

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514098

基于磁涡流效应的低磁化强度缺陷检测技术研究^{*}

高 波, 杨理践, 黄 平

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:漏磁检测是管道在线检测中应用最广泛的一种无损检测方式,该检测技术获得理想结果的前提是励磁系统将管道磁化至饱和状态。这一要求在大壁厚管道检测中面临显著挑战:一方面需要庞大的励磁系统以实现足够的磁化强度,另一方面过大的励磁系统体积及其产生的强磁吸附力,反而成为制约该技术在大壁厚管道检测中实际应用的主要瓶颈。针对这一问题,提出了一种基于磁涡流效应的低磁化强度下缺陷检测技术。该技术以缺陷处磁导率异常检测为核心,研究了铁磁性材料在低直流磁场作用下缺陷处磁导率的不同变化规律,对磁涡流效应内外壁缺陷检测的机理进行了分析以及有限元仿真;设计了磁涡流传感器,对刻有深度分别 50%、40%、30%、20% 及 10% *wt*、不同类型缺陷的 15 mm 厚钢板同时进行了磁涡流及漏磁内外壁缺陷检测对比实验;实验结果显示磁化电流为 0.7~1.1 A 时磁涡流检测技术不但可以有效识别不同深度及类型缺陷、区分缺陷内外壁分布情况,且检测效果明显优于相同条件下的漏磁检测;仿真和实验结果均表明在磁涡流效应在低磁化强度下可实现对铁磁性材料的内外壁缺陷检测,验证了所提检测技术的可行性及有效性,为大壁厚管道全壁厚缺陷检测提供有效方法。

关键词:无损检测;磁涡流;低磁化强度;缺陷检测

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

Study on defect detection technology for low-magnetization materials based on magnetic eddy current effect

Gao Bo, Yang Lijian, Huang Ping

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

Abstract: Magnetic flux leakage detection is one of the most widely used non-destructive testing techniques in online pipeline inspection. The prerequisite for obtaining ideal results in this detection technique is that the excitation system magnetizes the pipeline to a saturated state. This requirement presents significant challenges in the detection of large-wall-thickness pipelines. On the one hand, a large excitation system is needed to achieve sufficient magnetization intensity. On the other hand, the oversized excitation system and the strong magnetic attraction it generates have become the major bottlenecks restricting the practical application of this technique in such scenarios. To address this problem, a defect detection technique based on the magnetic eddy current effect under low magnetization intensity is proposed. This technique focuses on detecting magnetic permeability anomalies at defect locations. The variations in magnetic permeability at defect sites in ferromagnetic materials under low DC magnetic fields are investigated, and the mechanism analysis and the mechanism of inner and outer wall defect detection based on the magnetic eddy current effect is analyzed through finite element simulation. A magnetic eddy current sensor was designed, and comparative experiments on magnetic eddy current and magnetic flux leakage detection of inner and outer wall defects were conducted on 15mm thick steel plates with artificially machined defects of different types and depths (50%, 40%, 30%, 20% and 10% of wall thickness). Experimental results show that when the magnetization current is between 0.7 A and 1.1 A, the magnetic eddy current detection technique not only effectively identifies defects of varying depths and types and distinguishes between inner and outer wall defect locations, but also achieves significantly better detection performance than magnetic flux leakage detection under the same conditions. Both simulation and experimental results demonstrate that inner and outer wall defects in ferromagnetic materials can be detected under low magnetization intensity using the magnetic eddy current effect, verifying

收稿日期: 2025-05-30 Received Date: 2025-05-30

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(62301338)、辽宁省自然科学基金联合基金面上资助计划(2023-MSLH-261)项目资助

the feasibility and effectiveness of the proposed detection technique and providing an effective method for the full-wall thickness defect detection in large-wall-thickness pipelines.

Keywords: non-destructive testing; magnetic eddy currents; low magnetization; defect detection

0 引 言

与公路、铁路、航空、水运并称为五大运输方式的管道运输,具有损耗小、连续性强、运输量大、可靠性强等优点,被广泛应用于能源、化工、海洋工程等工业领域,特别是在石油、天然气、核电等行业。由于施工不良、运行环境的恶劣以及使用年限的增长等因素影响,管道会产生腐蚀、裂纹等各种缺陷^[1-2],严重威胁到管道的安全运行。定期对管道进行无损检测(non-destructive testing, NDT)是保障其安全有序运行的重要手段。无损检测中的漏磁(magnetic flux leakage, MFL)检测因其强大功能和低廉的成本成为了应用最为广泛的工业管道无损检测方法^[3-4]。由于 MFL 检测需要将管道磁化至一定强度才能达到最优的检测效果,所以要求 MFL 管道内检测器有足够强大的励磁装置。因此针对 MFL 检测的励磁方面研究也一直在进行。Pham 等^[5]研究了 MFL 信号对管道样品近侧和远侧缺陷磁化状态的依赖关系。Chang 等^[6]优化了磁轭的尺寸提出了具有优选结构设计和优选激励系统参数的 MFL 传感器。杨理践等^[7]提出了多级磁化技术,可有效实现磁场叠加,提高磁场均匀性抑制磁后效对高速磁化过程的影响。Wang 等^[8]提出了基于并联电缆的 MFL 检测方法,并研制了一种集磁化器与磁传感器为一体的柔性交流 MFL 探头。

在研究 MFL 励磁部分的同时,学者们对 MFL 周边现象以及其他无损检测方式也进行了大量的研究并取得了一定的成果^[9-12]。Piao 等^[13]提出了一种新型脉冲涡流传感方法,该方法利用钢管内表面感应涡流的电导率和磁导率分布模式来检测区分管道的内外径缺陷。杨超等^[14]提出了一种优化检测线圈的方法,达到了提高脉冲涡流检测中瞬态响应信号信噪比和缺陷识别灵敏度的效果。Betta 等^[15]研制了一种新型三轴涡流探头,该探头基于隧道磁阻(tunneling magneto resistance, TMR)采用低激励电流并对任意方向缺陷都有良好的信噪比(signal to noise ratio, SNR)。Zhang 等^[16]研制了带有三相激励和集成阵列 TMR 涡流探头,该探头不需要复用激励线圈、对任意方向缺陷都敏感且能够快速检测和定量缺陷。张智超等^[17]将 MFL 与涡流效应相结合,采用低频激励信号检测 18 mm 的不锈钢板,在上下表面均有良好的检测效果。对于铁磁性材料,也可通过磁导率扰动来进行检测。Deng 等^[18-19]将直流磁化垂直于材料内表面并利用差分感应线圈测量磁场变化引起的铁磁性材料磁导率扰动,

提出了磁导率扰动测试(magnetic permeability perturbation testing, MPPT)的方法来检测钢管裂纹。Wu 等^[20]基于铁磁性材料在直流磁化条件下内部腐蚀引起磁场畸变并导致集肤层磁导率变化这一情况,提出了利用射频识别(radio frequency identification, RFID)传感器测量磁导率扰动的方法。Toharaand 等^[21]利用直流偏置方波交变磁场的插入式传感器检测铁磁钢管外壁缺陷的方法。Long 等^[22]基于磁涡流(magnetic eddy current, MEC)检测提出了利用阻抗测量方法和缺陷阻抗角的概念区分饱和磁化下管道的内外壁缺陷的方法,并且该方法可与 MFL 同时应用。Lu 等^[23]基于相位项的高频线性特征,通过结合两对涡流传感器信号将单一高频磁导率进行反演,这种反演受到提高的影响较小,可以解决传感器与样品之间提高带来的测量精度问题。

通常,传统 MFL 检测要求将管道磁化至饱和或接近饱和状态才能获得理想的检测结果。对于壁厚较大的管道来说,由于检测设备的运行动力以及体积大小的限制,导致现有 MFL 检测器对厚壁管的检测效果不理想。为了提高厚壁管检测效果,提出了一种基于 MEC 效应的低磁化强度缺陷检测技术。通过励磁装置对铁磁性材料进行直流磁化,材料的缺陷上方会发生磁场变化,磁场变化引起磁感应强度变化,进而导致缺陷上方的磁导率发生变化。以磁导率变化作为媒介对铁磁性材料的缺陷进行识别,并通过有限元仿真及实验验证了该方法检测效果。

1 理论分析

1.1 MFL 检测原理

铁磁性材料在无外加磁场时,磁畴的磁矩方向杂乱无章整体上不显磁性;当施加外加磁场时,各磁畴磁矩的方向沿着磁化方向重新排列,因此对外显示出磁性。MFL 检测采用励磁装置将铁磁性材料磁化至饱和或接近饱和状态,待测铁磁性材料如果存有缺陷,那么缺陷附近将产生漏磁场信号,通过对漏磁场信号的采集及后续处理判断缺陷的存在及特征。图 1 为 MFL 检测原理示意图。

在磁场作用下,材料无缺陷时,材料内部的磁力线平行于其表面分布。当材料存在缺陷时,磁力线分布会受缺陷影响,一部分磁力线挤压扭曲从缺陷上方通过,另一部分则泄漏到缺陷处空气中形成漏磁场。通过霍尔传感器检测漏磁场确定缺陷的存在及大小。磁感应强度(B)与磁场强度(H)的关系如式(1)所示。

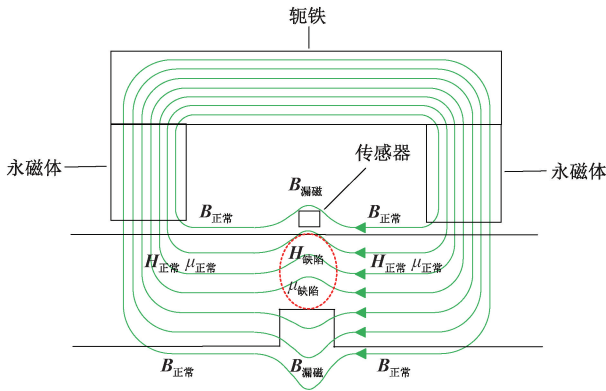
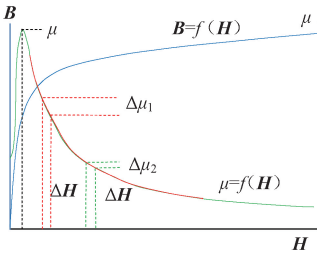


图1 MFL检测原理示意图

Fig. 1 Schematic of MFL mechanism

$$B = \mu_0 \mu_r H, H = \mu H \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, μ_r 材料相对磁导率, μ 为材料磁导率。图2为Q235钢的磁化特性曲线。

图2 Q235钢的 μ - H 和 B - H 曲线Fig. 2 μ - H and B - H curves of Q235

由图2可以看出在外加磁场作用下, B 和 H 之间表现为非线性正比例关系, μ 在 H 值较大时与其呈非线性反比例关系, 并且随着 H 的增大, μ 的斜率逐渐变小。

通过MFL检测原理图可知, 缺陷上方的磁场强度 $H_{\text{缺陷}}$ 大于无缺陷处的磁场强度 $H_{\text{正常}}$ 。结合图2的 μ - H 曲线可知缺陷上方磁导率 $\mu_{\text{缺陷}}$ 小于无缺陷处的磁导率 $\mu_{\text{正常}}$, 所以铁磁性材料的磁导率可以作为识别缺陷的物理量, 通过对其变化的检测达到缺陷识别的目的。

1.2 MEC检测原理

MEC效应是一种交直流复合的检测技术, 铁磁性材料经过直流磁化后, 缺陷引起材料内部磁导率的变化, 通过电涡流传感器交变电磁场检测磁导率的变化实现缺陷检测。MEC效应原理如图3所示。

1) 阻抗分析

在导体附近的电涡流线圈阻抗可以用导体表面的电场 E 和磁场 H 来, 如式(2)所示。

$$z = \frac{1}{I^2} \int_S [E_0 \times H - E \times H_0] \cdot n dS \quad (2)$$

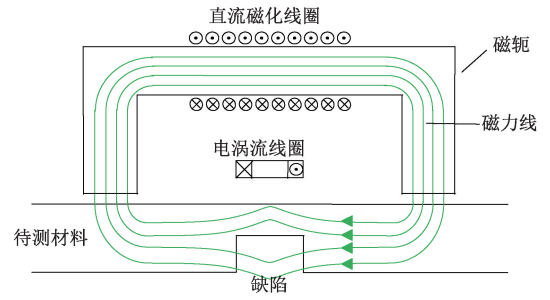


图3 MEC检测原理示意图

Fig. 3 Schematic of MEC detection principle

其中, z 为自由空间中线圈的阻抗变化, I 为线圈中的电流, n 为导体表面指向外侧的法向量, E_0 和 H_0 为自由空间中的电场和磁场。对于任意形状和方向的磁性导体平面和线圈, 其表面场 E 和 H 如式(3)、(4)所示。

$$E = -i\omega \nabla \times (\Psi Z) \quad (3)$$

$$H = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times (\Psi Z) \quad (4)$$

其中,

$$\Psi = -\frac{i\mu_r}{\pi} \int \frac{Z \cdot k \times a_0}{k(\mu_r k + \lambda)} e^{ik \cdot \rho} d^2 k \quad (5)$$

$$\lambda = \sqrt{\alpha^2 - i\omega\mu_0\mu_r\sigma} \quad (6)$$

其中, Z 为垂直于导体表面的单位向量, ρ 为表面平面上的位置向量, μ_r 为相对磁导率, σ 为电导率, a_0 为去除导体的情况下矢量势的傅里叶变换, α 为分离常数。线圈的几何形状可由 a_0 带入, 通过 Biot-Savart 定律可以计算出任意线圈的参数。

2) MEC检测模型

根据研究内容使用简化模型进行分析, 其中简化模型如图4所示。单匝圆形线圈, 其轴心垂直于平面导体的表面且线圈的截面为无穷小。根据 Dodd-Deeds 模型^[23], 涡流线圈的阻抗如式(7)所示。

$$\Delta z =$$

$$i\omega\mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) \frac{\mu_r \alpha - \sqrt{\alpha^2 + i\omega\mu_0\mu_r\sigma r_0^2}}{\mu_r \alpha + \sqrt{\alpha^2 + i\omega\mu_0\mu_r\sigma r_0^2}} e^{-2\alpha h/r_0} d\alpha \quad (7)$$

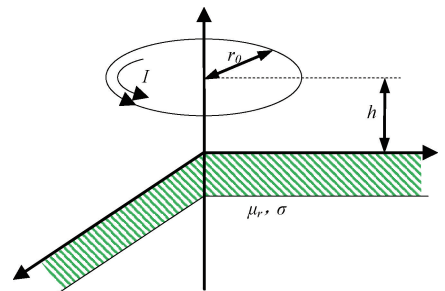


图4 平面导体附近的单匝线圈模型

Fig. 4 Model of a single-turn coil near a planar conductor

$$\frac{\mu_r \alpha - \sqrt{\alpha^2 + i\omega\mu_0\mu_r\sigma r_0^2}}{\mu_r \alpha + \sqrt{\alpha^2 + i\omega\mu_0\mu_r\sigma r_0^2}} = \frac{1 - \sqrt{\frac{1}{\mu_r^2} + \frac{i\omega\mu_0\sigma r_0^2}{\mu_r \alpha^2}}}{1 + \sqrt{\frac{1}{\mu_r^2} + \frac{i\omega\mu_0\sigma r_0^2}{\mu_r \alpha^2}}} \quad (8)$$

忽略掉 $\frac{1}{\mu_r^2}$, 则有:

$$\Delta z = i\omega\mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) \frac{\alpha - r_0 \sqrt{\frac{i\omega\mu_0\sigma}{\mu_r}}}{\alpha + r_0 \sqrt{\frac{i\omega\mu_0\sigma}{\mu_r}}} e^{-2\alpha h/r_0} d\alpha \quad (9)$$

其中, r_0 为线圈半径, h 为线圈提高高度。通过式(9)可以看出线圈的阻抗由多个独立的变量表达:线圈的半径、提高、导体的相对磁导率、电导率以及角频率。对于给定的线圈半径、角频率,且认为导体的电导率为常量的情况下,线圈的阻抗值对磁导率和线圈的提高 h 敏感。

图5为线圈阻抗与频率关系曲线。图中3组线型代表3个不同提高值, $h_1 < h_2 < h_3$; 3种符号代表3个磁导率, $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$ 。3组曲线趋势相似,随着提高的增加,阻抗增大;磁导率减小,阻抗减小。3组曲线在较低频率处有较大的重合,即线圈的提高和磁导率所引起的阻抗变化相差不大;随着频率升高,3组曲线开始分离,提高所引起的线圈阻抗变化逐渐大于磁导率所引起的变化,因此通过选取适当的频率可使线圈对磁导率 μ_r 的敏感程度低于对提高 h 的敏感程度。

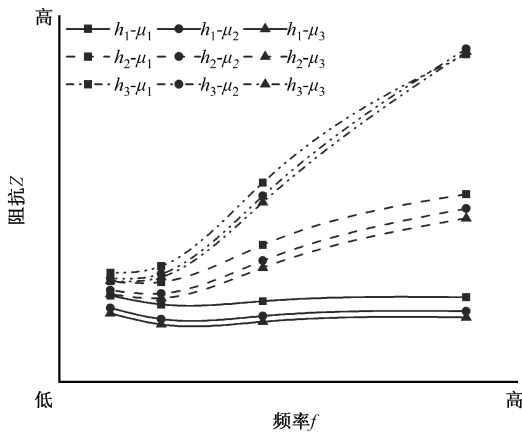


图5 线圈阻抗与频率的关系曲线

Fig. 5 Curve of coil impedance versus frequency

管道缺陷一般分为外壁缺陷和内壁缺陷两种类型,图6为内外壁缺陷 MEC 检测原理示意图。直流磁场作用下传感器线圈由左向右移动,即 $a \rightarrow b \rightarrow c$,磁导率变化为 $\mu_{\text{正常}} \rightarrow \mu_{\text{缺陷}} \rightarrow \mu_{\text{正常}}$ 且 $\mu_{\text{缺陷}} < \mu_{\text{正常}}$ 。

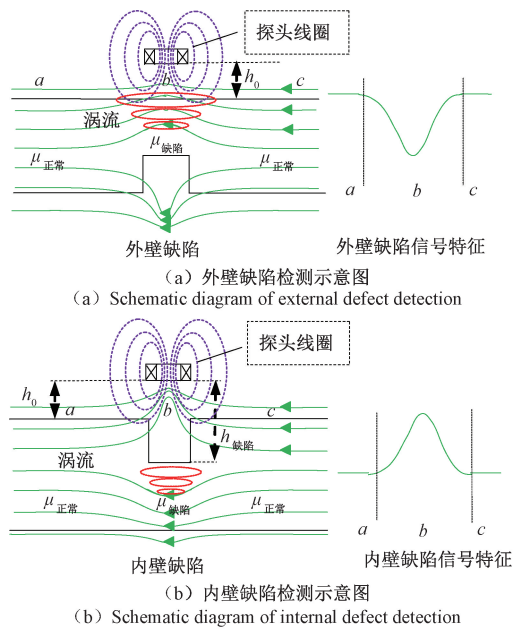


图6 内外壁缺陷 MEC 检测原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of MEC testing for internal and external defects

当缺陷位于外壁时,提高值在移动过程中保持为 h_0 不变;当缺陷位于内壁时,提高值变化为 $h_0 \rightarrow h_{\text{缺陷}} \rightarrow h_0$, $h_0 < h_{\text{缺陷}}$,结合式(9)和图5可分析出内外壁缺陷对线圈阻抗值影响明显不同,外壁和内壁缺陷信号特征分别如图6(a)、(b)所示。由理论分析可知,MEC 传感器在低磁化强度下可以识别管道缺陷,同时能够区分出缺陷的内外壁分布情况。

2 低磁化强度下 MEC 效应的仿真分析

为了分析提出的基于 MEC 效应的低磁化强度下缺陷检测技术,利用 COMSOL 进行了有限元仿真研究。

2.1 仿真模型建立

建立的外壁缺陷仿真分析模型如图7所示,包括被检测材料(钢板)、轭铁、磁钢;其中被检测钢板、轭铁均为 Q235,磁钢为 N50,钢板厚度为 15 mm。有限元分析针对 5 种不同深度缺陷进行,即在钢板上刻有长度均为 15 mm、深度分别为 50% wt (7.5 mm)、40% wt (6.0 mm)、30% wt (4.5 mm)、20% wt (3.0 mm) 及 10% wt (1.5 mm) 的缺陷,其中,wt 为壁厚。并且仿真分为内壁缺陷和内壁缺陷两种情况进行。钢板上放置 MEC 检测线圈,该线圈采用单发射,双接收的形式,其中接收线圈位于发射线圈两侧。

在仿真分析中,施加于钢板的磁场分别为 1 500、2 000、3 000、4 500、7 900、18 000、40 000、60 000 A/m。

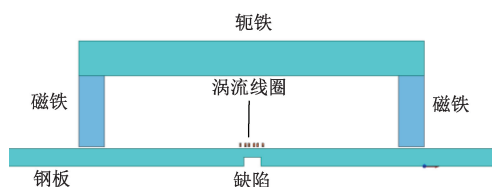


图7 外壁缺陷的仿真分析模型

Fig. 7 Simulation analysis model of external defects

关系,并且随着 H 的增大, μ 的变化值则越来越小。

钢板在不同的磁化强度下内壁磁导率产生相应变化,对仿真结果进行采样,采样路径如图8所示。

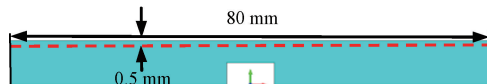


图8 采样路径

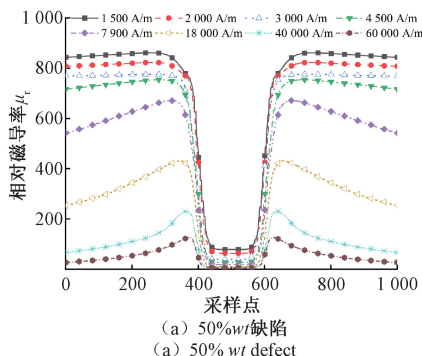
Fig. 8 Sampling path

2.2 磁化强度的影响与分析

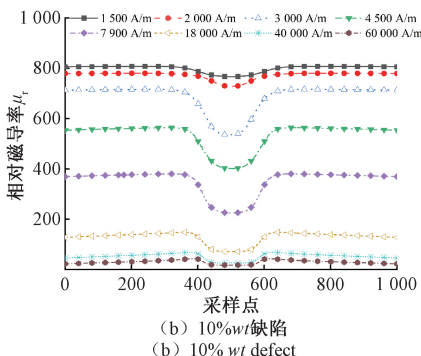
铁磁性材料在直流磁化情况下,其磁场强度、磁感应强度以及磁导率均会发生相应的变化。根据MEC检测原理,以磁导率为待测物理量对缺陷进行检测识别。将铁磁性材料置于不同磁化强度下进行分析。

根据图2磁化特性曲线可知,铁磁性材料在外加磁场作用下 μ 在 H 值较大时,与 H 呈非线性的反比例

关系,以缺陷为中心左右各40 mm距离的磁导率数据进行处理、分析绘制出缺陷处相对磁导率分布曲线,其中50%wt和10%wt缺陷钢板的相对磁导率分布曲线图分别如图9(a)、(b)所示,其中图9(c)为不同深度的缺陷处在各磁化强度下相对磁导率的最大差值 $\Delta\mu_r$ 与外部磁场关系曲线。



(a) 50%wt defect



(b) 10%wt defect

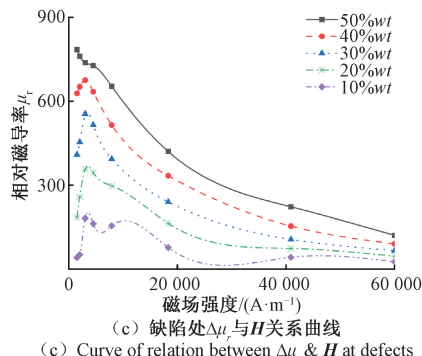
(c) Curve of relation between $\Delta\mu_r$ & H at defects

图9 缺陷处相对磁导率对比

Fig. 9 Comparison of relative permeability at defects

观察图9可以发现:存在外部磁场时,缺陷对其上方的磁导率产生了明显的影响,缺陷深度与上方的 $\Delta\mu_r$ 呈正比;随着磁化强度的增大, $\Delta\mu_r$ 大致呈现先增大后减小的非线性关系,极值出现在3000 A/m;当外部磁场超过3000 A/m,磁场大小则对 $\Delta\mu_r$ 影响不大。值得注意的是,当磁场达到饱和后 $\Delta\mu_r$ 反而越来越小,证明低磁化强度下缺陷的可检测性。

2.3 MEC检测模拟

MEC检测模拟是在磁化强度的影响与分析模拟的基础上,使MEC检测线圈处于工作状态,此处的磁化强度只取到40000 A/m。同上,50%wt和10%wt外壁缺陷与内壁缺陷的MEC检测信号分别如图10、11(a)和11(b)所示;为了全面了解不同深度缺陷在各磁化强度下的MEC信号变化趋势,将5种深度缺陷的MEC检测信号峰峰值进行对比,其对比曲线如图10、11(c)所示。

由图10(a)、(b)和11(a)、(b)可以看出:在各个磁化强度下钢板内、外壁的50%wt缺陷均有明显检测信

号;10%wt外壁缺陷检测信号在磁化强度为7900 A/m时变得明显,与18000和40000 A/m磁场下的检测信号区别不大;通过MEC信号可以明显区分内、外壁缺陷,且内壁缺陷的识别受磁化强度影响不大。

由图10(c)所示,10%~40%wt外壁缺陷处的MEC检测信号峰峰值曲线随磁化强度的增大均呈现先上升后下降的趋势;50%wt缺陷的MEC信号峰峰值曲线趋势虽较其他曲线不同,但该缺陷在不同磁化强度下的MEC信号均十分明显;图11(c)显示同一深度内壁缺陷的识别受磁化强度的影响不大。

仿真分析结果表明低磁化强度下MEC效应识别铁磁性材料的内外壁缺陷具有可行性。

3 实验与结果分析

为了验证理论分析及有限元仿真分析的正确性,搭建实验平台进行验证。实验将MFL检测和MEC检测同时进行,并对实验结果进行了详细的对比与分析。

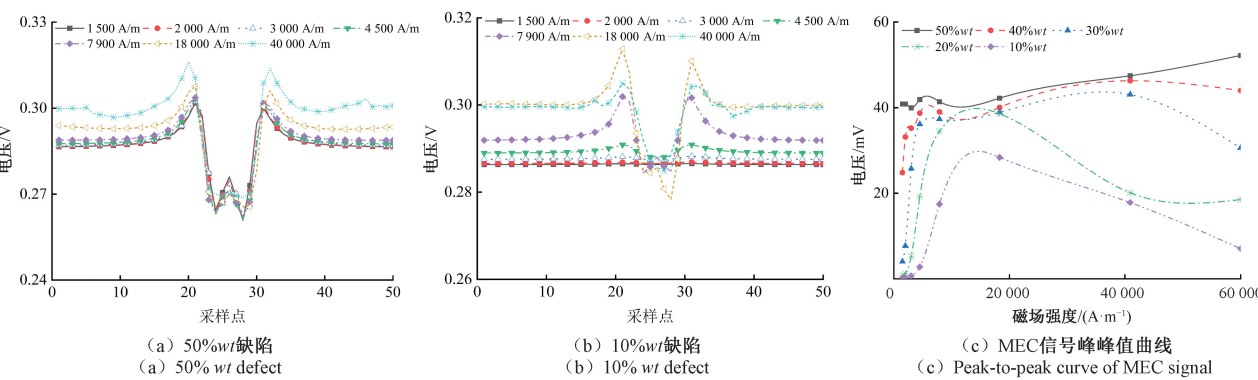


图 10 外壁缺陷 MEC 检测信号
Fig. 10 MEC signals of external defects

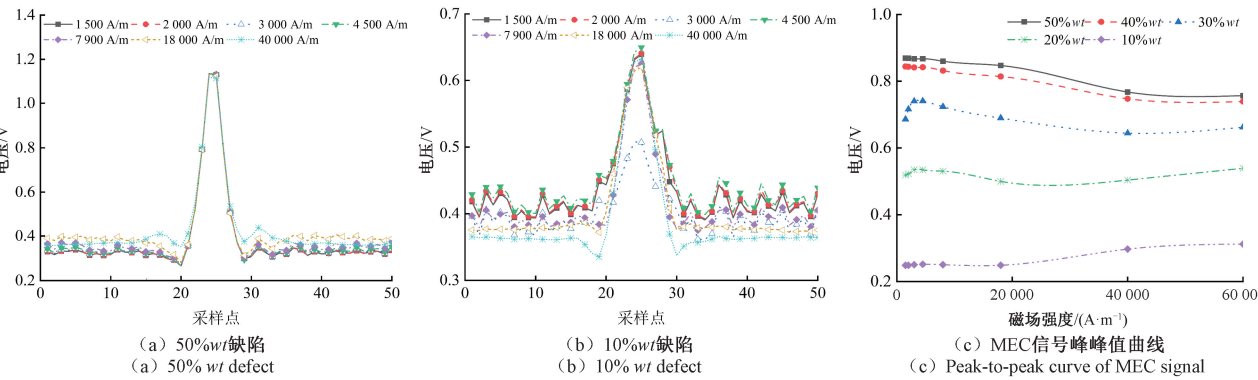


图 11 内壁缺陷 MEC 检测信号
Fig. 11 MEC signals of internal defects

3.1 实验平台搭建

为保证实验数据的可靠性与可重复性,搭建具有可控性的实验平台,确保每次实验均处于相同工况下进行,实验平台如图 12 所示。实验所需主要设备为磁化器及同时含有霍尔及 MEC 传感器的复合传感器,分别如图 13(a)、(b) 所示。磁化器的线圈采用直径为 1.2 mm 漆包线绕制 3 000 匝;磁芯为 U 型磁芯,材料为 DT4C 电磁软铁,尺寸为长 250 mm,宽 150 mm,厚 50 mm。

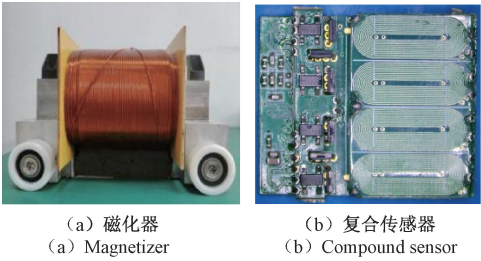


图 13 实验设备

Fig. 13 Experimental facilities

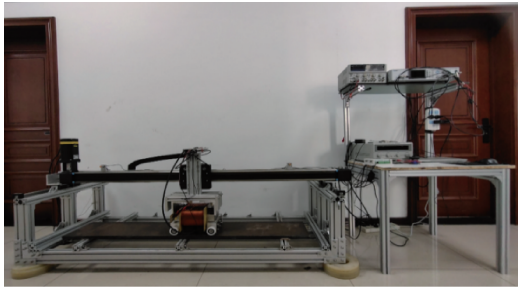


图 12 实验平台

Fig. 12 Experimental platform

实验选取一块 750 mm×250 mm×15 mm 的 Q235 钢板作为检测对象,钢板表面刻有方孔形、圆孔形缺陷各 5 个,分布如图 14 所示;其中 A~E 为方孔形缺陷,深度分别为 50%、40%、30%、20% 及 10% wt;F~J 为圆孔形缺陷,深度同样分别为 50%、40%、30%、20% 及 10% wt。

3.2 实验结果分析

设定磁化器的磁化电流初始值 0.6 A,终值为 1.50 A,其间隔电流 0.1 A;磁化器的运行速度为 0.1 m/s。对钢板 10 个缺陷进行内外壁缺陷检测,获得 MFL 与 MEC 检测数

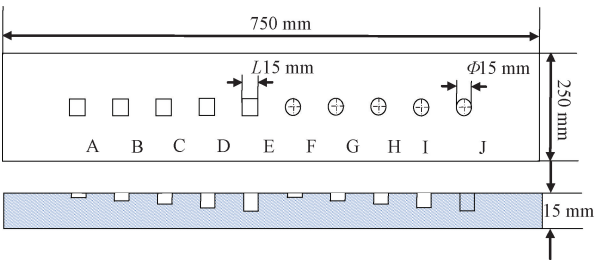
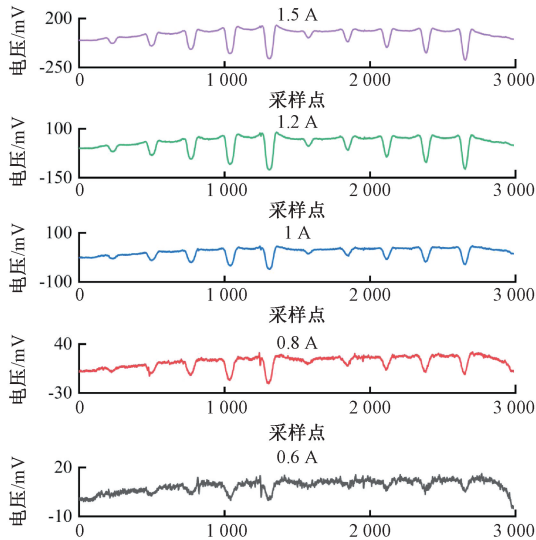
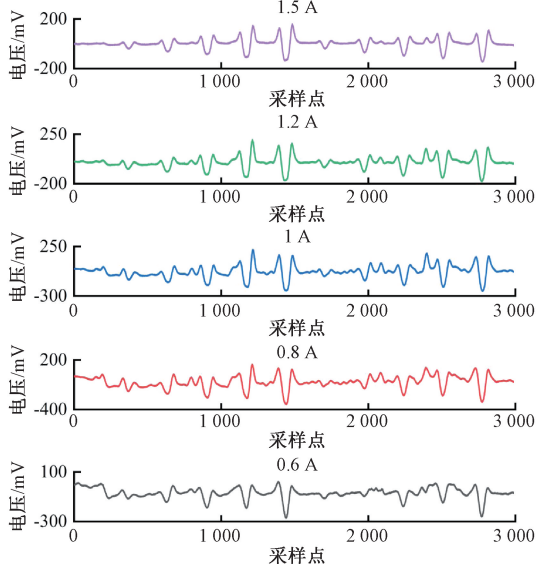


图 14 人工缺陷分布
Fig. 14 Distribution of artificial defects

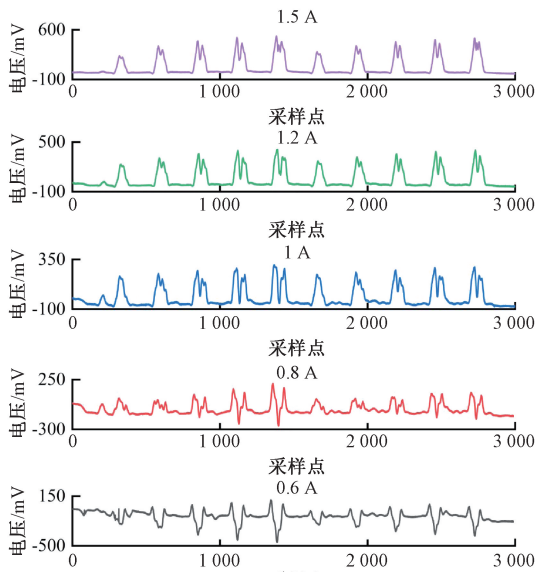
据各 10 组。现取磁化电流为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.5 A 这 5 组数据进行观察对比。图 15 为钢板缺陷检测信号,图 15(a)、(b) 分别外壁缺陷的 MFL 和 MEC 检测数据,图 15(c) 为内壁缺陷的 MEC 检测数据。



(a) 外壁缺陷 MFL 检测信号
(a) MFL detection signals for external defects



(b) 外壁缺陷 MEC 检测信号
(b) MEC detection signals for external defects

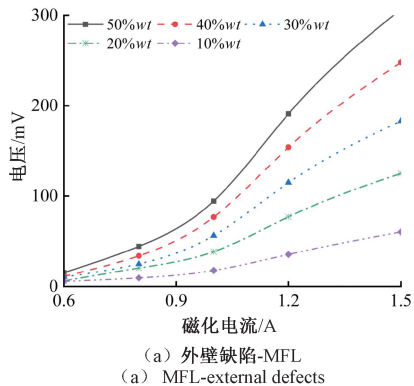


(c) 内壁缺陷 MEC 检测信号
(c) MEC detection signals for internal defects

图 15 缺陷检测信号
Fig. 15 Defect detection signals

由图 15(a) 与 (b) 可以看出外壁缺陷的 MFL 检测信号与 MEC 检测信号的整体趋势基本一致,随着磁化电流的增加,MFL 信号和 MEC 信号的幅值都在逐渐增大;但较低磁化电流下的 MFL 信号幅值很小,几乎不可分辨;MEC 信号一直都比较明显,尤其当磁化电流为 0.8 A 时,MEC 的检测信号明显优于 MFL 检测信号。对比图 15(b) 和 (c) 中可以看出内、外壁缺陷的 MEC 信号具有明显区别;而 MFL 检测则无法区分内外壁缺陷。

由图 15 可看出方孔形与圆孔形缺陷 MFL 及 MEC 检测信号趋势基本一致,为有效对比不同深度缺陷在各磁化电流下两种检测方式效果,现将其中 5 个方孔形缺陷在 10 组电流下对应的两种检测信号分别取峰峰值,如图 16 所示。



(a) 外壁缺陷-MFL
(a) MFL-external defects

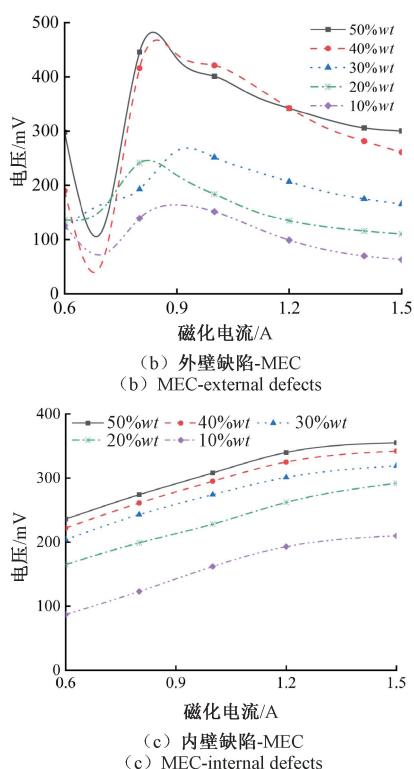


图 16 检测信号峰峰值与励磁电流的关系

Fig. 16 Detection signal peak-to-peak value excitation current

根据实验数据,结合图 15 和 16 得出:1) MFL 信号随磁化电流增加而增大,并在磁化电流超过 1.1 A 时,信号开始变得较为明显;2) MEC 信号随磁化电流增加而缓慢增大,磁化电流超过 0.7 A 时,检测信号开始明显;电流为 0.9 A 左右时,缺陷处 MEC 信号幅值已经达到最大值;当电流 > 1.1 A 时,MEC 信号达到相对稳定状态。实验结果表明,在低磁化强度下 MEC 效应的内外壁缺陷识别能力明显优于传统 MFL 检测。

4 结 论

为解决大壁厚管道检测的技术难题,本研究提出了一种基于 MEC 效应的低磁化强度缺陷检测技术。

1) 根据铁磁性材料 $B-H$ 和 $\mu-H$ 关系可知经过直流磁化后材料内部磁导率发生变化,且缺陷处磁导率变化较大。理论分析显示磁导率的变化势必将引起 MEC 效应中检测涡流的阻抗变化。

2) 结合 COMSOL 有限元仿真分析了带有缺陷的钢板在不同磁化强度下的磁导率变化并建立 MEC 缺陷检测模型。结果显示钢板在施加一定范围的低强度的直流磁场后,缺陷处的磁导率变化值基本处于稳定状态,MEC 信号在识别缺陷的基础上可以明显区分缺陷内外情况。

3) 实验结果表明:整个磁化电流变化范围内,不同于 MFL 信号的单调递增,MEC 信号的幅值呈先增大后减小最后趋于稳定的状态;在磁化电流较低 (0.7~1.1 A) 的情况下,MEC 缺陷检测信号优于 MFL 检测信号且能够区分内外缺陷。验证了基于 MEC 效应的检测技术在低磁化强度下识别铁磁性材料缺陷的可行性和有效性,弥补了传统 MFL 检测技术需将待测材料磁化至饱和状态的局限性。

基于 MEC 效应的低磁化强度缺陷检测技术在能够有效识别缺陷的同时区分其内外壁分布情况;低磁化强度下检测将减少检测器的励磁装置,缩减检测器的整体尺寸,降低检测器运行阻力,提升检测器的通过能力;该项技术的提出将解决传统 MFL 检测在大壁厚管道检测应用效果不理想的问题,提高对大壁厚管道的检测能力,对实际工程应用具有重要意义。

参考文献

- [1] SUN H Y, PENG L SH, HUANG S L, et al. Development of a physics-informed doubly fed cross-residual deep neural network for high-precision magnetic flux leakage defect size estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1629-1640.
- [2] XIE SH J, DUAN ZH R, LI J, et al. A novel magnetic force transmission eddy current array probe and its application for nondestructive testing of defects in pipeline structures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 309: 112030.
- [3] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 70-78.
GENG H, XIA H, WANG G Q. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 70-78.
- [4] 张仕忠, 李红梅, 赵春田. 漏磁检测多排传感器的数据修正理论及方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 243-251.
ZHANG SH ZH, LI H M, ZHAO CH T. Theory and method of data correction for multi-row sensors in MFL detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 243-251.
- [5] PHAM H Q, TRINH Q T, DOAN D T, et al. Importance of magnetizing field on magnetic flux leakage

- signal of defects [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(6): 6201206.
- [6] CHANG Y, JIAO J P, LI G H, et al. Effects of excitation system on the performance of magnetic-flux-leakage-type non-destructive testing [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 201-212.
- [7] 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.
- [8] WANG SH H, FENG B, TANG J, et al. A novel AC-MFL probe based on the parallel cables magnetizing technique [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(2): 39.
- [9] PIAO G Y, GUO J B, HU T H, et al. The effect of motion-induced eddy current on high-speed magnetic flux leakage (MFL) inspection for thick-wall steel pipe[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2020, 31(1): 48-67.
- [10] XU ZH Y, JIANG Q Q, ZHANG Y H, et al. Scanning induction thermography for bearing ring under AC-DC composite magnetization [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2023, 42(1): 3.
- [11] SHARATCHANDRA SINGH W, MUKHOPADHYAY C K, PURNA CHANDRA RAO B. Development of a high sensitive magnetic flux leakage instrument for imaging of localised flaws in small diameter ferromagnetic steel tubes[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(7): 932-936.
- [12] 陈涛, 尹永奇, 吕程, 等. 脉冲涡流缺陷检测理论与技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 1-10.
- CHEN T, YIN Y Q, LYU CH, et al. Research on total focusing phase-coherent imaging of pipeline defect with sparse array elements[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 1-10.
- [13] PIAO G Y, GUO J B, HU T H, et al. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 244-258.
- [14] 杨超, 孙虎, 唐超. 电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(4): 132-140.
- YANG CH, SUN H, TANG CH. Research on metal pipe defect detection based on electromagnetic pulsed eddy current testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(4): 132-140.
- [15] BETTA G, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. A novel TMR based triaxial eddy current test probe for any orientation crack detection [J]. Measurement, 2021, 181: 109617.
- [16] ZHANG N, YE CH F, PENG L, et al. Eddy current probe with three-phase excitation and integrated array tunnel magnetoresistance sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5325-5336.
- [17] 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.
- [18] DENG ZH Y, SUN Y H, KANG Y H, et al. A permeability-measuring magnetic flux leakage method for inner surface crack in thick-walled steel pipe[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(4): 68.
- [19] DENG ZH Y, LI T Y, ZHANG J K, et al. A magnetic permeability perturbation testing methodology and experimental research for deeply buried defect in ferromagnetic materials [J]. NDT & E International, 2022, 131: 102694.
- [20] WU J B, ZHANG M CH, LIU ZH T, et al. Magnetic permeability perturbation-based RFID sensor for pipeline internal corrosion monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(2): 1987-1996.
- [21] TOHARAAND M, GOTOH Y. Inspection method of outer side defect in ferromagnetic steel tube by insertion-type electromagnetic sensor using square wave alternating magnetic field with DC bias[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 6200105.

[22] LONG Y, HUANG S L, ZHENG Y, et al. A method using magnetic eddy current testing for distinguishing ID and OD defects of pipelines under saturation magnetization [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020, 35(9): 1089-1098.

[23] LU M Y, MENG X B, HUANG R CH, et al. A high-frequency phase feature for the measurement of magnetic permeability using eddy current sensor [J]. NDT & E International, 2021, 123: 102519.

作者简介



高波, 分别于 2009、2012 年于沈阳工业大学获得学士学位, 硕士学位, 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内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: Herbert@sut.edu.cn。

Gao Bo received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Shenyang University of Technology in 2009 and 2012, respectively. She is currently pursuing a Ph.D. degree student at Shenyang University of Technology. Her main research interests include in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.



杨理践 (通信作者), 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 (Corresponding author) 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.



黄平, 分别于 2013 年、2016 年、2021 年于沈阳工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为沈阳工业大学副教授, 主要研究方向为电磁无损检测技术、精密测量与控制、嵌入式系统。
E-mail: huangping0809@sut.edu.cn

Huang Ping received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Shenyang University of Technology in 2013, 2016, and 2021, respectively. He is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic nondestructive testing technology, precision measurement and control, and embedded systems.