

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615118

基于 LC 谐振的低磁化强度管道磁涡流 缺陷检测传感器技术*

高 波, 杨理践, 耿 浩, 刘 斌

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:漏磁内检测是应用最为广泛的管道在线检测方式,但由于该项技术要求将管道磁化至饱和状态才能获取理想的检测效果,通常需要配有励磁系统;这将导致漏磁内检测器体积大、吸附力强,从而限制了该项技术在大壁厚、小口径管道中的有效应用。基于磁涡流效应的低磁化强度缺陷检测技术因其可在较低的磁化强度下对管道进行漏磁缺陷检测及内外壁识别,将突破传统漏磁在大壁厚小口径管道内检测中的上述限制;适用于该技术的测量传感器需在低磁化强度下有效检测及区分管道内外壁缺陷,同时具备体积小、能耗低的优点以满足检测系统的尺寸及功耗需求。本研究提出了基于 LC 谐振的低磁化强度管道磁涡流缺陷检测传感器技术。该技术将传感器线圈与 LC 谐振器结合作为测量传感器,将管道内外壁缺陷信息转换为频率信号。通过理论计算及有限元仿真对缺陷测量数据与频率关系进行分析,对刻有深度分别为 50% wt、40% wt、30% wt、20% wt 及 10% wt、不同类型缺陷的 15 mm 厚钢板同时进行了对比实验。实验结果显示:低磁化强度电流范围内设计提出的测量传感器可以有效识别 10% wt 内外壁缺陷;I 型、II 型线圈传感器分别在谐振频率为 500 kHz、1.5 MHz 时取得最好的外壁及内壁缺陷检测效果。验证了提出的 LC 谐振式传感器可以在较低磁化强度下完成缺陷检测。

关键词: 低磁化强度;磁涡流;缺陷检测;LC 谐振

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

Sensor technology for low-magnetization pipeline magnetic eddy current defect detection based on LC resonance

Gao Bo, Yang Lijian, Geng Hao, Liu Bin

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

Abstract: Magnetic flux leakage internal inspection is the most widely used online pipeline inspection method. However, because this technique generally requires the pipeline to be magnetized to saturation to achieve optimal detection results, typically necessitating an excitation system. This leads to large detector dimensions and strong adhesion forces, limiting its application in thick-walled, small-diameter pipelines. The low magnetization intensity defect detection technology based on magnetic eddy current effects overcomes these limitations by enabling defect detection and internal/external wall identification at lower magnetization levels, surpassing traditional methods for thick-walled and small-diameter pipelines. Applicable measurement sensors must effectively detect and differentiate wall defects under low magnetization conditions while maintaining compact size and low power consumption to meet system requirements. This article proposes an LC resonant sensor-based technique for low magnetization MFL defect detection in pipelines. The sensor integrates coils with LC resonators to convert defect information from both internal and external pipeline walls into frequency signals. Theoretical calculations and finite element simulations were conducted to analyze the correlation between defect characteristics and frequency responses. Comparative experiments were performed on 15 mm-thick steel plates containing defects of varying types (depth ratios: 50% wt, 40% wt, 30% wt, 20% wt, and 10% wt). Results demonstrate that the proposed sensor can effectively identify 10% wt defects

收稿日期: 2026-04-09 Received Date: 2026-04-09

* 基金项目: 辽宁省科技计划联合计划(2025JH2/101800430)、国家自然科学基金(62531017, 62371315)项目资助

on both internal and external walls within low magnetization current ranges. Type I and Type II coil sensors achieve optimal detection performance at resonant frequencies of 500 kHz and 1.5 MHz, respectively, for outer and inner wall defects. The proposed LC resonant sensor was validated to achieve defect detection at relatively low magnetization intensity.

Keywords: low magnetization; magnetic eddy current; defect detection; LC resonance

0 引言

管道作为石油、天然气等能源长距离输送的载体,具有其他运输方式不可比拟的优势。然而,在长期服役过程中,管道受输送介质和周围环境等因素影响产生腐蚀、裂纹、凹陷等缺陷,对其安全运行构成威胁。定期进行管道内检测及时发现缺陷是有效预防管道安全事故的重要手段^[1-3]。漏磁(magnetic flux leakage, MFL)管道内检测是国内外最为成熟、应用最为广泛的在线检测方法^[4]。由于MFL内检测需要将管道磁化至饱和状态才能获得理想检测效果,要求检测器需有庞大的励磁系统和支撑装置,这将导致MFL内检测器与管道之间产生强大的吸附力及运行阻力;励磁系统的磁化强度不足与检测器的尺寸限制分别是导致MFL内检测器无法将大壁厚、小口径管道磁化至饱和状态的直接原因;同时,励磁系统产生的强大吸附力也限制了MFL内检测在低压低流量管道检测中的应用。Ou等^[5-6]提出的弱偏置磁化动态磁导率测试方法以及高波等^[7]提出了基于磁涡流(magnetic eddy current, MEC)效应的低磁化强度缺陷检测技术适用于无法实现饱和磁化的检测场景,上述方法均采用涡流传感器进行缺陷识别。国内外专家学者近年来也一直致力于涡流传感器性能提高的研究工作^[8-11]。陈国龙等^[12]提出了一种对短裂纹探测具有优势的绝对式科赫分形平面涡流传感器。靳建辉等^[13]提出了基于无线能量传输的涡流检测方法(wireless power transfer-eddy current testing, WPT-ECT)设计的探头,该探头结构对任何角度均敏感,同时结合径向基神经网络算法对裂纹进行识别。Wu等^[14]提出了一种适用于垂直于导体布置的矩形T-R(transmitter-receiver)线圈互感率的闭式公式,为涡流检测(eddy current testing, ECT)垂直排列矩形T-R线圈的互感率计算提供有效指导。Chen等^[15]提出了电阻-频率涡流法,可在1~2.5 mm的中高提离范围内对材料电导率进行不受提离高度影响的测量,且相对误差控制在5%以内。Leung等^[16]提出了一种应用于ECT的新型磁检探头,该探头利用双磁电(magneto-electric, ME)复合材料以差分噪声消除模式工作,可以在低频(kHz)下增强检测能力,在识别导电材料中的小缺陷和裂纹方面具备有效性。Huang等^[17]提出了一种改进的多频涡流阵列传感器,用于准确检测金属板焊缝中的微缺陷(欠焊、过焊、部分焊接断裂和微穿孔)。

Ge等^[18]提出了一种将旋转涡流检测结果转化为特定方向的均匀涡流检测结果,同时降低焊缝噪声且清晰识别裂纹位置的简单方法。Tian等^[19]提出了一种基于电感-数字转换器(inductance-to-digital converters, LDC)的集成式涡流无损检测方法,实现了无损检测的多个参数与特征的测量。

目前,涡流传感器的研究工作多数偏向提升精度、量程、分辨率以及稳定性等核心指标^[20-21],关于如何满足管道内检测的特殊工况(体积小、功耗低等)的研究相对较少。当前在低磁化强度MEC缺陷检测系统^[7]中所使用的涡流传感器虽可达到比较理想的检测效果,但因其硬件实现需要的电路比较复杂,导致系统体积较大、能耗较高,从而限制了其在管道内检测系统中的应用。为解决上述问题,本文设计了一种适用于管道低磁化强度缺陷检测的LC(Inductor-capacitor)谐振式传感器(即MEC传感器),具有体积小、能耗低以及灵敏度高优点。该LC谐振式传感器基于反相器电路,采用电感-电容并联谐振方式,通过测量LC并联谐振频率得到线圈阻抗,从而实现低磁化强度下管道缺陷检测。通过理论分析和有限元仿真,得到该MEC传感器在不同频率下对不同深度内外缺陷的灵敏度、信号特征及变化规律;通过对缺陷样板进行实验,最终验证了LC谐振式MEC传感器在缩小体积、降低功耗的前提下,通过选取适当频率,可以实现在管道低磁化强度下对内外缺陷进行高灵敏度检测。

1 理论分析

1.1 MEC检测原理

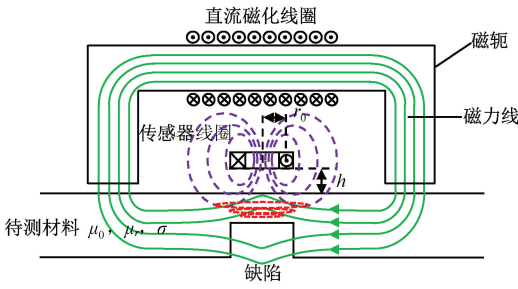
MEC效应是一种交直流复合的检测技术,铁磁性材料经过直流磁化后,缺陷引起材料内部磁导率的变化,通过电涡流传感器交变电磁场检测磁导率的变化,实现缺陷检测。

图1为MEC传感器示意图。其中,图1(a)为检测原理图,图1(b)为电路示意图。

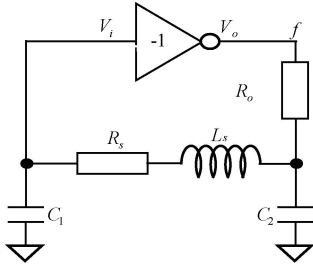
对于单匝空心的线圈,忽略其横截面的情况下,根据Dodd-Deed公式,其阻抗可表示为:

$$Z = R + j\omega L = K \int_0^{\infty} J_1^2(\alpha) A(\alpha) \phi(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

式中:



(a) 检测原理
(a) Detection principle diagram



(b) 电路示意图
(b) Circuit diagram

图1 MEC传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of MEC sensor

$$\varphi(\alpha) = \frac{\mu_r \alpha - \lambda}{\mu_r \alpha + \lambda} \quad (2)$$

$$K = j\omega\mu_0 r_0 \quad (3)$$

$$A(\alpha) = e^{\frac{-2h\alpha}{r_0}} \quad (4)$$

$$\lambda = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu_0 \mu_r r_0^2 \sigma} \quad (5)$$

其中, r_0 为线圈半径; h 为线圈提离; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为材料相对磁导率; $J_1(x)$ 为第一类贝塞尔函数; α 为分离常数, 与线圈的几何形状相关。

在 $\mu_r \gg 1$ 的情况下, 相位项 $\varphi(\alpha)$ 可化简为:

$$\phi(\alpha) \approx \frac{1 - \frac{1}{\alpha} \sqrt{j\omega\mu_0 \mu_r r_0^2 \sigma}}{1 + \frac{1}{\alpha} \sqrt{j\omega\mu_0 \mu_r r_0^2 \sigma}} = \frac{1 - \frac{r_0}{\alpha} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0 \sigma}{2\mu_r}} (1 + j)}{1 + \frac{r_0}{\alpha} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0 \sigma}{2\mu_r}} (1 + j)} \quad (6)$$

令 $t = \frac{r_0}{\alpha} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0 \sigma}{2\mu_r}}$, 则有:

$$\varphi(\alpha) = \frac{1 - 2t^2}{(1 + t)^2} - j \frac{2t}{(1 + t)^2} \quad (7)$$

$\varphi(\alpha)$ 的实部和虚部分别为:

$$\text{Re}(\varphi(\alpha)) = \frac{1 - 2t^2}{(1 + t)^2} \quad (8)$$

$$\text{Im}(\varphi(\alpha)) = \frac{2t}{(1 + t)^2} \quad (9)$$

那么式(1)可以写成:

$$Z = \omega\mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) A(\alpha) \frac{1 - 2t^2}{(1 + t)^2} d\alpha +$$

$$j\omega\mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) A(\alpha) \frac{2t}{(1 + t)^2} d\alpha \quad (10)$$

所以:

$$R = \omega\mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) A(\alpha) \frac{1 - 2t^2}{(1 + t)^2} d\alpha \quad (11)$$

$$L = \mu_0 r_0 \int_0^\infty J_1^2(\alpha) A(\alpha) \frac{2t}{(1 + t)^2} d\alpha \quad (12)$$

在谐振条件下, 线圈阻抗的实部为 0, 所以线圈在谐振角频率 ω 下的电感 $L(\omega)$ 可近似表示为 ω 的函数:

$$L(\omega) = \mu_0 r_0 \frac{a_{\mu_r} b_h \sqrt{\omega}}{2(\sqrt{\omega b_h^{-1}} + a_{\mu_r})^2} \quad (13)$$

其中,

$$a_{\mu_r} = \sqrt{\frac{2\pi\mu_0 \mu_r \sigma}{r_0}} \quad (14)$$

$$b_h = \frac{e^{-0.5(\ln r_0^{-1} + 0.5)}}{(hr_0^{-1} + 0.5)^{0.5}} \quad (15)$$

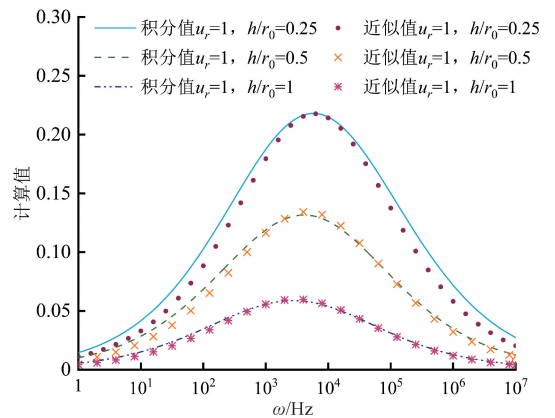
其中, $\int_0^\infty J_1^2(\alpha) A(\alpha) \frac{2t}{(1 + t)^2} d\alpha$ 与 $\frac{a_{\mu_r} b_h \sqrt{\omega}}{2(\sqrt{\omega b_h^{-1}} + a_{\mu_r})^2}$

分别为式(12)与(13)中的积分式和近似式, 二者的计算结果对比如图 2(a) 和(b) 所示。

图 2(a) 为 u_r 相同, h/r_0 不同, 图 2(b) 为 u_r 不同, h/r_0 相同; 由图 2(a) 和(b) 可以看出, 积分式与近似式的计算结果相差不大。

1.2 LC 谐振电路检测原理

本文采用 LC 谐振器作为测量传感器, 如图 1(b) 所示。待测参数被转换为频率信号, 而非传统方法中转换成电压或电流信号。在 LC 谐振电路中, 若电路元件参数未采用特定设计, 频率为传感元件阻抗的函数。通过选



(a) u_r 相同, h/r_0 不同
(a) The same u_r and the different h/r_0

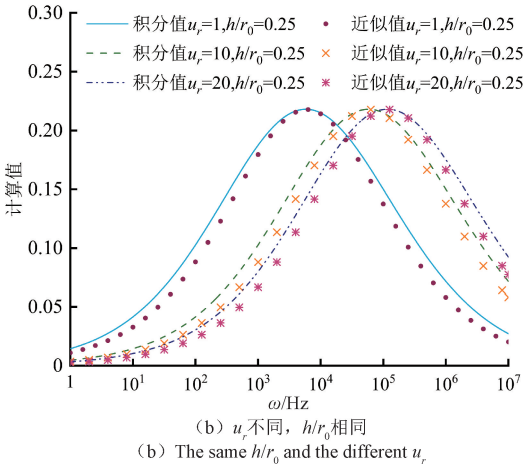


图2 积分式与近似式计算结果对比

Fig. 2 Comparison chart of calculation results between integral formula and approximate formula

择元件参数,电路输出可仅取决于传感器线圈阻抗中的电感分量。

如图1(b)电路原理图所示,LC谐振式探头由传感器线圈 L_s 和线圈两端连接的接地电容 C_1 、 C_2 组成,输入反相器 V_i 的电压可表示为:

$$V_i = V_o \times \frac{X_{C_1}}{R_o + X_{C_1}} \times \frac{X_{C_2}}{X_{L_s} + X_{C_2} + R_s} \quad (16)$$

其中, V_o 为反相器输出电压, X_{C_1} 、 X_{C_2} 分别为电容 C_1 、 C_2 的容抗, X_{L_s} 为线圈 L_s 的感抗,以上参数表达式分别为: $X_C = 1/\omega C$, $X_L = \omega L$, $\omega = 2\pi f$,其中, f 为输出频率;则有:

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{1+j\omega R_o C_1} \times \frac{1}{1-\omega^2 L_s C_2 + j\omega R_s C_2} = \frac{1}{1-\omega^2 L_s C_2 - \omega^2 R_o R_s C_1 C_2 + j\omega(R_s C_2 + R_o C_1 - \omega^2 L_s C_1 C_2 R_o)} \quad (17)$$

根据谐振条件,虚部等于0,所以:

$$\omega^2 = \frac{R_s C_2 + R_o C_1}{L_s C_1 C_2 R_o} \quad (18)$$

为方便计算,令 $C_1 = C_2 = C$,可得:

$$\omega^2 = \frac{R_s + R_o}{L_s C R_o} \quad (19)$$

令 $R_s \ll R_o$,可得:

$$\omega^2 \approx \frac{1}{L_s C} \quad (20)$$

由于 $\omega = 2\pi f$,故电路谐振频率 f 为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}} \quad (21)$$

此外,为使电路稳定工作,电路开环增益 $|A| \geq 1$,将

式(20)代入式(17)则有:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{L}{R_o R_s C} = |A| \geq 1 \quad (22)$$

因此,通过选择适当的电阻 R_o 可使电路的谐振频率不受线圈的直流电阻 R_s 影响。

通过式(22),线圈参数变化所引起的电路谐振频率的变化为:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\frac{1}{2\pi \sqrt{(L_0(\omega) + \Delta L(\omega)) C}} - \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0(\omega) C}}}{\frac{1}{2\pi \sqrt{L_0(\omega) C}}} \quad (23)$$

其中, Δf 为谐振频率变化值; f_0 为原始频率; $\Delta L(\omega)$ 为线圈电感变化值; $L_0(\omega)$ 为初始电感。

在 $\Delta L(\omega) \ll L_0(\omega)$ 的情况下,式(23)可化简为:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \sqrt{\frac{L_0(\omega)}{L_0(\omega) + \Delta L(\omega)}} - 1 \approx -\frac{\Delta L(\omega)}{2L_0(\omega)} \quad (24)$$

其中, $L_0(\omega)$ 为线圈初始参数时的电感, $L(\omega)$ 为参数变化后的电感。

将式(13)代入式(24)可得:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{a_{\mu_{r0}+\Delta\mu_r} b_{h+\Delta h}}{2a_{\mu_{r0}} b_h} \left(\frac{\sqrt{\omega b_h^{-1}} + a_{\mu_{r0}}}{\sqrt{\omega b_{h+\Delta h}^{-1}} + a_{\mu_{r0}+\Delta\mu_r}} \right)^2 + \frac{1}{2} \quad (25)$$

其中,

$$a_{\mu_{r0}+\Delta\mu_r} = \sqrt{\frac{\pi \mu_0 (\mu_{r0} + \Delta\mu_r) \sigma}{r_0}} \quad (26)$$

$$b_{h+\Delta h} = e^{-\frac{h+\Delta h}{2r_0}} \left(\frac{h+\Delta h}{r_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (27)$$

其中, μ_{r0} 为初始磁导率; h 为初始提高; $\Delta\mu_r$ 为变化磁导率; Δh 为变化提高。

由式(25)可得线圈谐振频率变化值与频率关系曲线,如图3所示。

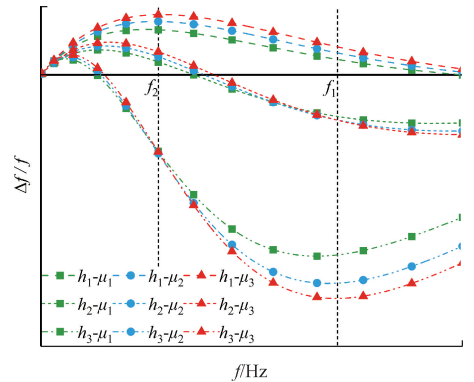


图3 线圈谐振频率变化值与频率关系曲线

Fig. 3 The curve of the variation of the coil resonant frequency with respect to frequency

观察图3发现,不同的提离值($h_1 < h_2 < h_3$)将二者的关系曲线分为3组;且每组曲线又由于磁导率的不同($\mu_3 < \mu_2 < \mu_1$)分为3条不同的曲线。因此可以看出LC电路的谐振频率 f 与线圈提离 h 和材料相对磁导率 μ_r 相关。在 h 较小时,在全频率范围内, $\Delta f/f$ 主要受 μ_r 变化影响,并与其成反比关系,在中间频率 f_2 附近时达到最大值;随着 h 增大, $\Delta f/f$ 值主要受 h 影响, μ_r 对其影响远小于提离值影响。且 $\Delta f/f$ 随 h 的变化 f 的升高由正半轴向负半轴反转,其变化值与 h 成正比关系,在 f_1 附近时达到最大值。综上可得,在选定合适的频率下,通过测量 $\Delta f/f$ 可以得到被测材料由缺陷所引起的提离或磁导率变化,并且通过分析 $\Delta f/f$ 的变化方向及变化值可以区分缺陷位置与大小。

以上分析结果针对的是单匝圆形线圈,多匝圆柱形线圈可视为多个单匝圆形线圈的叠加。对于整体信号曲线来说,多匝线圈的关系曲线相当于多条单匝线圈关系曲线的叠加。在线圈之间参数相差不大的情况下,其关系曲线趋势可视为一致。叠加之后的整体趋势也会保持一致,因此对于定性分析线圈谐振频率变化规律来说使用单匝圆形线圈即可。

2 频率与信号特性

为了分析不同频率下的检测效果及信号特征变化规律,利用COMSOL进行了有限元仿真研究。

2.1 模型建立

建立的仿真分析模型(外壁缺陷)如图4所示。

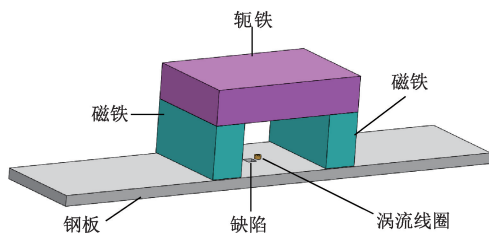


图4 仿真分析模型

Fig. 4 Simulation analysis model

模型包括被检测钢板(Q235)、轭铁(Q235)、磁钢(N50),钢板厚度为15 mm并刻有深度为50% wt(7.5 mm)缺陷,其中wt为壁厚。MEC传感器线圈采用自发自收模式。

2.2 频率的影响与分析

基于MEC效应的低磁化强度下缺陷检测技术通过MEC传感器对提离值以及缺陷处的磁导率异常检测达到对钢板内外壁缺陷的识别目的;同时,由于频率 f 不同,MEC传感器对提离及铁磁性材料磁导率的敏感程度

不同,可以实现缺陷内外壁分布情况的区分^[7]。因此,对不同频率下的MEC传感器信号特征规律及灵敏度进行有限元分析。

有限元分析分为内外壁缺陷两种情况进行,施加于待测钢板的外部磁场为4 500 A/m,线圈频率分别为1 kHz、2 kHz、5 kHz、10 kHz、20 kHz、50 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz和2 MHz。图5与6分别为钢板内、外壁缺陷信号,其中频率选取50 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz和2 MHz。

通过图5、6可以看出:内外壁缺陷信号对频率的增加均显示出较为敏感的变化。随着频率由50 kHz逐渐增加至2 MHz,MEC传感器识别的内壁缺陷信号大小及相位均发生变化;外壁缺陷信号只显示出大小变化,相位未发生改变。

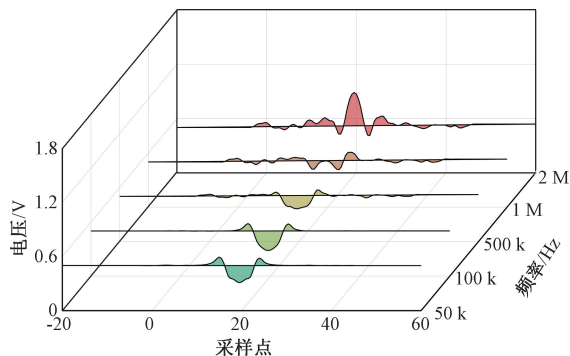


图5 不同频率下内壁缺陷信号

Fig. 5 Signals of defects at different frequencies-internal

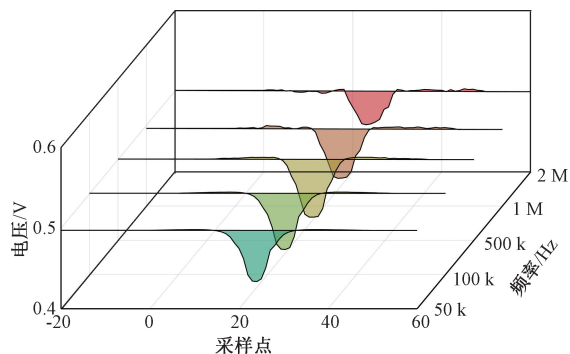


图6 不同频率下的外壁缺陷信号

Fig. 6 Signals of defects at different frequencies-external

为了使缺陷信号变化规律更加直观,将有限元分析中所有频率下内外壁缺陷信号取峰峰值,其峰峰值与频率关系曲线如图7所示。

通过观察图7可知,缺陷深度相同情况下,内壁缺陷信号高于外壁缺陷信号;内壁缺陷在中低频段内信号为负值并且变化不明显,随着频率增加,在中高频段信号逐渐向零减小,直至过零点转变为正值后快速上

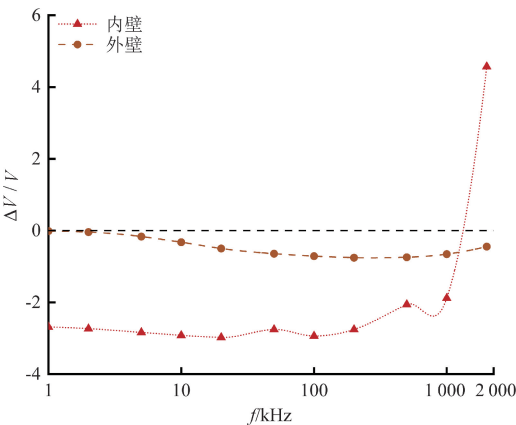


图 7 频率与缺陷信号峰峰值关系曲线

Fig. 7 Curve showing the relationship between frequency and peak-to-peak value of MEC signal

升;外壁缺陷信号随着频率增加先增大再减小,并且始终为负值。

结合图 5~7,有限元仿真分析频率选取 2 MHz 时,可以取得理想大小且相位相反的内外壁缺陷信号,即有效识别缺陷的同时,区分其内外壁分布情况。

3 实验与结果分析

为了满足 MEC 管道检测系统的需求,设计了一种体积小、能耗低的 LC 谐振式传感器。利用该 MEC 传感器实验验证理论计算及有限元仿真分析中得到的频率与缺陷参数信息相关的正确性。

3.1 传感器工作原理

涡流传感器通过检测传感器线圈的阻抗变化来反映被测材料参数的变化。阻抗测量方法主要采用矢量分析法、同步检波法和谐振法^[19,22]。电桥法和矢量分析法作为测量技术已被证实非常有效,但该类方法的主要缺点在于其电路实现需要依赖精密校准的元件、高度稳定的

激励源(电流或电压)、高精度的 AD 转换器、信号滤波放大电路以及数字信号处理器;并且由于传感器的输出信号通常为电压,容易受到外界杂散噪声干扰,因此需要进行额外的噪声滤波处理。

相对矢量分析法与同步检波法,谐振法采用的谐振电路结构比较简单,通常包含的元件数量也较少,因此其体积与功耗均较小;谐振电路原理如图 8 所示。

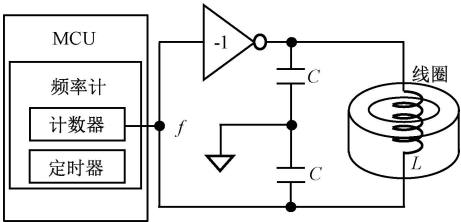


图 8 谐振电路原理

Fig. 8 Schematic diagram of resonant circuit

将体积较小的测量电路与传感器线圈集成至传感器封装中就更加容易。集成封装可以在避免由于连接线较长产生额外噪声的同时降低整个检测系统的复杂程度。此外,不同于传统测量电路的有效信息(被测参数的变化)包含在电压或电流中,上述谐振电路的有效信息存在于频率中,从而降低了系统对外界杂散噪声的敏感程度,因此无需额外的滤波电路。

表 1 为谐振电路与矢量分析电路、同步检波电路的特点对比。由表 1 可以看出相较于其他两种类型电路,谐振电路通过较少的元件数量,较小的电路面积以及较低的电路功耗达到了检测系统对传感器“体积小、功耗低”的要求。

3.2 实验装置

通过理论分析及有限元仿真可知,选取适当频率可以使 MEC 传感器获得理想的检测信号。为了验证其正确性,搭建实验平台进行实验验证。

表 1 电路特点对比

Table 1 Comparison of performance between different types of circuits

电路类型	电路输出	电路主要元件	核心电路面积/mm ²	核心电路功耗/mW	特点
矢量分析电路	实部和虚部	频率合成器、激励电路、前置放大器、滤波器、AD 转换器、DSP	500	50	可以进行扫频测量,需要高速 ADC,数据更新速率较慢
同步检波电路	实部和虚部	频率合成器、激励电路、前置放大器、移相器、乘法器、滤波器、AD 转换器	300	30	低噪声,高信噪比,数据更新速率高,需要低噪声电源,电路结构复杂
谐振式电路	谐振频率	反相器、谐振电容	15	5	低噪声,电路结构简单,噪声水平正比于数据更新速率

图 9 为 MEC 检测系统,包含计算机、电源、开关、电机控制器、磁化器,钢板及传感器。

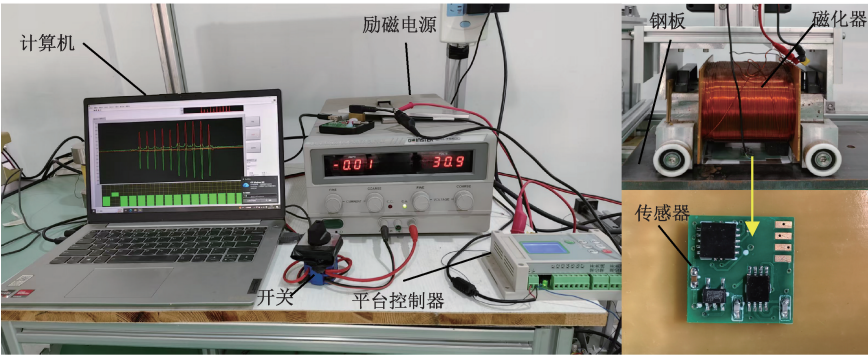


图 9 MEC 检测系统
Fig. 9 MEC detection system

图 10 为被检测钢板,钢板长 1 500 mm,宽 750 mm,厚度 15 mm。缺陷分布如图 10 所示,其中,A~E 为圆孔形缺陷,F~J 为方形形缺陷,每类缺陷深度按照字母先后顺序分别为 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)。



图 10 钢板
Fig. 10 Steel plate

3.3 实验结果分析

MEC 效应在低磁化强度下对铁磁性材料内外壁缺陷检测的可行性及有效性得到了验证^[7]。实验的磁化电流范围为 0.7~1.5 A,其间隔值为 0.1 A,共计 9 组电流。其中,0.7~1.1 A 为较低磁化电流;磁化器速度为 0.1 m/s。根据理论及仿真分析得出:选取适当的频率可使传感器在获得较为理想缺陷信号的同时能够区分缺陷的内外壁分布情况。为了验证这一结论,将上述每组磁化电流下的传感器谐振频率通过调整电容分别设置为 40 kHz、80 kHz、120 kHz、250 kHz、500 kHz、750 kHz、1 MHz、1.5 MHz 以及 2.5 MHz,共计 9 个频率进行实验,分内外壁缺陷两种情况进行。

为了验证不同线圈的检测效果,实验采用 I 型、II 型两种线圈进行检测,I 型线圈为单个线圈,II 型线圈为两个 I 型线圈反向串联。I 型、II 型线圈参数如表 2 所示,实物分别如图 11(a)和(b)所示。

图 12 和 13 为两种线圈在磁化电流为 0.7、0.9、1.1、1.3 和 1.5 A 时,缺陷 F(50% wt) 分别作为内、外壁缺陷所对应的传感器频率变化峰峰值与谐振频率的关系曲线。

表 2 传感器线圈参数
Table 2 Parameters of sensor coils

参数名称	参数值
线圈内径	1 mm
线圈外径	5 mm
匝数	500

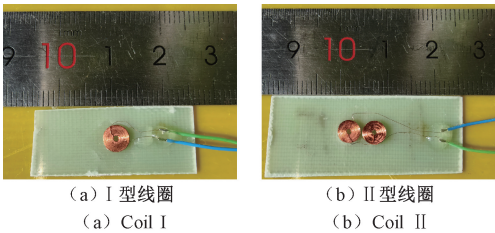
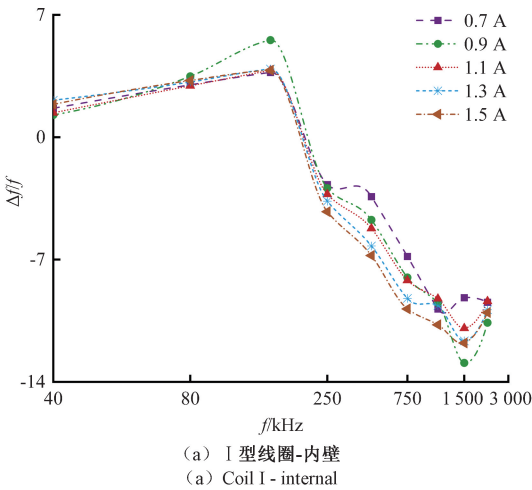


图 11 传感器线圈
Fig. 11 Sensor coil



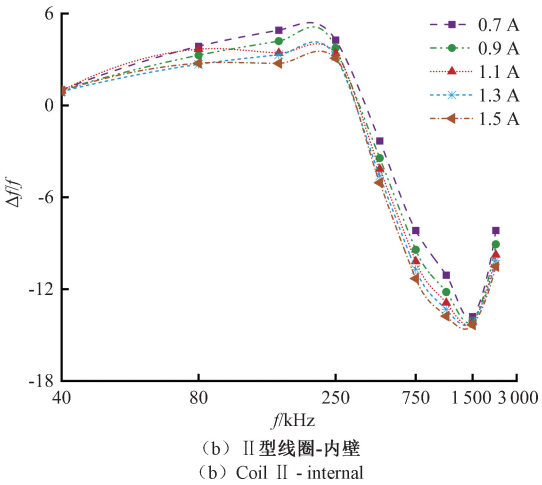


图 12 MEC 信号峰峰值与谐振频率关系-内壁 (50% wt)
Fig. 12 Relationship between MEC signal peak-to-peak value and resonant frequency-internal (50% wt)

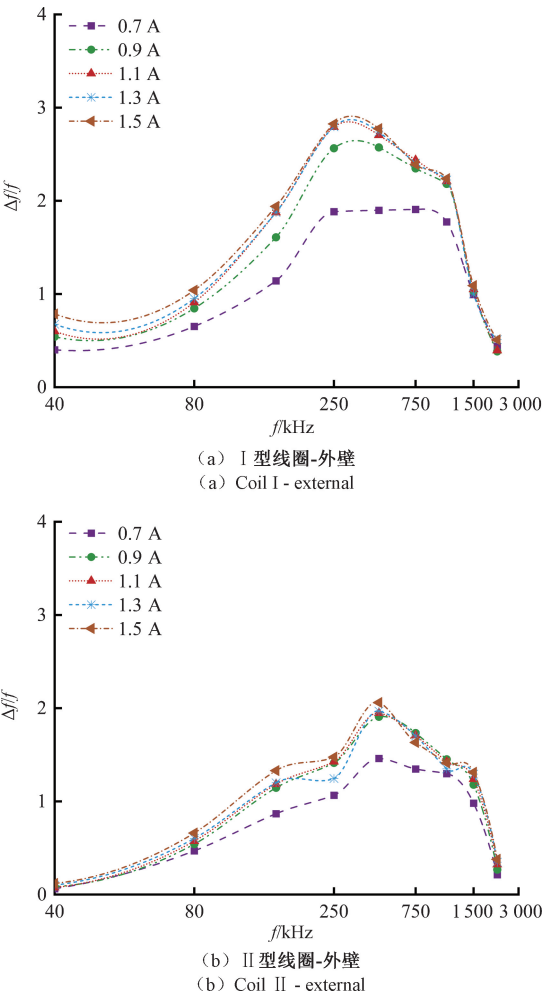


图 13 MEC 信号峰峰值与谐振频率关系-外壁 (50% wt)
Fig. 13 Relationship between MEC signal peak-to-peak value and resonant frequency-external (50% wt)

如图 12 和 13 所示,磁化电流大于 0.9 A 后,继续增加磁化电流,两种传感器线圈对内外缺陷的频率变化值均相差不大,即传感器可在低磁化强度下对管道缺陷进行检测。

通过图 12 可以看出:进行内壁缺陷检测时,随着频率增大,两种线圈的传感器频率变化值先随着频率增大而增大,达到正向最大值后转为向负向变化,并且向负向变化的斜率高于正向变化,在中高频段 ($500\text{ kHz} \leq f \leq 1.5\text{ MHz}$) 信号幅值达到较大值;频率为 1.5 MHz 达到最大值。对比图 12 (a) 和 (b),可看出 II 型线圈的传感器变化值更加平稳,过零点频率高于 I 型线圈。

如图 13 所示,进行外壁缺陷检测时,传感器输出信号始终处于正半轴,并且随频率增大先增大后减小,在中频段 ($250\text{ kHz} \leq f \leq 750\text{ kHz}$) 信号幅值达到较大值;I 型与 II 型线圈分别于 250 和 500 kHz 时达到最大值。

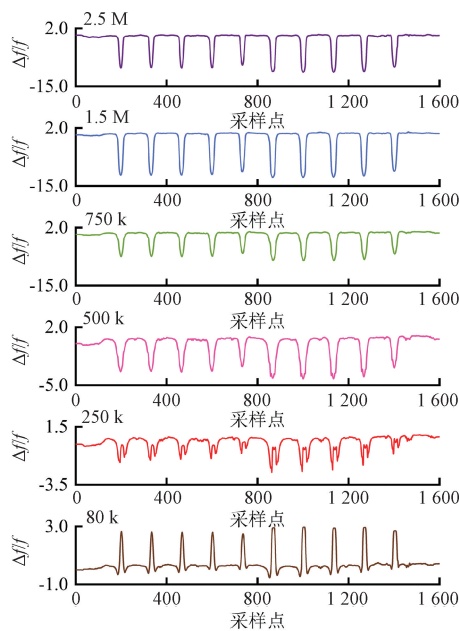
通过文献 [7] 可知铁磁性材料存在缺陷时,缺陷处的相对磁导率急剧减小。结合本文第一部分理论分析可知,MEC 传感器检测内壁缺陷时, h 和 μ_r 同时变化,由于 μ_r 的影响远小于 h 的影响,所以对检测内壁缺陷来说主要影响的物理量为 h ;在检测外部缺陷时,由于 h 不变,所以输出信号只受 μ_r 影响。参照由式 (25) 绘制的图 3,当材料存在内部缺陷时,有较大提高值 h_3 以及急剧减小后的相对磁导率 μ_3 ;谐振频率由低到高变化过程中,传感器输出的频率变化受 h_3 影响并完成正向至负向翻转且在 f_1 处达到负向最大。存在外部缺陷时,MEC 传感器获得的 h 与 μ_r 分别对应图 3 中的 h_1 与 μ_3 ;传感器输出此时受 μ_3 影响随频率处于正向范围内变化,且在 f_2 处取得最大值。综合图 3、12 和 13 分析,本次实验中 I 型与 II 型线圈的内壁缺陷检测最佳谐振频率 f_1 均为 1.5 MHz;外部缺陷最佳检测频率 f_2 分别为 250 kHz 和 500 kHz。通过图 12 与 13 可以看出传感器线圈对内外壁检测信号的相位不同,从而对缺陷的内外壁分布进行区分。

由于 MEC 传感器工作在低磁化强度下,所以后续数据分析统一选用磁化电流为 0.9 A。图 14 和 15 为两种线圈对不同深度内、外壁缺陷所对应的传感器检测信号,即频率变化曲线。

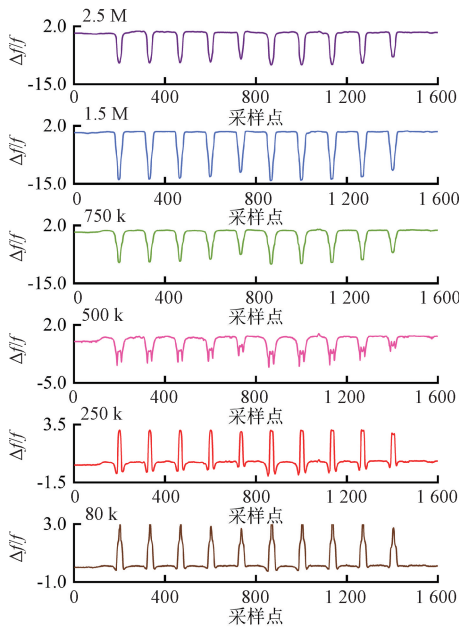
如图 14 所示,可以明显看出随着频率升高,内壁缺陷检测信号发生相位翻转,与理论分析 (图 3) 相一致。I 型线圈翻转发生在 250 kHz 处,II 型线圈发生在 500 kHz,且 II 型线圈存在明显的尖端。

图 15 显示传感器在整个频段的外壁检测信号无相位变化,250、500 和 750 kHz 信号表现良好;在频率大于 1.5 M 后噪声信号明显增加,缺陷识别困难;2.5 M 时缺陷几乎不可识别。

对比图 15 (a) 和 (b) 可以看出 I 型线圈的检测能力明显高于 II 型线圈。为了选取更好 I 型线圈的工作频

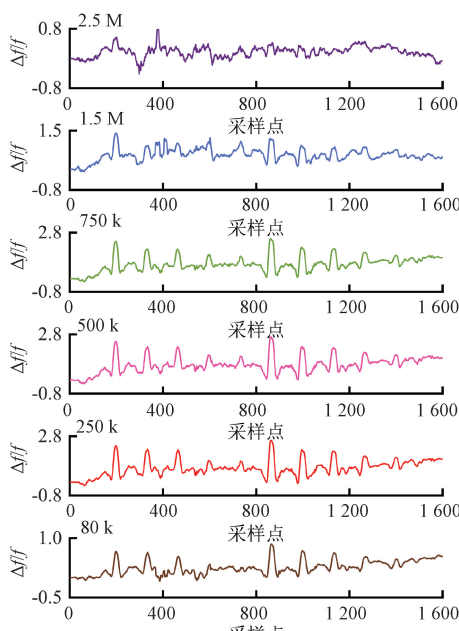


(a) I 型线圈-内壁
(a) Coil I - internal

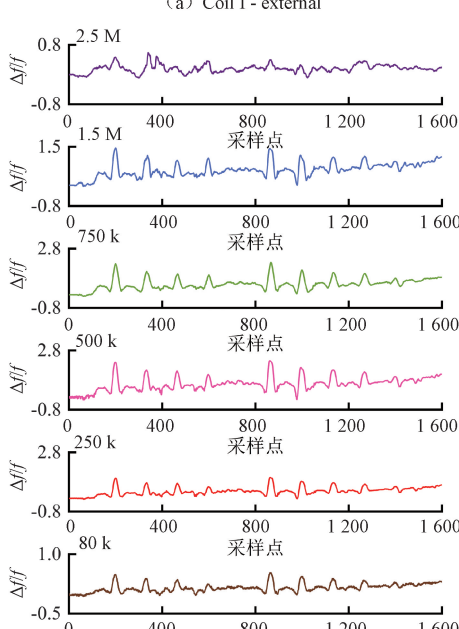


(b) II 型线圈-内壁
(b) Coil II - internal

图 14 不同谐振频率下的内壁检测信号
Fig. 14 Detection signals at different resonant frequencies-internal



(a) I 型线圈-外壁
(a) Coil I - external



(b) II 型线圈-外壁
(b) Coil II - external

图 15 不同谐振频率下的外壁检测信号
Fig. 15 Detection signals at different resonant frequencies-external

率,取其在 250、500 和 750 kHz 这 3 个频率下无缺陷处噪声信号平均值进行信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 计算。外壁缺陷 E 在上述 3 个频率下的信噪比分别为 14.2、16.2 和 13.3 dB;即 I 型线圈在 500 kHz 时 SNR 最高。其中,图 16 为频率为 250 kHz 时 I 型线圈检测外壁缺陷平稳噪声区放大图。

图 17 和 18 为两种线圈对不同深度内外壁缺陷所对

应的传感器频率变化峰峰值与谐振频率的关系曲线。
由图 17、18 可以看出传感器在中高频及中频范围内分别对内、外部缺陷表现出良好的检测效果。内壁缺陷方面,II 型线圈对小于 40% wt 的缺陷可以明显区分,而 I 型线圈只能分辨小于 20% wt 的缺陷,表明 II 型线圈对较深内部缺陷的分辨能力高于 I 型线圈。外部缺陷方

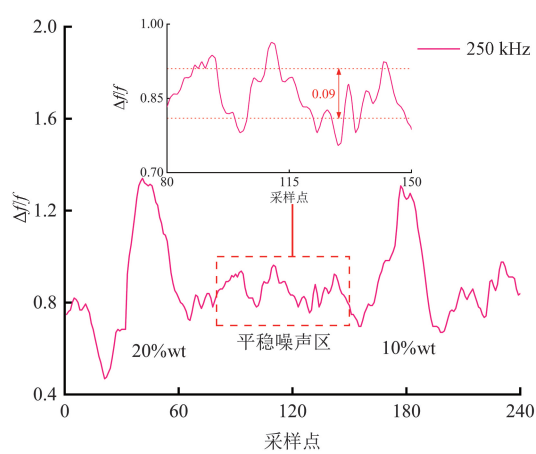
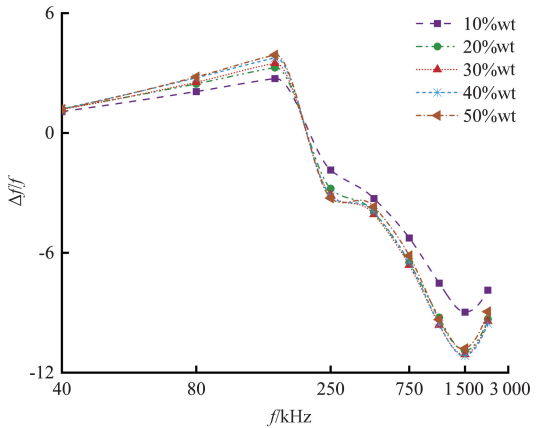
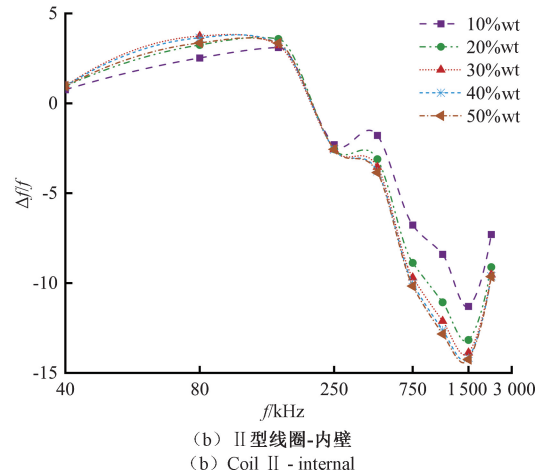


图 16 平稳噪声放大曲线

Fig. 16 Steady-state noise amplification curve



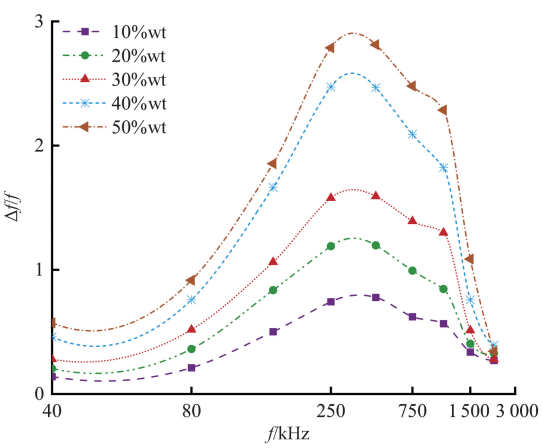
(a) I 型线圈-内壁
(a) Coil I - internal



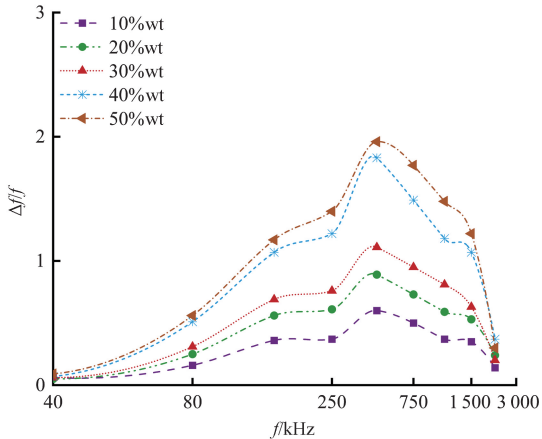
(b) II 型线圈-内壁
(b) Coil II - internal

图 17 内壁缺陷信号峰峰值与谐振频率关系-0.9 A

Fig. 17 Relationship between peak-to-peak value of internal wall defect signal and resonant frequency -0.9 A



(a) I 型线圈-外壁
(a) Coil I - external



(b) II 型线圈-外壁
(b) Coil II - external

图 18 外壁缺陷信号峰峰值与谐振频率关系-0.9 A

Fig. 18 Relationship between peak-to-peak value of external wall defect signal and resonant frequency -0.9 A

综合对比图 17 与 18, MEC 传感器对内部缺陷的敏感程度要显著高于外部缺陷,但对深度的分辨能力则外部缺陷高于内部缺陷。

将图 12~18 与图 3 相结合,可以看出实验结果与理论分析一致,包括内外壁缺陷信号变化趋势、最佳谐振频率范围以及内壁相位翻转等。

为了更加地清晰呈现出 I、II 型线圈的内外壁缺陷检测能力,综合图 12~18,选取磁化电流为 0.9 A、谐振频率为 1.5 MHz 下的内壁检测、500 kHz 下的外壁检测,对比两种线圈对不同深度缺陷(方孔形缺陷)的检测能力,如图 19 所示。

由图 19 可以看出两种线圈在内外壁缺陷检测能力上各有优势: I 型线圈对外壁缺陷的检测及缺陷深度识别能力优于 II 型线圈; II 型线圈则在内壁检测及缺陷深度识别能力上更为突出。

综合以上两种线圈优势,将适用于管道低磁化强度

面,两种线圈均可以明显区分不同缺陷深度,但 I 型线圈的信号幅值要高于 II 型线圈。

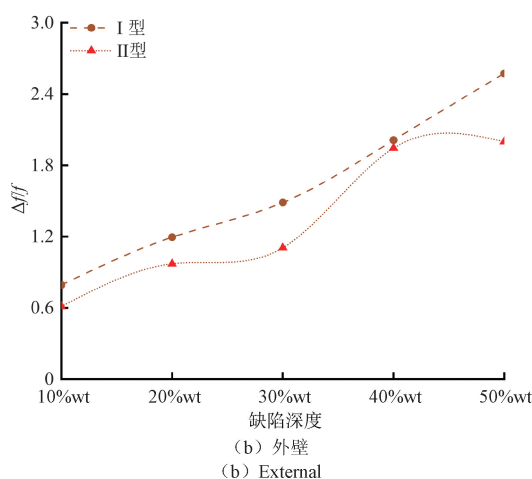
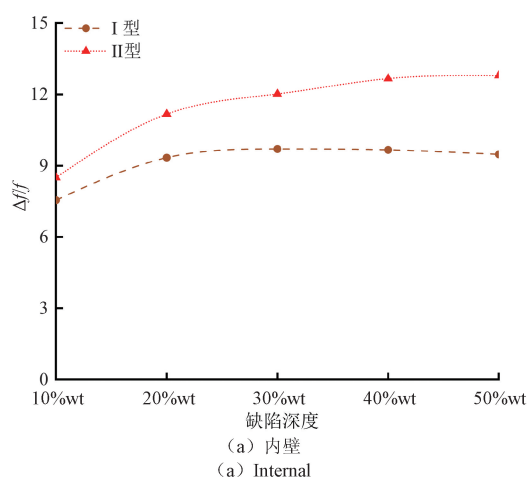


图19 I、II型线圈缺陷检测能力对比

Fig. 19 Comparison of detection capabilities for coil I & II

缺陷检测的LC谐振式传感器设计为具有I、II型两种类型线圈,即具有两个LC谐振电路的MEC传感器,可同时满足低磁化强度下缺陷的内外壁检测效果需求。

4 结 论

为了解决传统涡流传感器由于电路复杂导致的体积大、能耗高等限制而无法适用于低磁化强度下管道MEC检测系统的问题,本文提出了基于LC谐振的低磁化强度管道MEC缺陷检测传感器技术。

1) 根据LC谐振电路的理论计算分析可知电路的谐振频率与检测线圈半径 r_0 、提离 h 以及待测材料相对磁导率 μ_r 有关,即通过输出频率可以获得铁磁性材料由缺陷引起的提离或磁导率变化信息;且可知谐振频率的不同将影响缺陷检测效果。

2) 通过有限元仿真建立检测模型,分析带有50%wt深度缺陷的钢板在不同的频率下的检测效果。结果显

示:频率为2 MHz时,内外缺陷检测信号效果良好且相位相反,即该频率下实现识别缺陷的同时区分其内外壁分布情况;值得注意的是,200及500 kHz时外壁缺陷信号相对更佳。

3) 实验结果表明:在低磁化电流范围内,两种不同形状的检测线圈在谐振频率为低、中、高频时分别表现出不同的内外壁缺陷识别能力,即I型线圈在外壁缺陷检测方面突出,II型线圈则在内壁缺陷检测方面突出;二者均能检测出10%wt缺陷。综合分析传感器信号幅值及信噪比,得出I、II型线圈分别在频率500 kHz、1.5 MHz处表现出相对较好的识别效果。验证了频率对缺陷检测信号规律、特征以及传感器灵敏度的影响。将MEC传感器设计为同时拥有I、II型线圈两种检测线圈的LC谐振式传感器,既保证了在低磁化强度下传感器的检测能力,又保证了在适当的谐振频率下的内外壁缺陷检测效果。

设计适用于管道低磁化强度缺陷检测的LC谐振式传感器,通过删减调制、解调及模数转化等复杂电路达到缩小体积、降低能耗的目的;该传感器能够在低磁化强度下实现对管道的内外壁缺陷检测,同时传感器内设的两种检测线圈分别通过选取适当的谐振频率可以获得理想的内外壁缺陷检测效果及分布情况。实现管道的低磁化强度缺陷检测将减少检测器的励磁装置,缩减检测器的整体尺寸,降低检测器的运行阻力,提高检测器的通过能力。小体积,低功耗的LC谐振式传感器满足了管道低磁化强度下缺陷检测系统的实际工程需求,对突破传统大壁厚、小口径管道检测效果不理想的技术难题,实现工程实际应用具有重要意义。

参考文献

- [1] Ling J T, Feng K, Wang T, et al. Data modeling techniques for pipeline integrity assessment: A state-of-the-art survey[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3518177.
- [2] Wei H T, Dong S H, Xu L S, et al. Internal inspection method for crack defects in ferromagnetic pipelines under remanent magnetization[J]. Measurement, 2025, 242: 115907.
- [3] Long Y, Zhang J H, Huang S L, et al. A novel crack quantification method for ultra-high-definition magnetic flux leakage detection in pipeline inspection[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(16): 16402-16413.
- [4] 刘斌, 罗宁, 武梓涵, 等. 基于双磁场的管道非体积损伤检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 77-91.

- Liu Bin, Luo Ning, Wu Zihan, et al. Research on non-volume damage of pipeline based on dual magnetic field detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 77-91.
- [5] Ou Z Y, Shu Z H, He T Y, et al. A weak bias-magnetized dynamic permeability testing method for detecting and distinguishing inner and outer diameter defects in gas pipelines[J]. NDT & E International, 2025, 151: 103284.
- [6] Ou Z Y, Xu C, Han Z D, et al. Nondestructive testing method for internal defects in ferro-magnetic materials under weak bias magnetization[J]. Measurement, 2024, 226: 114173.
- [7] 高波, 杨理践, 黄平. 基于磁涡流效应的低磁化强度缺陷检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 205-214.
- Gao Bo, Yang Lijian, Huang Ping. Study on defect detection technology for low-magnetization materials based on magnetic eddy current effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 205-214.
- [8] 李满宏, 王经天, 吴玉, 等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 233-243.
- Li Manhong, Wang Jingtian, Wu Yu, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 233-243.
- [9] Yuan X A, Li W, Chen G M, et al. Visual and intelligent identification methods for defects in underwater structure using alternating current field measurement technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3853-3862.
- [10] 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 Chao, Sun Hu, Tang Chao. 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.
- [11] Xia Z H, Huang R C, Shao Y C, et al. Estimation of defect depth on plates by eddy-current coil array[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 369: 115114.
- [12] 陈国龙, 张帅帅, 曹政, 等. 绝对式科赫分形平面涡流传感器裂纹检测性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 98-107.
- Chen Guolong, Zhang Shuaishuai, Cao Zhen, et al. Research on crack detection performance of absolute Koch planar eddy current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 98-107.
- [13] 靳建辉, 张卿, 韩博, 等. 复杂裂纹涡流检测与评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 280-288.
- Jin Jianhui, Zhang Qing, Han Bo, et al. Research on eddy current testing and defect evaluation methods for complex cracks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 280-288.
- [14] Wu D H, Zhang Y. Analytical method of mutual inductance for T-R rectangular coils perpendicular to the planar medium[J]. NDT & E International, 2024, 145: 103142.
- [15] Chen W X, Wu D H. Resistance-frequency eddy current method for electrical conductivity measurement[J]. Measurement, 2023, 209: 112501.
- [16] Leung C M, Wu K W, Liu M L, et al. Advancing eddy current detection probes with magne-toelectric composite materials: Enhancing crack detection in conductive materials [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 592: 171816.
- [17] Huang P, Qiu Z C, Zheng F Y, et al. An improved multi-frequency eddy current array sensor for detecting micro-defects of welding seam in metal plates[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 374: 115459.
- [18] Ge J H, Yang C K, Yu F W, et al. Transformation of the rotating eddy current testing signal at the desired eddy current orientation[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102551.
- [19] Tian G Y, Yang C R, Lu X L, et al. Inductance-to-digital converters (LDC) based integrative multi-parameter eddy current testing sensors for NDT&E[J]. NDT & E International, 2023, 138: 102888.
- [20] Yuan Z, Feng S, Wang Y L, et al. An inductive sensor with a biased magnetic field to distinguish wear debris by magnetism and conductivity [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(1): 727-738.
- [21] Zhao G G, Huang Y H, Zhang W W, et al. Advances in high-precision displacement and thickness measurement

based on eddy current sensors; A review [J]. Measurement, 2025, 243: 116410.

[22] 祁俊红. 基于频率测量电磁传感阵列的小口径管道内检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025: 7.
Qi Junhong. Research on inner detection method for small caliber pipelines based on frequency measurement electromagnetic sensing array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025: 7.

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和硕士学位, 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 a Ph.D. 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.