnetic field is the same as that of the inner wall of the pipe, but opposite to that of the outer wall of the pipe. At different detection positions, the variation law of pipe wall magnetic field is obviously opposite, and with the increase of detection speed, the magnetization state is affected more obviously, and the more obvious the difference of magnetic leakage signals between inner and outer walls. High-speed detection can effectively locate and distinguish the defects of the inner and

收稿日期:2022-03-14 Received Date: 2022-03-14

* 基金项目:国家自然科学基金(62101356)、大连理工大学工业装备智能控制与优化教育部重点实验室开放课题基金(LICO2021TB02)、辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKZ0134)资助

outer wall of the pipe. The experiment results and theoretical analysis have very good consistency.

Keywords: magnetic flux leakage testing; eddy current effect; high-speed testing; finite element simulation; magnetic coupling; Inner and outer wall defect

0 引言

漏磁检测技术因其具有无需耦合剂、易于实现自动化检测、检测速度快、对体积型缺陷敏感、可判断缺陷几何形态等优点,而被广泛应用于铁磁性材料的在线无损检测行业中^[1-4]。管道漏磁检测技术主要利用管壁缺陷处信号的变化规律,实现对缺陷形貌和尺寸的判别,然而管道内外壁不同尺寸缺陷存在漏磁信号“特征类似”的现象,因此必须对缺陷位置进行有效区分,才能对缺陷尺寸进行精准量化。

目前在实际应用中,管道内外壁缺陷的区分方法包括基于外部辅助硬件和基于信号特征规律两种区分方法^[5]。其中,采用辅助其他检测形式的方法主要为漏磁和涡流融合检测法,借助涡流信号的趋肤效应,对内外缺陷信号进行区分^[6-10];基于信号特征缺陷区分的方法,主要是利用信号数值规律及数据处理方法,如基于信号源极值特征法、基于支持向量机法、中心频率比较法、中心斜率区分法、基于数字信号差分法^[11-14]。目前管道的检测多数采用在线检测方法,在不同应用领域,高速漏磁检测过程中不可避免产生新的电磁效应,当超过各自常规的检测速度后,缺陷的检测效果会受到检测速度的影响,影响检测结果的一致性^[15-18],对于高速检测过程中内外壁区分方法研究较少;且目前大部分的研究仅适用于相同尺寸的内外缺陷特征值对比与区分,无法进行不同尺寸的内外缺陷进行有效区分,而在线检测过程中检测速度的增加尤其会对信号特征产生影响,因此仍需要探索新的方法对高速漏磁检测过程中内外壁区分方法进行研究。

本文将高速检测过程中产生的涡流效应进行利用,结合不同位置处磁化线圈磁场变化规律的差异性,提出一种基于动生涡流的高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷的区分方法。建立了磁场强度对漏磁信号影响的理论模型,分析了不同位置处涡流磁场对管道内外壁的磁化状态影响规律,及不同检测位置处缺陷漏磁场信号变化特征的差异性,分别利用有限元仿真分析和工程实验两种方式,从理论和实际两个方面证明了该方法对于内外壁缺陷区分的有效性和可行性。

1 管道高速漏磁检测原理

1.1 管道漏磁检测系统

管道漏磁检测系统主要包括内检测系统和外检测系

统两种形式,管道漏磁内检测系统主要采用永磁励磁形式,检测器位于管道内部进行检测,多用于长输油管道的内检测;管道漏磁外检测系统主要采用励磁线圈形式,励磁和检测单元位于管道外侧,多用于钢管的出厂检测。内检测和外检测两种检测方式应用过程中均需对管道内外壁缺陷位置进行定位区分。采用管道漏磁外检测系统进行分析,管道漏磁外检测主要通过待测管道和磁化线圈之间的相对运动来实现管道的全管检测,管道外检测系统主要包括用于励磁的磁化线圈、用于检测的磁场传感器、用于显示的上位机分析软件等部分。利用通电的励磁线圈对待测管道进行局部磁化,通过传感器实时记录磁场信息,检测之后利用信号调理电路对传感器检测到的磁场信号进行滤波、放大等处理,将处理后的信号最终通过PC终端软件进行显示,供工作人员进行下一步的分析,给出管道的缺陷信息,管道漏磁外检测示意图如图1所示。

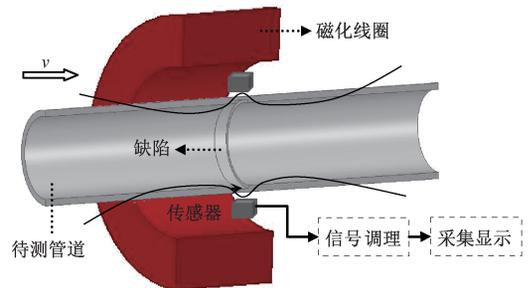


图1 管道外检测原理

Fig. 1 Schematic diagram of outside pipeline inspection

在检测过程中,目前主要是采用将检测传感器安放在线圈内侧的中心部位的形式,这种检测方式可以最大程度的利用线圈中心磁化场强度最大的特性,可以对缺陷进行很好的检出,但该方式无法直接通过信号区分管道内外壁缺陷位置信息。

1.2 缺陷漏磁场产生机理

漏磁检测技术应用的前提是基于铁磁性材料具有高磁导率的性质,管道漏磁检测技术在实际应用过程中,首先利用外加磁场充分磁化管壁,当管壁上无缺陷时,磁力线位于管壁内部且平行于管壁,当管壁上产生缺陷时,管壁缺陷处磁导率发生突变,导致管壁中磁力线的平行状态被破坏,致使原本位于管壁内部的磁力线扩散到管道表面,然后通过传感器实时记录磁场信息,最终实现缺陷的判定。

根据电磁理论可知,在无电流区,磁通密度 \mathbf{B} 是无旋度的,可以表示为标量磁势 V 的梯度:

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \nabla V \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 是磁感应强度; V 是标量磁势; μ_0 是自由空间的磁导率。

将高斯定律应用于式(1)得到拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

当被测铁磁性材料被空气包围时,可将得到拉普拉斯方程的解代入式(1)即可得到材料附近空间中任意点 $P(x, y, z)$ 处的磁通密度 \mathbf{B} 。

在两个具有不同磁导材料的界面上,磁场的强度矢量的切向分量和磁感应矢量的法向分量是连续的,因此可以得到标量磁势 V :

$$V(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\rho_m(x', y', z')}{|\mathbf{R}|} dv + \frac{1}{4\pi} \int_s \frac{\sigma_m(x', y', z')}{|\mathbf{R}|} ds \quad (3)$$

$$\rho_m(x', y', z') = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (4)$$

$$\sigma_m(x', y', z') = \mathbf{n} \cdot \mathbf{M} \quad (5)$$

式中: \mathbf{R} 为铁磁体表面或内部上任一点到空气中点 $P(x, y, z)$ 的位置矢量; v 和 s 分别为铁磁体的体积和表面积; $\rho_m(x', y', z')$ 为体磁荷密度; $\sigma_m(x', y', z')$ 为面磁荷密度; \mathbf{M} 为磁化强度; \mathbf{n} 是垂直于铁磁体表面的指向外部的单位向量。

在外磁场作用下,管道缺陷处产生的漏磁场原理示意图如图2所示。

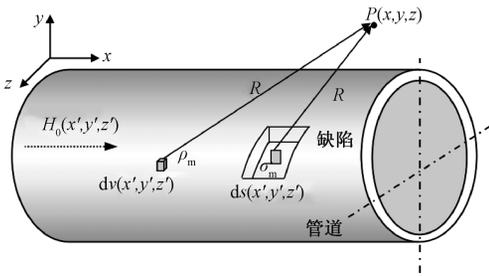


图2 缺陷漏磁场产生原理

Fig. 5 Schematic diagram of defect leakage field generation

结合式(1)和(3), $P(x, y, z)$ 处的磁感应强度 \mathbf{B} 可以表示为:

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\rho_m(x', y', z')}{|\mathbf{R}|^3} \mathbf{R} dv + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_s \frac{\sigma_m(x', y', z')}{|\mathbf{R}|^3} \mathbf{R} ds \quad (6)$$

为方便分析,假设被测管道的相对磁导率为常数,则体磁荷密度忽略不计时,一般情况下,磁荷密度 σ_m 的表达式如式(7)所示^[19]。

$$\sigma_m = 5.3 \left(\frac{h_2/b + 1}{h_2/(\mu b) + 1} \right) H_0 \quad (7)$$

式中: H_0 为管壁内磁场强度; μ 为被测管道的相对磁导率; h_2 和 b 为管壁缺陷尺寸参数。

结合式(6)和(7)可知,管道缺陷处产生的漏磁场信号强度与管壁内磁场强度成正比,即检测过程中,管壁的整体磁化状态将直接影响着管道缺陷处漏磁场信号特征。

2 管道内外壁缺陷区分机理

基于电磁感应相关定律,当通过构件内部的磁通量发生变化时将产生感应电流,由于在线检测过程存在上述特点,线圈磁场的作用相当于令管道内磁通量发生变化,因此被测管壁的内部将产生动生涡流,而管壁内涡流的存在在管壁中产生涡流磁场,从而对管壁磁化状态产生影响,因此在线漏磁检测过程中缺陷漏磁场信号特征不仅与磁化线圈产生的有关,同时与涡流磁场的分布位置和大小有关,进而影响缺陷检测。因此明确高速检测时涡流磁场特性,对进一步实现缺陷位置区分和有效的高速检测至关重要。

2.1 涡流分布特征

钢管周向缺陷漏磁检测系统通常采用穿过式线圈产生轴向磁化场,当在磁化线圈内施加电流时,磁力线从线圈一侧的空气中进入钢管内部,在磁化线圈中心处聚集,从线圈另一侧折射进入空气中,当钢管逐渐运动到磁化线圈的边缘位置时,根据欧姆定律,产生的感应电动势施加到钢管上,此时可得到圆环上感应涡流密度为^[20]:

$$J_e = \frac{\varepsilon}{drR} = -\frac{v}{2\pi\rho r} \iint_s \frac{dB_z(r, \theta, z)}{dz} ds \quad (8)$$

当钢管以某一固定速度逐渐通过磁化线圈时,根据式(8)可知,通过钢管内部的轴向磁场若发生变化,将导致在管壁内部产生动生涡流。利用磁化线圈为中心,将整个线圈的磁化区域分为接近区域和远离区域,由于磁化线圈关于中心两侧产生的磁场方向相反,即式(8)中轴向磁场 B_z 的变化率相反,导致接近区和远离区内管壁中的涡流方向相反,管壁中涡流的分布状态如图3所示。

根据线圈磁场的分布规律,线圈产生的轴向磁场信号特征成正弦信号分布规律,即线圈中心位置磁场强度最强,左右两侧位置信号强度逐渐降低,而磁场变化率规律与信号强度变化规律呈相反态势,即磁场变化率在线圈中心位置处最小,在线圈边缘位置处最大,根据式(8)可得到涡流分布规律为线圈中心位置涡流最小,线圈边缘处涡流强度最大,且线圈中心左右两侧涡流方向相反。

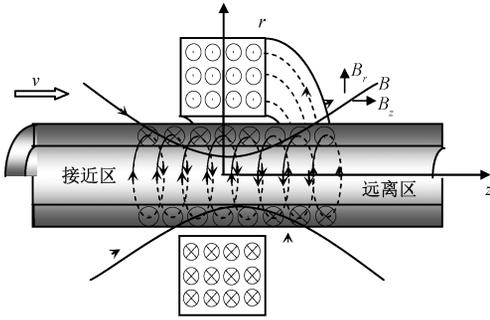


图3 检测过程中涡流分布特征

Fig. 3 Characteristic state diagram of eddy current distribution during testing

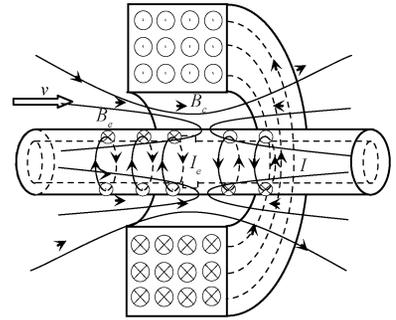


图4 涡流磁场分布特征

Fig. 4 Characteristic state diagram of eddy current magnetic field distribution

2.2 涡流磁场与外磁场耦合作用特征

由麦克斯韦方程相关理论可知,管壁内生涡流将感应出涡流磁场,从而对管壁磁化特性和管壁上缺陷漏磁信号分布特征产生影响,管壁内涡流磁场 H_J 可以表示为:

$$H_J = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J_e \times r}{r^3} dV \quad (9)$$

式中: V 表示管壁上涡流存在的区域; r 为涡流元磁场点的位移向量。

涡流的强度和方向直接影响着涡流磁场的状态,因此在接近区,钢管外壁处涡流磁场与外磁场同向,钢管内壁处涡流磁场与外磁场反向,实际加载在管道外壁和内壁的有效磁场分别表示为:

$$H_1 = H_0 + H_J \quad (10)$$

$$H_2 = H_0 - H_J \quad (11)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为接近区管道外壁和管道内壁处的有效磁场; H_0 为接近区线圈产生的外加磁场; H_J 为接近区涡流磁场。

在远离区时,钢管外壁处涡流磁场与外磁场反向,钢管内壁处涡流磁场与外磁场同向,实际加载在管道外壁和内壁的有效磁场分别表示为:

$$H'_1 = H'_0 - H'_J \quad (12)$$

$$H'_2 = H'_0 + H'_J \quad (13)$$

式中: H'_1 和 H'_2 分别为远离区管道外壁和管道内壁处的有效磁场; H'_0 为远离区线圈产生的外加磁场; H'_J 为远离区涡流磁场。

根据涡流分布方向可知涡流磁场分布特征如图4所示。

根据式(10)和(12)可知,接近区和远离区的管道外壁磁场差值 ΔH_1 为负,因此针对外壁缺陷,位于离开区位置的传感器检测到的缺陷漏磁信号磁场信号将小于位于接近区位置时检测到的磁场信号;通过式(11)和(13)可知,接近区和远离区的管道内壁磁场差值 ΔH_2 为正,因此当检测传感器分别位于接近区和离开区时进行信号检

测时,传感器检测到的管道内壁缺陷处漏磁场信号将增加,通过分析不同检测位置处缺陷漏磁场信号的特征变化,可以对管道内外壁缺陷进行有效区分。

3 磁化状态及缺陷特征仿真分析

利用有限元分析方法进一步验证高速漏磁检测过程中动生涡流效应对于管道内外壁缺陷的位置区分的有效性和可行性,本文利用 Ansoft 电磁场有限元仿真软件对理论模型进行仿真研究,建立的仿真模型主要由磁化线圈和待测管道组成,根据不同仿真需求进行管道缺陷的设置,设置仿真模型中线圈内电流密度为 $1.0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,管道和线圈基本尺寸模型图如图5所示。

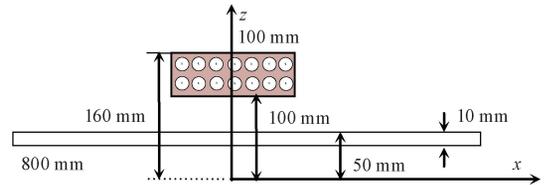


图5 仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation model

3.1 磁化状态影响规律分析

利用图5仿真模型,模型尺寸不变,设置磁化线圈位置不动,利用 band 区域将被测管道设置在 1、5、10 m/s 的速度下运行,管壁磁场在不同运行速度时的分布状态如图6所示。

由图6看出,管壁内的磁场状态受检测速度影响程度较大,当检测速度为 1 m/s 时,管壁内磁场分布较为均匀,且线圈中心位置强度最大;随着检测速度逐渐提升至 10 m/s 时,管壁内轴向和径向的均匀的磁场的分布状态被完全破坏,将对缺陷漏磁信号产生较大的影响。

为进一步分析和获取涡流磁场对管道内外壁磁场强度和分布状态的影响规律,将内外壁表面磁场在不同检

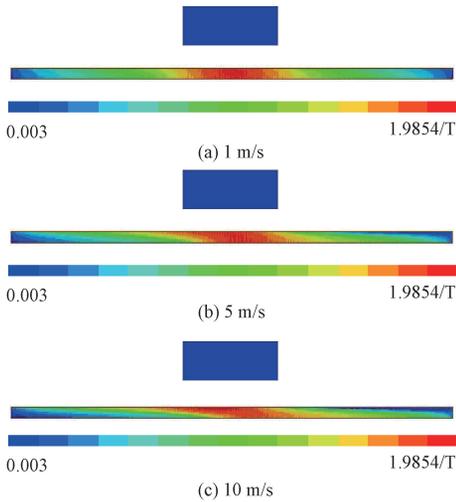


图6 不同速度时管壁磁场特征

Fig. 6 Magnetic field characteristics of pipe wall at different speeds

测速度时的强度值进行统一分析,为了显示更加直观,将不同速度下的检测信号纵坐标进行等间隔处理,不同检测速度时内外壁磁场强度如图7所示。

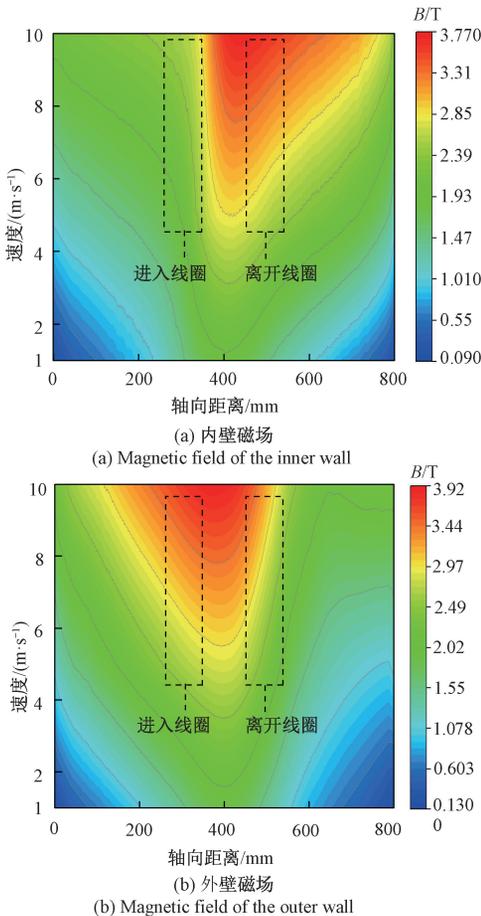


图7 内外壁磁场特征随速度变化规律

Fig. 7 Variation law of magnetic field characteristics of inner and outer walls with velocity

由图7可知,管道内、外壁磁场的强度和分布特征受检测速度影响明显,当检测速度较低时,在进入线圈位置和离开线圈位置处,管道内外壁磁场变化不大;随着检测速度增加,对于管道内壁位置区域,管壁在进入线圈位置处的磁场强度明显小于离开线圈位置区域处的磁场强度,对于管道外壁位置区域,进入线圈位置处得磁场信号明显大于离开线圈位置处磁场信号,且速度越大,管壁磁化状态差异性越明显。

3.3 内外壁缺陷信号影响规律分析

为分析磁化状态对钢管缺陷漏磁检测信号差异性,利用图5仿真模型,线圈模型尺寸不变,设置磁化线圈位置不动,在管道模型内、外壁上设置缺陷,缺陷尺寸为长5 mm,深1 mm,环向一周。

在高速漏磁检测时,不同检测位置时管壁磁化状态不同,影响缺陷检测效果。设置磁化线圈位置固定不动,以线圈中心为原点,左右各选3个检测点,每个检测点相距20 mm,进入线圈区域检测点标记为1#~3#,离开区测量点标记为为4#~6#,线圈中心位置标记为0#,设置管道运行速度为5 m/s,钢管内、外壁缺陷的漏磁场信号在各检测位置的特征图如图8所示。

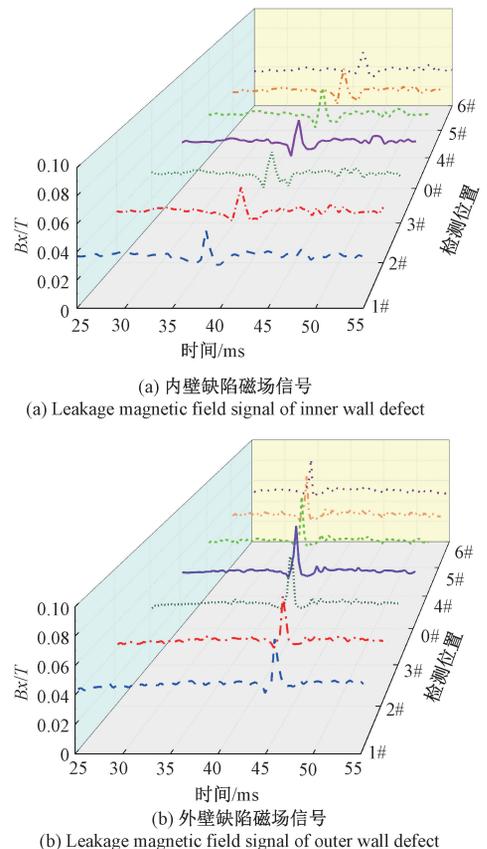


图8 不同检测位置内外壁缺陷漏磁场信号特征

Fig. 8 Magnetic field leakage signal characteristics of inner and outer wall defects at different detection positions

由图8可知,管道内、外壁缺陷漏磁场信号在进线圈区域和离开线圈区域呈现不同的变化规律;根据图8(a)可知,管道内壁磁场信号在进入线圈区的1#~3#位置逐渐增大,且线圈中心位置漏磁场信号大于1#~3#位置磁场信号,在离开线圈区的4#~6#位置的漏磁场信号强度逐渐降低,且位于远离线圈区域的4#检测位置处的缺陷漏磁场信号强度达到最大值;根据图8(b)可知,管道外壁磁场在进入线圈区域的1#~3#位置逐渐增大,且在3#位置缺陷漏磁场信号达到最大值,大于线圈中心位置区域信号强度;在离开线圈区域的4#~6#位置缺陷漏磁场信号逐渐减小;为更加直观分析信号强度的变化情况,提取不同位置处缺陷漏磁场信号强度变化值如图9所示。

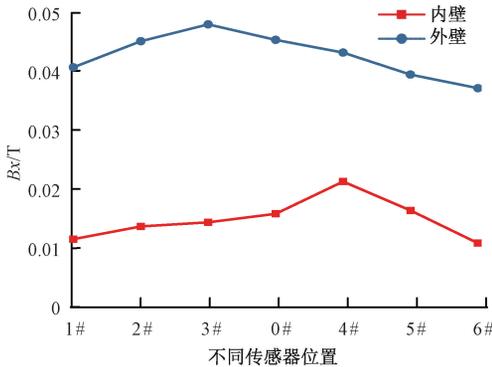


图9 内外壁缺陷漏磁场信号强度变化规律

Fig.9 Variation law of magnetic flux leakage signal intensity of inner and outer wall defects

从图9看出,线圈中心左右两侧的不同检测位置管道内、外壁漏磁场信号强度值变化规律相反,在实际检测中,可通过不同位置检测到的缺陷磁场信号变化特征和规律对内外壁缺陷位置进行区分。

4 实验研究及分析

为充分验证所提方法的有效性和可行性,设计实验方案,搭建实验平台,实验原理如图10所示。

实验中,励磁系统中的磁化线圈主要采用桶型结构作为支架,长度300 mm,在支架上缠绕2 000匝漆包线制成磁化线圈;为排除检测数据的偶然性,在接近磁化线圈中心位置、磁化线圈中心内部、远离线圈中心位置分别放置传感器,同时为提升检测信号的有效性,检测传感器采用90°环向排列,在不同检测位置放置4个可进行三轴磁场分量的检测传感器采集磁场信号,实验管道长度为12 m,外径为102 mm,内径为82 mm,高速漏磁检测平台如图11所示。

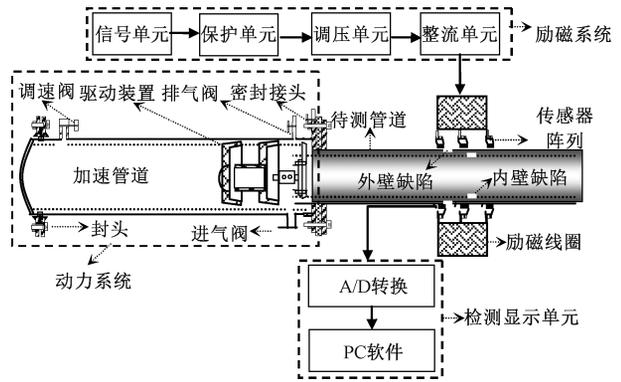


图10 高速漏磁检测平台示意图

Fig.10 Schematic diagram of high speed magnetic flux leakage detection platform



图11 高速漏磁检测平台

Fig.11 High speed magnetic leakage test platform

4.1 不同位置缺陷检测效果验证

首先分析验证不同位置的管道内外壁缺陷信号规律特征。以线圈中心为原点,管道轴向方向为X轴,径向方向为Y轴,在线圈中心左右两侧每间隔5 cm放置传感器,线圈中心位置为0#位置,在进入线圈区域沿着管道轴向依次摆放1#~3#传感器,在离开线圈区域依次摆放4#~6#传感器,检测传感器安装位置示意图如图12所示。

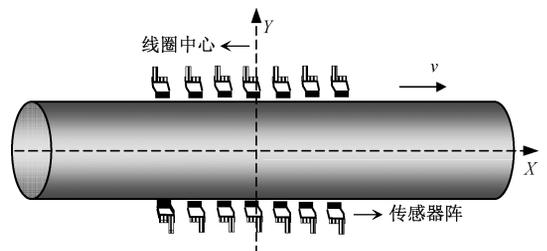


图12 检测传感器放置位置

Fig.12 Location diagram of detection sensor

分别在管道内、外壁表面制作缺陷,深度1 mm、宽度2 mm、环向一周,设置管道运行速度为5 m/s,分析不同位置内外壁缺陷信号规律结果如图13所示。

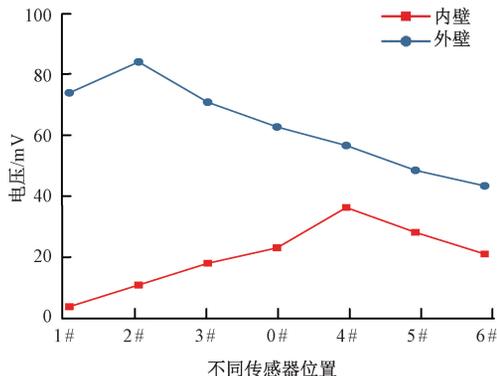


图13 不同检测位置内外壁缺陷信号变化规律

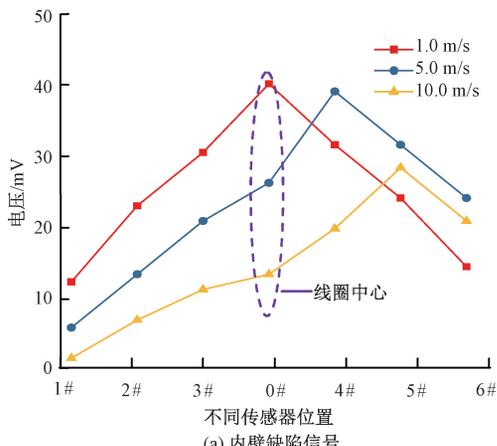
Fig. 13 Variation law of inner and outer wall defect signals at different detection positions

由图13可知,对于管道内壁缺陷,缺陷漏磁场信号在进去线圈区域的1#~3#位置逐渐增大,在离开线圈区域的4#~6#位置缺陷漏磁场信号强度逐渐减小,且位于远离线圈区域的4#位置处缺陷漏磁场信号强度达到最大值;对于管道外壁缺陷,在进如线圈区域的1#~3#位置逐渐增大,且在2#位置缺陷漏磁场信号达到最大值;在离开线圈区域的4#~6#位置缺陷漏磁场信号逐渐减小,管道内、外壁磁场信号变化规律与理论分析结果具有很好的一致性。

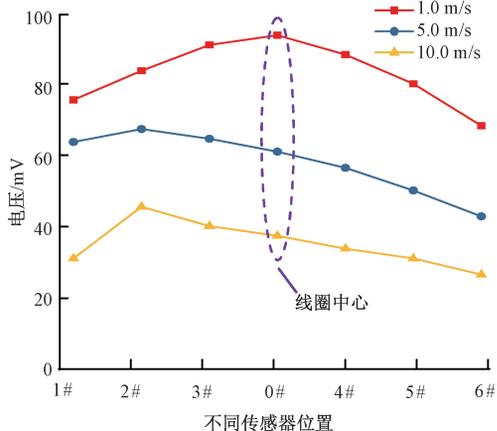
4.2 速度对内外壁缺陷区分影响分析

由于涡流磁场的大小与检测速度有直接关系,因此进一步对不同速度下内、外壁缺陷信号特征进行分析,仍采用上述传感器结构,设置钢管运行速度分别为1、5、10 m/s进行分析,管道内、外壁缺陷信号强度变化情况如图14所示。

由图14可知,缺陷处漏磁场信号规律随速度不同而发生变化,当速度较低时,主要由磁化线圈产生的磁场起主导磁化作用,此时管道内壁和外壁位置的缺陷信号容易分辨,且均大于高速时的缺陷漏磁场信号幅值,但内、外壁缺陷位置的区分程度减弱;当检测速度逐渐提升时,缺陷处漏磁场信号逐渐减小,而不同检测位置时管壁上的内、外壁缺陷产生的漏磁场信号差异特征明显,此时易于判断管道内外壁缺陷的存在。该现象主要由于涡流磁场的大小与速度有关,当速度增加时,内外壁缺陷漏磁场最大值位置发生明显偏移,外壁缺陷的最大值出现在进入线圈区域,内壁缺陷漏磁场信号的最大值出现在离开线圈区域,在进入线圈区域和离开线圈区域耦合磁场作用效果越明显,内外壁缺陷位置定位效果越好。



(a) Leakage magnetic field signal of inner wall defect



(b) 外壁缺陷信号

(b) Leakage magnetic field signal of outer wall defect

图14 不同速度时各位置的检测信号

Fig. 14 Detection signals at different positions

5 结论

在线检测过程中,涡流磁场与外磁场耦合,共同影响管壁磁化状态,在进入线圈区域和远离线圈区域,管道内、外壁磁场变化规律相反,检测速度越快,差异性越明显。管壁磁化状态影响管道缺陷的信号强度值,使得管道外壁缺陷漏磁场信号强度最大值向管道运动反方向偏移,管道内壁缺陷信号强度最大值向管道运动方向偏移。高速检测检测时将涡流的影响加以利用,通过不同检测位置磁场信号的差异性,可实现管道内、外壁缺陷位置的有效定位和区分。

参考文献

- [1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil

- pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [2] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.
- TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [3] 李健, 陈世利, 黄新敬, 等. 长输油气管道漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.
- LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi-real-time detection technology for long distance oil and gas pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [4] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
- ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.
- [5] 呼婧, 刘思娇, 郑莉, 等. 基于动态磁多极子场的管道内外壁缺陷区分方法[J]. 油气储运, 2021, 40(6): 673-678.
- HU J, LIU S J, ZHENG L, et al. Distinction method of pipeline inner and outer defects based on the dynamic magnetic multipole field[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2021, 40(6): 673-678.
- [6] 张智超, 沈常宇, 朱周洪, 等. 漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 150-159.
- ZHANG ZH CH, SHEN CH Y, ZHU ZH H, et al. Magnetic flux leakage combined with eddy current for non-ferromagnetic metal materials damage detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 150-159.
- [7] 许鹏, 耿明, 方舟, 等. 基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 57-65.
- XU P, GENG M, FANG ZH, et al. Study on high-speed rail defect detection method based on combination of EC and MFL testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 57-65.
- [8] PIAO G, GUO J, HU T, et al. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 244-258.
- [9] 戴光, 吴忠义, 朱祥军, 等. 管道内外壁缺陷的漏磁检测[J]. 无损检测, 2018, 40(3): 19-23, 28.
- DAI G, WU ZH Y, ZHU X J, et al. Magnetic flux leakage testing of inner and outer wall defects of pipeline [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(3): 19-23, 28.
- [10] 李广凯, 周庆祥, 肖君武, 等. 铁磁性管道内外壁缺陷区分装置及方法研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(7): 59-63.
- LI G K, ZHOU Q X, XIAO J W, et al. The method and device of the inner and outer wall defect of ferromagnetic pipeline [J]. Measurement and Testing Techniques, 2019, 46(7): 59-63.
- [11] 李久政, 康宜华, 孙燕华, 等. 基于信号源极值特征的钢管内外裂纹区分方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(12): 75-78.
- LI J ZH, KANG Y H, SUN Y H, et al. Discrimination of internal and external steel pipe notches using signal figures extremum [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(12): 75-78.
- [12] 蹇清平, 艾志久, 张勇, 等. 基于支持向量机的油管内外面缺陷识别方法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(1): 118-123.
- JIAN Q P, AI ZH J, ZHANG Y, et al. Identification of oil tube defects on internal and external surfaces based on SVM [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(1): 118-123.
- [13] 孙宇, 葛玖浩. 基于饱和低频涡流检测技术的管道内外缺陷识别方法仿真[J]. 无损检测, 2017, 39(2): 9-12.
- SUN Y, GE J H. Simulation of pipeline inner and outer defect recognition based on saturated low frequency eddy current technique [J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(2): 9-12.
- [14] BASKARAN R, JANAWADKAR M P. Defect localization by orthogonally projected multiple signal classification approach for magnetic flux leakage fields [J]. NDT & E International, 2008, 41(6): 416-419.
- [15] 冯搏, 伍剑波, 邱公喆, 等. 高速漏磁检测方法的发展[J]. 无损检测, 2021, 43(2): 57-63.

- FENG B, WU J B, QIU G ZH, et al. Development of high-speed magnetic flux leakage testing method [J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(2): 57-63.
- [16] 杨理践, 耿浩, 高松巍, 等. 高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(10): 1-9.
- YANG L J, GENG H, GAO S W, et al. Study on the establishment process and influencing factors of high-speed magnetic flux leakage testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(10): 1-9.
- [17] FENG B, KANG Y, SUN Y, et al. Influence of motion induced eddy current on the magnetization of steel pipe and MFL signal [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2016, 52(1-2): 1-7.
- [18] 耿浩, 杨理践, 项行鸿. 钢管高速漏磁信号检测与分析 [J]. *仪表技术与传感器*, 2021(11): 88-93, 98.
- GENG H, YANG L J, XIANG X H. High speed magnetic leakage signal detection and analysis of steel pipe [J]. *Instrument Technology and Sensors*, 2021(11): 88-93, 98.
- [19] 杨理践, 梁成壮, 高松巍, 等. 管道漏磁内检测的管壁缺陷漏磁场解析模型 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 106-114.
- YANG L J, LIANG CH ZH, et al. Analytical model of magnetic flux leakage field of pipe wall defects based on magnetic flux leakage internal detection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 106-114.
- [20] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 基于多级磁化的高速漏磁检测技术研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 148-156.
- YANG L J, GENG H, GAO S W. Study on high-speed magnetic flux leakage testing technology based on multistage magnetization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 148-156.

作者简介



耿浩(通信作者), 2020年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为长输油气管道内检测相关技术。

E-mail: 1025284323@qq.com

Geng Hao (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2020. She is currently a lecturer at Shenyang University of Technology. Her main research interests are related technologies for internal inspection of longdistance oil and gas pipelines.