

文章编号: 1000-8241(2021)01-0015-06

基于支持向量机的带包覆层油气管道剩余壁厚反演研究

郝宪锋¹ 宫昊² 孙国健² 王安泉³ 戴永寿²1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院; 2. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院;
3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心

摘要: 油田现场的油气管道外壁通常带有一定厚度的包覆层,脉冲涡流检测技术可实现不拆包覆层条件下的壁厚检测,可节约大量的包覆层拆装成本。但包覆层的存在使得脉冲涡流检测传感器与管道之间存在提离距离,导致传感器的等效电阻和电感发生变化,进而对脉冲涡流检测电压信号产生影响,降低剩余壁厚反演的精度。基于此,采用支持向量机方法(Support Vector Machine, SVM)建立了提离距离、检测电压信号晚期段斜率与管道壁厚之间的定量化反演模型。利用该模型对壁厚范围5~21 mm的阶梯试件开展了0~10 cm提离距离条件下的剩余壁厚反演测试,反演结果的误差控制在7%以内,验证了所得反演模型的有效性,并具有较高的实用价值,可为带包覆层的管道剩余壁厚检测提供参考。(图4,表5,参20)

关键词: 包覆层; 脉冲涡流; 剩余壁厚反演; 信号晚期段斜率; 支持向量机

中图分类号: TE88

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on residual wall thickness inversion of oil and gas pipeline with cladding based on support vector machine

HAO Xianfeng¹, GONG Hao², SUN Guojian², WANG Anquan³, DAI Yongshou²

1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China); 2. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China); 3. Technology Inspection Center of SINOPEC Shengli Oilfield Company

Abstract: The oil and gas pipelines in the oil field are usually equipped with a layer of cladding in certain thickness, and the pulsed eddy current testing technology can be adopted to measure the wall thickness without removing the cladding, which saves a lot of costs for the removal and assembly of the cladding. However, as a result of cladding, distance exists between the pulsed eddy current sensor and the pipeline, which leads to the variation of the equivalent resistance and inductance of the sensor, and further affects the voltage signal of the pulsed eddy current detection, reducing the accuracy of the residual wall thickness inversion. In order to solve this problem, a quantitative inversion model of lift-off, slope of late detection voltage signal and pipe wall thickness was established with a support vector machine (SVM), and inversion test of the residual wall thickness of the step specimen with the wall thickness of 5–21 mm was carried out with this model under the condition of 0–10 cm lift-off, with the error of the inversion result controlled within 7%. Thereby, the inversion model is verified to be valid with high practical value, and certain reference could be provided for the measurement of the residual wall thickness of the pipeline with cladding. (4 Figures, 5 Tables, 20 References)

Key words: cladding, pulsed eddy current, residual wall thickness inversion, late signal slope, support vector machine

腐蚀造成的油气管道壁厚减薄是管道失效破坏的主要原因之一,为了避免管道泄漏事故的发生、保障管道的运行安全,需定期对管道剩余壁厚进行检测^[1-6]。传统的无损检测技术需要先拆除管道外壁的包覆层,检测效率低、损耗大。脉冲涡流检测技术,具有穿透能

力强的优点,能够在不拆卸包覆层的情况下检测管道腐蚀情况,实现快速扫查检测^[7-12],适用于大面积的腐蚀检测。然而,由于提离效应的存在,导致壁厚反演的精度降低,因此需要开展针对提离效应消除方法的研究。Yin等^[13]设计了一种三线圈的探头结构,成功抑

制了提离效应的影响。叶波等^[14]通过实验研究找到了提离效应与阻抗之间的关系,通过阻抗变换,成功抑制了提离效应的干扰。高春法等^[15]分别在低频和高频的情况下开展测试件实验,将采集到的低频响应信号减去高频响应信号,通过从差分信号中提取缺陷信息来抑制提离影响。徐志远等^[16]利用维纳滤波和主成分分析法对脉冲涡流检测信号进行有效降噪,提高了提离条件下检测信号的信噪比。

基于上述方法的研究通常需要复杂昂贵的设备,且仅在特定的实验条件下才能实现,实际工程应用难度较大。因此,为了实现不拆卸包覆层情况下的管道剩余壁厚检测,有必要开展更深入的研究工作。

1 脉冲涡流测试件实验

1.1 实验测试平台

为开展脉冲涡流检测研究,搭建了脉冲涡流实验测试平台(图1)。测试平台主要包括上位机软件、脉冲涡流检测仪及系列化的检测探头。根据实验测试样本需求定制加工了阶梯试件,试件选用3块Q235钢板,每块有4个阶梯,壁厚范围为4~27 mm。此外,利用3D打印技术制作了用于开展提离测试的支架,可模拟不同包覆层厚度,方便开展实验。

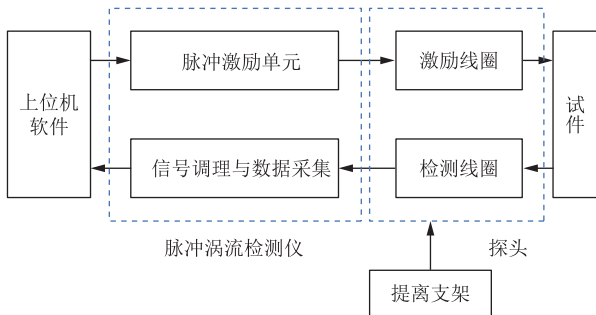


图1 脉冲涡流实验测试平台组成示意图

当实验测试平台工作时,由上位机软件下发检测命令,触发脉冲激励单元产生高压、大电流的激励脉冲信号。在脉冲跳变沿时刻,激励线圈周围会产生变化的磁场,该磁场在试件中感应出变化的涡流,涡流的变化又会产生另一个变化的磁场。通过检测线圈两端的电压信号可检测磁场的变化,该电源信号经过信号调理单元滤波、放大,由数据采集单元采集至上位机。利用最小二乘法提取电压信号晚期段的斜率作为特征量,建立其与壁厚的关系模型,从而实现剩余壁厚的反演。

1.2 剩余壁厚反演测试

利用所搭建的脉冲涡流实验测试平台,首先开展了无包覆层条件下的测试,实验中所选阶梯厚度依次为5 mm、6 mm、7 mm、9 mm、11 mm、13 mm、15 mm、18 mm及21 mm。壁厚反演特征量的选取较为重要,峰值、峰值时间等早期信号特征量易受“振铃效应”的影响,在铁磁性材料中,不存在过零点、提离交叉点等特征量信号,上述信号均难以适用于厚壁铁磁性材料的检测。因此,选用信号晚期段斜率作为壁厚反演的特征量^[17]。同时,受铁磁性材料电导率、磁导率的影响,传感器输出电压信号中与壁厚有关的信息位于信号后期,通常为mV甚至μV级,在直角坐标系中不同厚度对应的检测电压信号基本重合在一起。因此应进行对数坐标转换,以拉开曲线之间的差异,然后利用最小二乘法对曲线晚期段进行拟合,从而得到其斜率(表1)。

表1 不同试件厚度下的电压信号晚期段斜率

试件厚度/mm	电压信号晚期段斜率	试件厚度/mm	电压信号晚期段斜率
5	-298.30	13	-97.97
6	-287.60	15	-72.08
7	-268.67	18	-53.07
9	-168.97	21	-48.03
11	-117.05		

在Matlab中,使用Curve Fitting Tool工具对表1数据进行拟合,得到试件壁厚与电压信号晚期段斜率关系的拟合曲线(图2)。信号晚期段斜率与试件壁厚之间的函数关系式为: $y=281.13 \times (-x)^{-0.6767}$,曲线拟合的置信度为0.987。

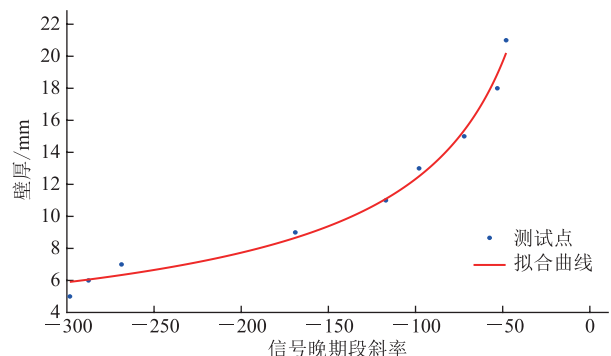


图2 信号晚期段斜率与试件壁厚关系拟合曲线

为研究反演函数关系式在不同提离距离条件下的适应性,开展提离距离分别为2 cm、3 cm的实验。根据将信号晚期段斜率值代入壁厚反演关系式中得到的反演壁厚值(表2)可见,随着提离距离增大,反演壁厚

表 2 不同提高距离条件下的信号晚期段斜率变化情况

试件厚度/ mm	提高距离/ cm	反演壁厚/ mm	相对误差	信号晚期段 斜率
6	2	5.25	12.53%	-358.82
	3	5.06	15.74%	-379.24
7	2	5.30	24.33%	-354.02
	3	5.10	27.08%	-373.89
9	2	6.19	31.20%	-281.01
	3	5.82	35.36%	-308.20
11	2	7.11	35.39%	-229.23
	3	6.61	39.87%	-254.95
13	2	7.97	38.68%	-193.48
	3	7.07	45.61%	-231.02
15	2	9.37	37.56%	-152.46
	3	7.93	47.11%	-194.84
18	2	13.01	27.70%	-93.77
	3	10.63	40.96%	-126.50
21	2	14.36	31.63%	-81.10
	3	11.95	43.11%	-106.40

与试件厚度之间的误差增大。因此,无提高条件下得到的关系模型不能满足提高条件下的壁厚反演精度需

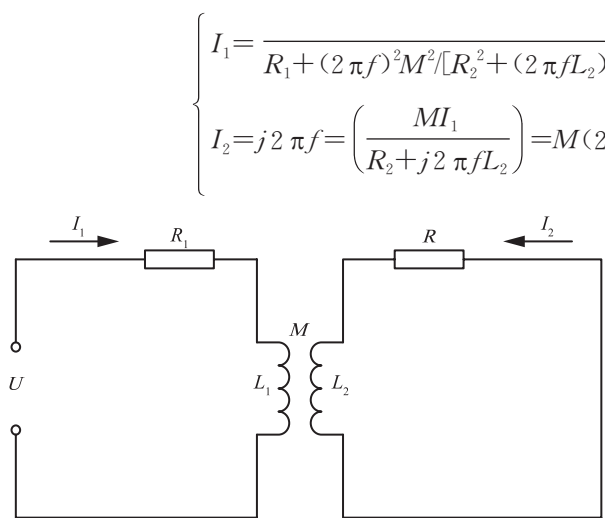


图 3 脉冲涡流检测等效电路图

由此,等效电阻 R 和等效电感 L 可分别表示为:

$$R = R_1 + \frac{(2\pi f)^2 M^2}{R_2^2 + (2\pi f L_2)^2} R_2 \quad (3)$$

$$L = L_1 - \frac{(2\pi f)^2 M^2}{R_2^2 + (2\pi f L_2)^2} L_2 \quad (4)$$

提高距离的变化时会使互感系数 M 发生变化,由式(3)、式(4)可知互感系数 M 的变化会使等效电阻 R 和等效电感 L 发生变换,进而对脉冲涡流检测电压信号产生影响。

为了进一步验证包覆层对检测信号的影响,利用 COMSOL 软件开展仿真实验,获得不同提高距离下 10 mm 厚度试件所对应的检测电压信号(图 4)。可见,

求。需要进一步探究壁厚、提高距离与特征值之间的关系,以得到适应性更强的关系模型,从而满足带包覆层管道检测的需求。

1.3 包覆层对检测电压信号的影响

提高效应一直是涡流检测中的重要干扰因素之一。脉冲信号是直流分量和一系列不同频率正弦信号的叠加,因此可将提高效应看作提高对单一频率信号响应影响的叠加。基于单一频率激励下的等效电路(图 3)^[18],由基尔霍夫定律可知:

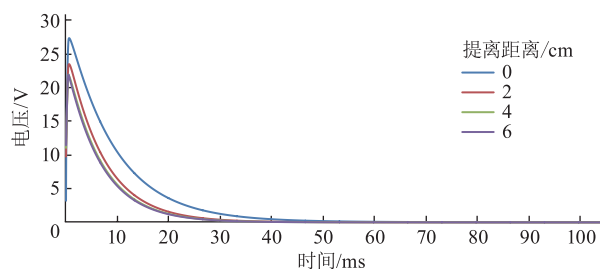
$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_1 j 2\pi f L_1 - I_2 j 2\pi f M = U \\ I_2 R_2 + I_2 j 2\pi f L_2 - I_1 j 2\pi f M = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: j 为复数的虚部; U 为激励电压, V; f 为激励信号频率, Hz; R_1 、 R_2 分别为激励线圈、被测试件中感应的电阻, Ω ; L_1 、 L_2 分别为激励线圈、被测试件中感应的电感, H; I_1 、 I_2 分别为激励线圈、被测试件中感应电流, A; M 为激励线圈与被测试件之间的互感系数。

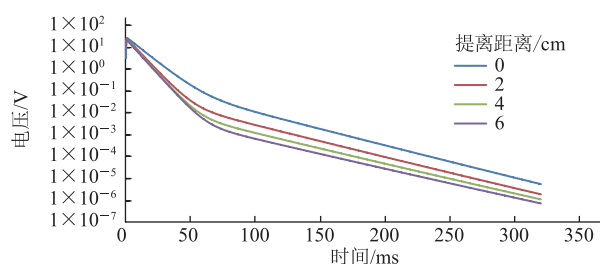
对式(1)进行求解可得:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U}{R_1 + (2\pi f)^2 M^2 / [R_2^2 + (2\pi f L_2)^2 R_2] + j 2\pi f [L_1 - (2\pi f)^2 M^2 L_2 / (R_2^2 + (2\pi f L_2)^2)]} \\ I_2 = j 2\pi f = \left(\frac{M I_1}{R_2 + j 2\pi f L_2} \right) = M (2\pi f)^2 L_1 L_2 + j \frac{2\pi f M R_2 I_1}{R_2^2 + (2\pi f L_2)^2} \end{cases} \quad (2)$$

随着提高距离的增大,检测电压信号下移,信号峰值变小,信号晚期段斜率也发生变化,提高效应对检测信号有较大影响。因此,为保证检测结果的准确性,有必要开展带包覆层情况下的壁厚反演方法研究,以消除提高效应的影响。



(a) 笛卡尔坐标系中的信号



(b) 单对数坐标系中的信号

图 4 不同提高距离下 10 mm 厚度试件的检测电压信号变化曲线

2 基于支持向量机的壁厚反演方法

2.1 基本理论

支持向量机算法既可用于分类分析、回归分析,又可用于线性分析、非线性分析。该方法科学性和理论性较强,使用较少训练数据即可建立模型来解决高维问题,比其他机器学习算法更简单高效^[19-20]。为实现不拆卸包覆层情况下的壁厚检测,解决基于单一的检测电压晚期段斜率反演方法无法适应提离效应的问题,提出一种新思路:采用支持向量机算法建立提离距离、检测电压信号晚期段斜率与壁厚之间的关系模型,将提离距离和检测电压信号晚期段斜率作为输入、壁厚作为输出,实现提离条件下的剩余壁厚反演。

基于支持向量机的壁厚反演方法的核心为:假设存在样本集 $\{(\mathbf{x}_i, y_i), i=1, 2, \dots, l\}$, 其中 \mathbf{x}_i 是第 i 个样本的输入值且为 n 维列向量, 建模所用的 \mathbf{x}_i 为二维向量, 包含提离距离和检测电压信号晚期段斜率; y_i 是第 i 个样本的输出值且 $y_i \in \mathbb{R}$, 此处 y_i 为壁厚值; l 为样本个数。

通过引入 ε 不敏感损失函数, 认为在一定精度范围内可用线性函数拟合, 从而推导 y 对 \mathbf{x} 的依赖关系, 即支持向量机回归。将 ε 不敏感损失函数定义为:

$$|y - f(\mathbf{x})|_\varepsilon = \begin{cases} 0, & |y - g(\mathbf{x})| \leq \varepsilon \\ |y - g(\mathbf{x})| - \varepsilon, & |y - g(\mathbf{x})| > \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: g 为决策函数; $g(\mathbf{x})$ 为回归函数的预测值; \mathbf{x} 、 y 分别为样本的实际输入值、输出值。

不敏感损失函数的意义为: 如果构造的回归函数预测值与样本输出值的差别小于 ε , 则认为该点预测值的损失为 0。当样本为线性数据时, 假设 $g(\mathbf{x})$ 的表达式为:

$$g(\mathbf{x}) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b \quad (6)$$

式中: $\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}$ 为向量 \mathbf{w} 和向量 \mathbf{x} 的内积, $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n; b \in \mathbb{R}$ 。

在式(6)固定不变的情况下, 得到最优化问题为:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad (7)$$

$$s.t. \begin{cases} y_i - \mathbf{w} \cdot \varphi(\mathbf{x}_i) - b \leq \varepsilon \\ \mathbf{w} \cdot \varphi(\mathbf{x}_i) + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases}$$

当约束条件无法实现时, 引入松弛变量 ξ_i, ξ_i^* , 最优化问题即转换为:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \quad (8)$$

$$s.t. \begin{cases} y_i - \mathbf{w} \cdot \varphi(\mathbf{x}_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \mathbf{w} \cdot \varphi(\mathbf{x}_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, l \end{cases}$$

式中: C 为惩罚参数。

引入拉格朗日函数解决凸二次问题, 将最优化问题转换为:

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_i + \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) - \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \quad (9)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \alpha_i, \alpha_i^*, \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C], i=1, 2, \dots, l \end{cases}$$

式中: $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为核函数, 对应着某一空间的内积 $\varphi(\mathbf{x}_i) \cdot \varphi(\mathbf{x}_j)$ 。

最后, 通过寻找最优的 \mathbf{w} 和 b , 得到回归估计函数为:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \quad (10)$$

令 $\beta_i = \alpha_i - \alpha_i^*$, 可得:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l \beta_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \quad (11)$$

2.2 建立模型样本数据库

为建立基于支持向量机的壁厚反演方法模型样本数据库, 开展了提离距离和试件厚度的正交实验, 实验中依次改变试件厚度及提离距离。设置 10 个提离距离, 分别为 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、6 cm、7 cm、8 cm、9 cm 及 10 cm; 设置 8 个被测试件厚度, 分别为 6 mm、7 mm、9 mm、11 mm、13 mm、15 mm、18 mm 及 21 mm。实验中脉冲激励参数保持不变, 选用 4 号传感器(表 3)。利用自制提离支架模拟带包覆层情况下传感器的提离情况, 依次开展 80 组实验, 得到 80 组基础实验数据。

表 3 4 号传感器结构参数

线圈种类	内半径/mm	外半径/mm	高度/mm	匝数
激励线圈	17.0	60	40	800
检测线圈	60.2	71	12	1 200

2.3 建立壁厚反演模型

利用上述实验结果构成 80 组样本数据, 为了保证样本的充足性, 将每组样本数据重复 5 次, 构成 400 组训练样本。样本数据(输入值)为提离距离和检测电压信号晚期段斜率, 样本标签(输出值)为壁厚值。设计中采用 LIBSVM 软件包建立模型, 通过 LIBSVM 软件包可以简单、方便、快速地建立 SVM 模型, 其在模型搭建、样本训练、结果预测等方面已有广泛应用。此外, 为了提升模型的收敛速度和精度, 利用 MATLAB 中的 Mapminmax 函数对样本数据和标签进行归一化处理。

通过对支持向量机原理分析可知, 惩罚参数 C 和

径向基函数参数 σ 的选取对 SVM 模型性能起到至关重要的作用。网格搜索法是在所有候选的参数选择中,通过循环遍历,尝试每一种可能性,选择效果最好的参数,该算法简单且易于并行化,因此,采用网格搜索法确定最佳的 C 和 σ 。由于训练样本具有高维度和非线性的特点,引入径向基(RBF)函数作为核函数。支持向量机壁厚反演模型表达式为:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l \beta_i \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}\|^2}{2\sigma^2}\right) + b \quad (12)$$

通过参数优化,可以确定 σ 为 5.56, 计算得出 b 为 -11.96。 β_i 为列向量,其维度由支持向量的个数确定,此处为 214 维。

2.4 模型验证

为了验证基于支持向量机的壁厚反演模型的准确性,通过测试件实验及结果分析获取了 10 组数据作为测试样本(表 4)。将测试样本的数据输入已构建的测厚模型中,得到壁厚反演结果及误差(表 5),结果表明壁厚反演误差均在 7% 以内,模型有效降低了提离距离变化对检测精度的影响。通过测试件实验验证了基于支持向量机壁厚反演方法应用于带包覆层管道壁厚检测的可行性,提离距离在 10 cm 以内时可检测壁厚范围为 6~21 mm。

表 4 10 组测试样本数据

样本编号	提离距离/cm	信号晚期段斜率值	壁厚/mm
1	0	-267.42	7
2	1	-168.25	11
3	2	-231.97	11
4	3	-125.46	18
5	4	-282.01	13
6	5	-268.19	15
7	6	-362.64	9
8	8	-292.18	21
9	5	-353.49	9
10	10	-348.56	6

表 5 基于 SVM 的壁厚反演模型误差验证结果

样本编号	实际壁厚/mm	反演壁厚/mm	壁厚反演误差
1	7	7.25	3.6%
2	11	11.25	2.3%
3	11	11.22	1.9%
4	18	17.78	1.2%
5	13	12.97	0.3%
6	15	14.89	0.8%
7	9	9.07	0.8%
8	21	19.66	6.4%
9	9	9.13	1.5%
10	6	5.85	2.5%

3 结论

管道包覆层会降低基于脉冲涡流技术的壁厚检测

结果的精度,针对这一工程实际问题,通过实验测试和分析包覆层对检测结果的影响,提出采用支持向量机方法建立提离距离、检测电压信号晚期段斜率与管道壁厚之间的量化反演模型。通过开展测试件实验,构建检测电压信号样本数据库,得到基于支持向量机的剩余壁厚反演模型。对此方法和模型的有效性进行验证,在实验所设条件下,其壁厚反演误差均在 7% 以内。

虽然该方法在实验室验证中准确度良好,但所用试件为铁磁性阶梯试件,与油气管道之间存在差异。此外,为模拟提离效应,在实验中采用支架方式模拟不同厚度的包覆层,这与实际的包覆层也存在差异。因此,后期还需针对油田现场管道进行大规模实测,以便更好地评估该反演方法及模型的有效性。

参考文献:

- [1] 徐志远. 带包覆层管道壁厚减薄脉冲涡流检测理论与方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 66-79.
XU Z Y. Pulse eddy current testing theory and method for wall thinning of insulated pipe with cladding layer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 66-79.
- [2] 沈功田. 中国无损检测与评价技术的进展[J]. 无损检测, 2008(11): 787-793.
SHEN G T. Progress of nondestructive testing and evaluation in China[J]. Non-Destructive Testing, 2008(11): 787-793.
- [3] 江山. 基于脉冲涡流检测技术的实验研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2016: 1-9.
JIANG S. Experimental research based on pulsed eddy current testing technology[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2016: 1-9.
- [4] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1698-1712.
WU X J, ZHANG Q, SHEN G T. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [5] 侯春明. 基于脉冲涡流海底管道无损检测理论与技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 1-35.
HOU C M. Research on theory and technology for non-destructive testing of submarine pipeline based on pulsed eddy current[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 1-35.
- [6] FAN M B, CAO B H, YANG P P, LI W, TIAN G Y. Elimination of liftoff effect using a model-based method for eddy current characterization of a plate[J]. NDT & E

- International, 2015, 74: 66-71.
- [7] 胡冠华, 赵晶亮, 张波涛, 薛丹丹. 基于磁阻传感器的铁磁体探测系统设计[J]. 传感器世界, 2011, 17(8): 26-29.
HU G H, ZHAO J L, ZHANG B T, XUE D D. Ferromagnetic detection system based on magnetic resistance sensors[J]. Sensor World, 2011, 17(8): 26-29.
- [8] 韩昊轩, 张国峰, 张雪, 梁恬恬, 应利良, 王永良, 等. 低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 295-300.
HAN H X, ZHANG G F, ZHANG X, LIANG T T, YING L L, WANG Y L, et al. Design and fabrication of low-noise superconducting quantum interference device magnetometer[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13): 295-300.
- [9] XIE S J, CHEN Z M, TAKAGI T, UCHIMOTO T. Quantitative non-destructive evaluation of wall thinning defect in double-layer pipe of nuclear power plants using pulsed ECT method[J]. NDT & E International, 2015, 75: 87-95.
- [10] YANG H C, TAI C C. The interaction of pulsed eddy current with metal surface crack for various coils[J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 615(1): 409-414.
- [11] 徐志远, 武新军, 康宜华, 李建. 脉冲涡流检测集总参数模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 1-5.
XU Z Y, WU X J, KANG Y H, LI J. Lumped-parameter model for pulsed eddy current testing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2013, 41(5): 1-5.
- [12] 张卿. 带金属保护层构件脉冲涡流检测解析模型及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 1-17.
ZHANG Q. Analytical model and application for pulsed eddy current testing of equipments with metallic claddings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 1-17.
- [13] YIN W L, XU K. A novel triple-coil electromagnetic sensor for thickness measurement immune to lift-off variations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1): 164-169.
- [14] 叶波, 黄平捷, 周泽魁. 涡流检测探头提离变化对抗抗的影响及消除技术[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 2535-2537, 2540.
YE B, HUANG P J, ZHOU Z K. Impedance variations caused by probe coil lift-off and elimination technique in eddy current testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 2535-2537, 2540.
- [15] 高春法, 宋凯, 唐继红. 涡流检测传感器提离效应的抑制[J]. 无损检测, 2003, 25(12): 606-608, 619.
GAO C F, SONG K, TANG J H. Restrain of the lift-off effect of eddy current sensor[J]. Non-Destructive Testing, 2003, 25(12): 606-608, 619.
- [16] 徐志远, 伍权. 基于维纳滤波和主成分分析的脉冲涡流检测信号降噪方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(3): 411-417.
XU Z Y, WU Q. Pulsed eddy current signal de-noising method based on wiener filtering and PCA[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(3): 411-417.
- [17] 柯海, 徐志远, 黄琛, 武新军. 基于信号斜率的铁磁材料脉冲涡流测厚研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2376-2381.
KE H, XU Z Y, HUANG C, WU X J. Research on thickness measurement of ferromagnetic materials using pulsed eddy current based on signal slopes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2376-2381.
- [18] 柯海. 脉冲涡流测厚信号斜率法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 7-37.
KE H. Research on signal slope method of pulse eddy current thickness measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 7-37.
- [19] 李立刚, 万勇, 王宇, 杨勇, 戴永寿. 基于支持向量机和磁记忆技术的管道缺陷深度的量化反演研究[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(1): 29-34, 40.
LI L G, WAN Y, WANG Y, YANG Y, DAI Y S. Quantitative inversion of pipeline defect depth based on support vector machine and magnetic memory technology[J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(1): 29-34, 40.
- [20] 左宪章, 胡德洲, 常东, 钱苏敏. 钢板局部腐蚀的脉冲涡流热成像定量检测[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(7): 652-658.
ZUO X Z, HU D Z, CHANG D, QIAN S M. Quantitative detection of steel local corrosion using pulse eddy current thermography[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(7): 652-658.

(收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2020-11-24; 编辑: 张腾)

基金项目: 国家重点研发计划项目“临海油气管道检测、监控技术研究及仪器装备研制”, 2016YFC0802302。

作者简介: 郝宪锋, 男, 1980年生, 高级工程师, 2014年硕士毕业于中国石油大学(华东)电子通信工程专业, 现主要从事信号分析与处理专业方向的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 18678460769。Email: haoxf@upc.edu.cn