

基于差分脉冲涡流的管道缺陷定量检测

成雯君, 吴其洲

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对管道脉冲涡流检测中提离效应严重影响检测精度这一难题, 提出了一种基于差分脉冲涡流的管道缺陷外检测及几何参数定量评估的方法; 利用 COMSOL 有限元仿真分析线圈参数对缺陷检测的影响, 优化差分传感器结构; 创新性地提出以提离距离和差分电压峰值的斜率为特征量, 建立了缺陷几何参数与特征斜率之间的定量关系模型, 验证了管径和管道金属磁性对缺陷测量的影响; 结果表明, 在 3~6 mm 提离范围内, 裂纹、盲孔和腐蚀缺陷的深度和长度参数测量结果均不受提离效应影响, 且相对误差小于 $\pm 3\%$; 在不同管径、不同相对磁导率的工况条件下, 测量误差稳定在 $\pm 2\%$ 以内; 经多次实验验证, 突破了传统检测技术对提离距离的敏感性限制, 为复杂工况下的管道缺陷高精度检测提供了有效的解决方案。

关键词: 脉冲涡流; 提离效应; 金属管道缺陷; 缺陷测量; 定量测量

Quantitative Measurement of Pipeline Defects Based on Pulsed Eddy Current Testing

CHENG Wenjun, WU Qizhou

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the challenge that the lift-off effect significantly degrades detection accuracy in pulsed eddy current (PEC) testing of pipelines, this paper proposes a method for external pipeline defect detection and quantitative evaluation of geometric parameters based on differential PEC. COMSOL finite element simulation was used to analyze the influence of coil parameters on defect detection, thereby optimizing the structure of the differential sensor. Innovatively, the slope between the lift-off distance and the peak differential voltage was proposed as a characteristic parameter to establish a quantitative relationship model between defect geometric parameters and this characteristic slope. The effects of pipe diameter and pipeline metal magnetic properties on defect measurement were also verified. The results show that within the lift-off range of 3~6 mm, the measurement results of depth and length parameters for crack, blind hole, and corrosion defects are unaffected by the lift-off effect, with relative errors less than $\pm 3\%$. Under working conditions with different pipe diameters and relative magnetic permeabilities, the measurement errors remain stable within $\pm 2\%$. Multiple experimental verifications demonstrate that this method breaks through the sensitivity limitation of traditional detection technologies to lift-off distance, providing an effective solution for high-precision pipeline defect detection in complex working conditions.

Keywords: pulsed eddy current; lift-off effect; metal pipeline defects; defect measurement; quantitative measurement

0 引言

金属管道因经济、可靠等优点被广泛地应用于石油和天然气的开采以及传输过程中。然而, 我国多数油气田已进入开采中后期, 长期处于高温、高压工况及电化学腐蚀环境下的油气管道面临严峻的老化问题, 典型缺

陷如裂纹、盲孔、腐蚀等的萌生和扩展, 不仅会引起管体变形和扭曲, 甚至导致油气井的关闭或停产^[1-3]。根据国家相关标准, 当管道缺陷深度超过壁厚的 30% 时需进行更换^[4], 为降低管壁缺陷引起的油气事故风险, 对在役油气管道开展定期检测并定量评估缺陷几何参数至关重要^[5-6]。

收稿日期:2025-06-27; 修回日期:2025-07-28。

基金项目:山西省自然科学基金(202203021221117)。

作者简介:成雯君(2001-), 女, 硕士研究生。

通讯作者:吴其洲(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式:成雯君, 吴其洲. 基于差分脉冲涡流的管道缺陷定量检测[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12): 67-73, 127.

脉冲涡流检测技术 (PECT) 因其无接触、高效及快速等优点, 成为管道表面缺陷检测的重要手段^[7-8]。该技术以脉冲电流代替正弦电流激励, 在导体外产生脉冲磁场, 使导体内感应出涡流, 通过检测此瞬态涡流电磁场的衰减过程来评估管道缺陷。

目前脉冲涡流检测技术, 多通过从检测信号中提取特征量的方法来反映缺陷几何信息。文献 [9] 发现不锈钢平板过零时间与缺陷深度有强相关性, 在 5~10 mm 厚的不锈钢平板中效果最佳, 但强电磁干扰及表面附着物会削弱其关联性; 文献 [10] 提出的磁场梯度脉冲涡流信号积分特征量, 适用于 50~100 mm 管径的金属管道亚表面腐蚀检测, 却易受管内高速高温腐蚀性流体干扰; 文献 [11] 通过 B_x 分量曲线特征区分金属板下表面缺陷的方法, 在 3~8 mm 厚的铝合金板中表现突出, 但表面加工纹路或复杂处理工艺会干扰其效果; 文献 [12] 建立的信号下降沿对数斜率与油管剩余壁厚映射模型, 对 20~50 mm 内径碳钢油管腐蚀评估准确, 但强腐蚀性土壤环境会降低其精度; 文献 [13-14] 提出的频域提离交叉点理论, 适用于表面平整、提离变化 0~5 mm 的试件, 但表面粗糙度大且提离波动无规律时误差剧增; 文献 [15] 利用 PEC 信号一阶导数 LOI 点反演涂层下材料参数的方法, 在涂层厚度 < 1 mm 且均匀的铜、铝等基材上效果好, 涂层缺陷会导致结果偏差; 文献 [16] 建立的电感—渗碳层厚度曲线, 适用于 < 0.5 mm 厚均匀渗碳层的钢铁材料, 渗碳层不均或材料内部缺陷会影响准确性。上述研究虽证实了脉冲涡流的缺陷表征能力, 但受管道表面粗糙度引发的提离波动影响, 现有特征量模型难以在实际测量中抑制提离效应, 且仅适用于单一缺陷场景, 无法应对复杂多类型缺陷。

为此, 针对裂纹、盲孔和腐蚀等典型管道缺陷, 本文提出一种能够精准测量缺陷几何参数且不受提离效应干扰的检测方法。设计上下对称式差分传感构型, 通过有限元仿真分析线圈几何参数和激励参数对响应信号的影响, 优化传感器参数以提升检测灵敏度。基于脉冲涡流解析模型, 提出以提离距离和差分电压峰值的线性关系斜率为特征量, 实现裂纹、盲孔和腐蚀缺陷的深度/长度定量测量, 并验证该方法在不同管径及磁导率管道中的适用性, 为管道安全评估提供可靠依据。

1 涡流检测原理

1.1 差分涡流检测技术

差分脉冲涡流检测原理如图 1 所示, 通有特定频率交流电的激励线圈会产生一次磁场。当该磁场作用于导电材料表面时, 基于电磁感应原理, 材料表层会感生出闭合环形涡流。涡流的强度与分布受缺陷或材料特性调

制, 同时涡流会产生与一次磁场反向的二次磁场, 对一次磁场形成磁通量削弱效应。由一次和二次磁场叠加构成的复合磁场作用于检测线圈, 其携带的涡流扰动场包含试件缺陷信息。

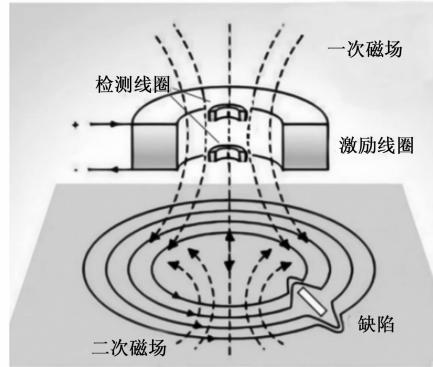


图 1 脉冲涡流检测原理

将激励线圈底部检测线圈检测到的磁场检测信号与顶部检测线圈检测到的磁场信号进行相减得到脉冲涡流差分检测信号。差分检测技术通过消除共模信号成分, 可显著凸显待测件内部微观特征变化, 从而精准反映被检物体的属性差异。然而, 当被测件表面存在光滑度、粗糙度或涂层状态不一致等情况时, 传统空载和负载信号直接相减的差分方法易受背景噪声干扰, 导致检测误差显著增大。

本文提出一种上下对称式差分传感构型, 将检测元件分别布置于激励线圈的上方与下方, 其构型如图 1 所示。通过双位置信号的差分运算来实现更精确的检测, 能够有效地消除干扰。保证了两次的检测信号在同一工作条件下, 提高了检测效率。

1.2 脉冲涡流响应解析模型

1.2.1 涡流检测模型分析

在 PECT 技术的研究过程中, 建立研究对象对应的理论模型是非常重要的, 对于理解整个物理现象的过程、优化探头设计以及建立缺陷检测理论模型都起到了至关重要的作用。

当管道直径远大于壁厚 (径厚比 > 10)、曲率较小, 且表面缺陷尺寸远小于管道周长时, 其局部可近似为“无限大平板”。此时缺陷周围涡流分布受曲率影响微弱, 响应特征与平板表面同类缺陷接近, 涡流周向“环流效应”引发的误差可忽略。此外, 圆柱坐标系下管道涡流方程因含贝塞尔函数等复杂形式而解析解推导困难, 平板模型的直角坐标系则能将涡流方程简化为一维或二维问题, 更便于解析解的推导。因此, 为了简化计算, 管壁简化为平板, 利用傅里叶变换建立 PEC 响应的解析模型。图 2 中, r_1 和 r_2 分别为线圈的内径和外径; z_1 为线圈的提离距离; $z_2 - z_1$ 是线圈的高度。平

板磁导率为 μ_1 , 空气域磁导率为 μ_0 。

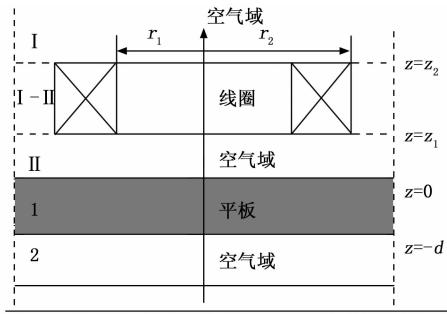


图 2 平板导体多匝线圈几何模型

将多匝线圈看作多个理想单匝线圈的组合, 应用叠加原理, 各区域磁矢量可表示为:

$$\begin{cases} A_I(r, z) = \int_0^\infty K(C_I e^{-\lambda_0 z} + B_0 e^{-\lambda_0 z}) d\lambda_0 \\ A_{II}(r_1, z) = \int_0^\infty K(C_{II} e^{-\lambda_0 z} + B_0 e^{-\lambda_0 z}) d\lambda_0 \\ A_1(r, z) = \int_0^\infty K C_1 e^{-\lambda_0 z} d\lambda_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ_0 为积分变量, $K = \mu_0 J_c / 2 \cdot J_1(\lambda_0 r) \cdot \chi(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2) / \lambda_0^3$, $C_I = e^{\lambda_0 z_1} - e^{\lambda_0 z_2}$, $C_{II} = e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2}$, $C_1 = 2\lambda_0 \mu_1 / \lambda_0 \mu_1 + \lambda_0 \mu_0 C_{II}$, $B_0 = \lambda_0 \mu_1 - \lambda_1 \mu_0 / \lambda_0 \mu_1 + \lambda_1 \mu_0$, $C_{II} = R(\lambda_0) C_1$ 。

由欧姆定律和式 (1) 可求得线圈阻抗变化量:

$$\Delta Z = j\omega \mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2})^2 R(\lambda_0, j\omega) d\lambda_0 \quad (2)$$

对于平面样本, 广义系数 $R(\lambda_0)$ 为:

$$R(\lambda_0, j\omega) = \frac{(\lambda_0 \mu_r)^2 - \lambda^2 + e^{-2\lambda_0 d} [\lambda_1^2 - (\lambda_0 \mu_r)^2]}{(\lambda_1 + \lambda_0 \mu_r)^2 - e^{-2\lambda_0 d} (\lambda_1 - \lambda_0 \mu_r)^2} \quad (3)$$

线圈中的感应电压可表达为:

$$\Delta u^{pec}(t) = \frac{1}{2} \pi \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta Z \times I_{pec}(w) e^{j\omega t} dw \quad (4)$$

其中: $I_{pec}(w)$ 为 PEC 激励 $i_{pec}(t)$ 的傅里叶变换。

1.2.2 提离距离对差分电压的影响

本节从理论上分析提离距离对差分电压的影响, 为了便于对物理现象的解释, 将 s 域中的 PEC 信号的模型表述为:

$$\begin{aligned} \Delta U^{pec}(s) &= \Delta Z(s) I_{pec}(s) = \\ &= s \pi \mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2})^2 \cdot \\ &\quad R(\lambda_0, s) d\lambda_0 I_{pec}(s) \end{aligned} \quad (5)$$

当线圈直径远大于薄片厚度时, 一般系数 $R(\lambda_0, s)$ 随变量 λ_0 的变化较被积函数的其余部分缓慢^[17]。 $R(\lambda_0, s)$ 在某 λ_0 处达到最大值, 称为 λ_{0m} , 定义为探头最小尺寸的分之一。 $I_{pec}(s)$ 与 λ_0 无关。因此, 可以将 $I_{pec}(s)$ 和 $R(\lambda_0, s)$ 取到积分外。在这种情况下, 式 (5) 简

化为:

$$\Delta U^{pec}(s) = s R(\lambda_{0m}, s) I_{pec}(s) \Delta L_0 \quad (6)$$

其中: $\Delta L_0 = \pi \mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2) / \lambda_0^6 (e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2})^2 d\lambda_0$ 。 ΔL_0 是提离距离的函数, 与复变数 s 无关。

最后可得式 (6) 的逆变换为:

$$\Delta U^{pec}(t) = \frac{d}{dt} [R(\lambda_{0m}, t) * I_{pec}(t)] \Delta L_0 \quad (7)$$

$R(\lambda_{0m}, t)$ 随变量 λ_0 的变化缓慢, 这意味着提离距离的变化只改变感应电压的幅值, 而对到峰时间没有影响。推得电压峰值如公式 (8) 所示:

$$U_m = \frac{d}{dt} [R(\lambda_{0m}, t) * I_{pec}(t)] \Big|_{t_m} \Delta L_0 = k \Delta L_0 \quad (8)$$

其中: t_m 为到峰时间。由前文可知, $\frac{d}{dt} [R(\lambda_{0m}, t) * I_{pec}(t)] \Big|_{t_m}$ 与提离距离无关, 其值恒定, 记为 k 。被测导体缺陷的尺寸会影响差分电压峰值 U_m , 当提离距离 ΔL_0 固定时, 定值 k 能够反映缺陷的大小, 进而实现缺陷参数的定量测量。

2 传感器有限元仿真分析

2.1 线圈参数仿真

采用 COMSOL Multiphysics 6.0 仿真软件开展电磁耦合场的有限元建模与分析, 建立的有限元模型如图 3 所示, 该模型包含激励线圈、检测线圈、缺陷及管道试件三维结构。具体参数如表 1 所示。网格划分时, 线圈和被测管道最大网格单元边长为 3 mm, 最小单元边长为 0.042 mm, 空气层相应单元边长分别为 5 和 0.042 mm。

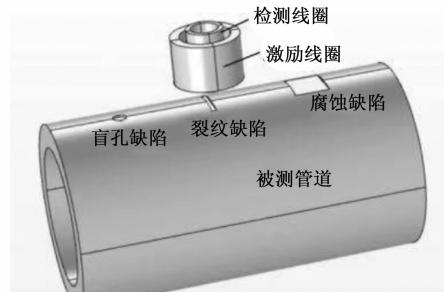


图 3 有限元模型

表 1 有限元模型参数

材料	参数
线圈材料	紫铜
电导率	5.7 MS/m
相对磁导率	1
管道	
外径 * 壁厚 * 长度	100 mm * 10 mm * 100 mm
材料	45# 钢
电导率	5 MS/m
相对磁导率	600

在仿真中设置 3 组缺陷, 裂纹缺陷的长度由 5 mm 递增到 30 mm, 盲孔缺陷直径由 1 mm 递增到 6 mm, 腐蚀缺陷边长由 4 mm 递增到 12 mm, 相邻两缺陷之间距离 8 mm。同一根管道缺陷深度相同, 不同管道之间, 缺陷深度从 1 mm 以步长 1 mm 递增到 6 mm。

通过 COMSOL 的参数化扫描功能, 系统分析了线圈匝数、激励线圈外径及激励频率对检测性能的影响规律。如图 4 所示, 检测线圈匝数与感应电压峰值变化率呈现显著的非线性关系, 当匝数从 100 增至 500 时, 电压峰值变化率随匝数增加先后出现两个极值点, 形成双峰值特征。匝数增加可强化线圈与被测导体的互感耦合, 使缺陷对强涡流的扰动更显著, 检测信号幅值随之增大; 但匝数过多会加剧集肤效应, 减小涡流渗透深度, 导致深层缺陷难被探测, 且自感过大降低线圈带宽, 削弱对快速变化信号的响应能力, 反而可能降低系统整体灵敏度, 最终在 150 匝形成响应峰值。

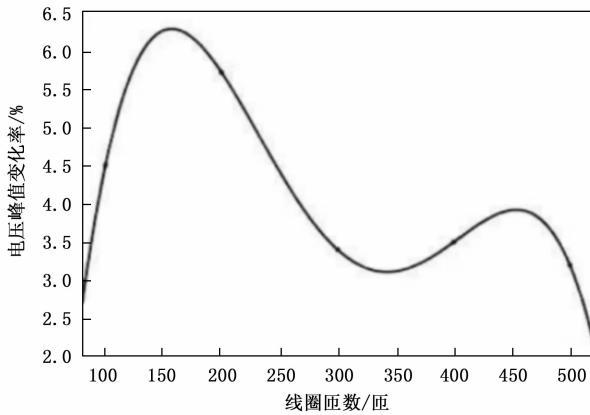


图 4 检测线圈匝数对电压峰值变化率的影响

图 5 揭示了激励线圈匝数与管道表面涡流密度的非线性关系: 当匝数从 150 增至 400 时涡流密度明显提升; 而在 300~400 匝区间, 涡流密度增速显著放缓并趋于稳定。该现象可通过电磁感应定律解释: 低匝数时, 匝数增加会强化线圈与被测导体之间的互感耦合, 使得更多的磁通量穿过导体, 从而在导体中感应出更强的涡流; 当匝数超过临界值后, 线圈自感阻抗显著增大, 导致激励电流衰减, 最终使涡流密度增长趋于饱和。

电压峰值变化率与激励线圈外径呈负相关, 即外径增大时变化率持续减小: 当外径从 3 mm 增至 8 mm 时, 变化率从 15% 降至 6%。这是因为线圈外径增大使得磁场空间分布范围扩大, 导致磁场梯度降低, 磁通量随时间的变化率下降; 同时, 磁场线分布稀疏会分散互感耦合, 使互感系数减小, 进而减弱感应电压的波动及变化速率。

图 6 表明, 线圈激励频率增高时, 管道表面感应电

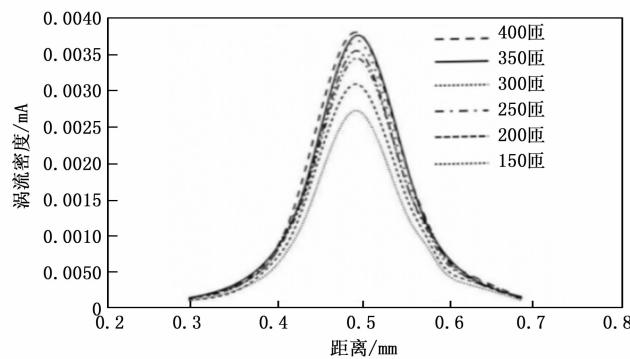


图 5 激励线圈匝数对涡流密度的影响

流密度呈现先增大后减小的趋势, 其最高值出现在 150 Hz。具体而言, 频率初始升高时, 磁场变化率加快会使管道表面感应电动势增大, 驱动感应电流密度上升; 而当频率过高时, 集肤效应显著增强, 涡流渗透深度急剧减小, 导体参与导电的有效截面积大幅缩减, 电阻急剧增大, 最终导致感应电流密度由增转减。

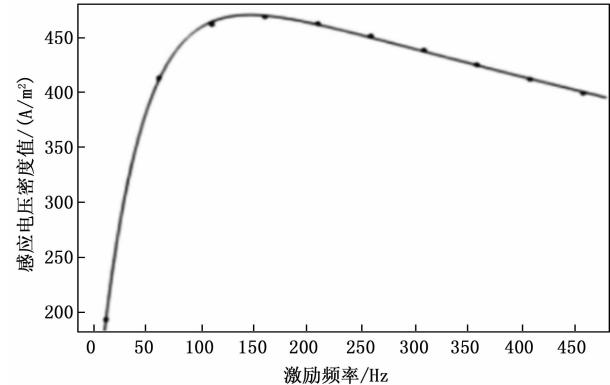


图 6 激励频率对表面感应电流密度的影响

结合仿真结果和线圈实际加工要求, 确定线圈参数如表 2 所示。

表 2 线圈参数

内径/mm	外径/mm	检测线圈匝数	激励线圈匝数	激励电压幅值/V	激励频率/Hz
2	4	150	350	1	150

2.2 不同深度裂纹缺陷仿真结果

针对 45# 钢管道开展提离效应抑制实验, 设定提离距离从 3 mm 以 0.2 mm 步长线性递增至 6 mm, 覆盖工程检测中常见的提离波动范围。实验选取深度分别为 1~8 mm 的预制裂纹缺陷作为检测对象, 通过差分脉冲涡流传感器同步采集不同提离状态下的电压响应信号。由图 7 可知, 对于同一深度缺陷, 差分电压峰值随提离距离增加呈现严格的线性衰减规律。

采用 Matlab 软件对实验数据进行一次函数拟合, 拟合结果如表 3 所示, 其中 x 为提离距离, y 为差分电压峰值。数据显示, 各缺陷深度对应的拟合曲线相关系

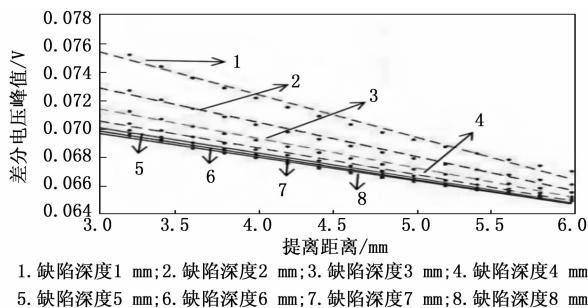


图 7 差分电压峰值与提离距离关系图

数均超过 0.992, 表明提离距离与电压峰值的线性关系具有极高的线性。这与 1.2 节中基于电磁感应定律的理论推导结果一致, 验证了提离距离变化对线性斜率 k 的影响可忽略不计。基于上述发现, 本研究提出将线性斜率 k 作为抗提离效应的特征量, 用来构建缺陷定量检测模型。

表 3 不同缺陷深度下拟合函数具体关系式

缺陷深度/mm	拟合函数	线性相关性
1	$y = -0.003001x + 0.084416$	0.994 5
2	$y = -0.002411x + 0.080092$	0.993 6
3	$y = -0.002076x + 0.077614$	0.994 6
4	$y = -0.001880x + 0.076162$	0.994 9
5	$y = -0.001768x + 0.075350$	0.994 6
6	$y = -0.001715x + 0.074965$	0.994 6
7	$y = -0.001680x + 0.074725$	0.994 5
8	$y = -0.001661x + 0.074616$	0.994 4

将线性关系的斜率与缺陷深度进行高斯拟合, 如图 8 所示, 拟合表达式为:

$$f(k) = 3.589 * e^{-(k-0.003556/0.0008318)^2} + 2926 * e^{-(k-0.009342/0.004358)^2} \quad (9)$$

其中: k 是提离距离和电压峰值线性关系的斜率, $f(k)$ 是缺陷深度。拟合曲线相关系数为 0.999 6。表明该线性模型具有极高的预测精度, 可实现管道裂纹缺陷深度的精准测量。此外, 仿真研究进一步证实, 盲孔缺陷与腐蚀缺陷亦呈现相同规律: 提离距离变化时, 两类缺陷的电压峰值与提离距离的线性斜率特征与裂纹缺陷一致, 验证了该模型对多类型缺陷的普适性。

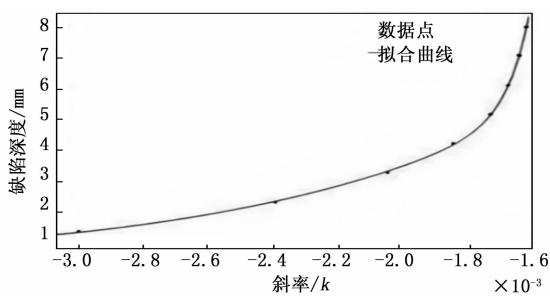


图 8 直线斜率与缺陷深度关系图

3 管道测试实验及结果分析

3.1 实验系统及试件

为验证提离效应抑制方法的有效性, 搭建了实验验证系统。该装置由厦门爱德森公司生产的 ECC-2004 涡流检测仪、探头转换器、检测探头、GWB-200JA 位移校准器、被测导体及数据处理计算机机构成。其中, 位移校准器采用高精度线性导轨结构, 可实现探头与导体间距的微米级调节 (分辨率 0.01 mm)。实验时, 将探头刚性固定于位移校准器的滑块上, 被测管道通过 3 点支撑结构固定于底座, 确保检测过程中提离距离调节的重复性误差小于 0.05 mm。激励信号采用幅值 1 V、频率 10 kHz、占空比 50% 的方波。涡流探头拾取缺陷涡流信号; 然后探头转换器将探头获得的涡流信号转变为与涡流检测仪接口相匹配的信号; 在涡流检测仪中进行前置放大、相敏检波、滤波、相位旋转、增益放大和 A/D 转换后, 最终在计算机上显示缺陷响应信号。

实验采用 45# 钢试件, 规格为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。为研究提出的方法对各种缺陷类型尺寸的作用, 在被测管道外壁通过标准化加工工艺预制不同深度、长度的矩形用于模拟裂纹和腐蚀缺陷, 用不同深度、直径的圆柱模拟盲孔缺陷, 控制缺陷精度 (长度误差 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 、深度误差 $\pm 0.05 \text{ mm}$)。

3.2 缺陷测量实验

3.2.1 裂纹缺陷检测

实验装置系统测量不同缺陷长度下差分电压峰值与提离距离的关系, 结果如图 9 所示。数据表明: 当缺陷长度超过 25 mm 时, 提离距离—电压峰值曲线簇的分布密度显著增加, 测量线圈对缺陷长度的分辨能力呈现下降趋势。基于此, 将裂纹缺陷长度的有效测量量程确定为 5~25 mm。

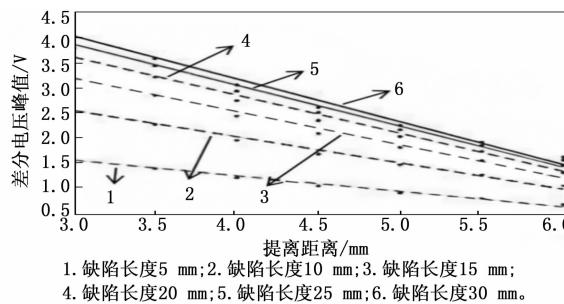


图 9 测量差分电压峰值与提离距离之间的关系

对比有限元仿真结果, 实验数据与仿真曲线具有高度一致性: 两者的提离距离—电压峰值关系均呈现严格的线性特征, 且不同长度缺陷的曲线斜率偏差小于 3%。这一现象验证了仿真模型的可靠性, 同时表明所提方法在 5~25 mm 量程内可实现缺陷长度参数的高精度测量。

对图 9 数据进行线性拟合, 拟合得到表达式如表 4。

表 4 实验数据拟合函数具体关系式

缺陷长度 L/mm	拟合函数	线性相关性
5	$y = -0.000306x + 0.002504$	0.9914
10	$y = -0.000515x + 0.004105$	0.9917
15	$y = -0.000657x + 0.005171$	0.9925
20	$y = -0.000749x + 0.005857$	0.9935
25	$y = -0.000804x + 0.006273$	0.9914

根据表 4 的拟合结果确定缺陷长度和拟合斜率 k 的关系如图 10 所示, 得到斜率 k 和缺陷长度 L 表达式为:

$$L = 90.22 * e^{-(k+2.619/1.059)^2} + 38.02 * e^{-(k+3.783/3.828)^2} \quad (10)$$

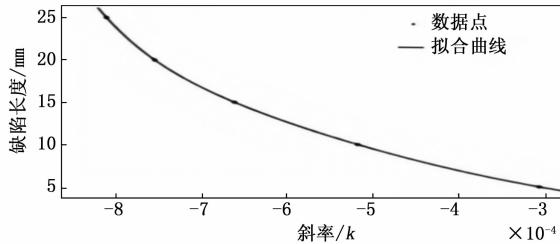


图 10 拟合斜率与缺陷长度关系

根据上述模型对裂纹缺陷长度进行测量, 测量结果如表 5 所示, 测量误差分布如图 11 所示。

根据表 5 与图 11 可知, 不管提离距离如何变化, 缺陷长度测量误差大部分分布在 $(-3\%, 3\%)$ 的区间内, 只有个别点在测量时, 误差超出此范围, 因此可认为缺陷长度在 $5\sim25\text{ mm}$ 范围内, 测量误差 $\%$ 。

采用上述实验方法对裂纹缺陷深度进行测量, 结果如表 6 所示。数据表明, 在 $1\sim6\text{ mm}$ 的缺陷深度范围内, 所有测量结果的相对误差均控制在 $\pm 3\%$ 以内。当缺陷深度与长度保持固定时, 随着提离距离的变化, 特征值斜率 k 始终维持稳定, 对应的缺陷测量结果未出现

表 5 裂纹缺陷长度测量结果

提离 距离 /mm	缺陷长度/mm														
	5			10			15			20			25		
	斜率	测量 值/mm	误差 /%	斜率	测量 值	误差 /%									
3	-2.99×10^{-4}	4.93	1.40	-5.40×10^{-4}	9.83	1.70	-6.63×10^{-4}	15.04	-0.27	-7.12×10^{-4}	19.82	0.90	-8.25×10^{-4}	24.97	0.12
4	-3.18×10^{-4}	5.02	-0.40	-5.43×10^{-4}	9.90	1.00	-6.59×10^{-4}	15.33	2.20	-7.54×10^{-4}	19.38	2.10	-8.37×10^{-4}	25.21	-0.84
5	-3.24×10^{-4}	5.08	-1.60	-5.02×10^{-4}	9.96	0.40	-6.71×10^{-4}	15.32	-2.13	-7.83×10^{-4}	19.90	0.50	-8.36×10^{-4}	24.91	0.36
6	-3.46×10^{-4}	5.12	-2.40	-5.02×10^{-4}	10.08	-0.80	-6.53×10^{-4}	15.24	-1.60	-7.54×10^{-4}	19.38	2.10	-8.84×10^{-4}	25.41	-1.64

表 6 裂纹缺陷深度测量结果

提离 距离 /mm	缺陷深度/mm											
	1		2		3		4		5		6	
	测量值/mm	误差/%	测量值	误差/%								
3	1.02	-2.00	1.97	1.50	3.03	-1.00	4.02	-0.50	5.02	-0.40	6.14	-2.33
4	0.98	2.00	1.99	0.50	2.96	1.33	3.98	0.50	4.93	1.40	6.12	-2.00
5	0.98	2.00	2.06	-3.00	2.97	1.00	3.96	1.00	4.95	1.00	6.01	-0.17
6	1.03	-3.00	2.07	-3.50	2.98	0.67	4.04	-1.00	5.05	-1.00	5.88	2.00

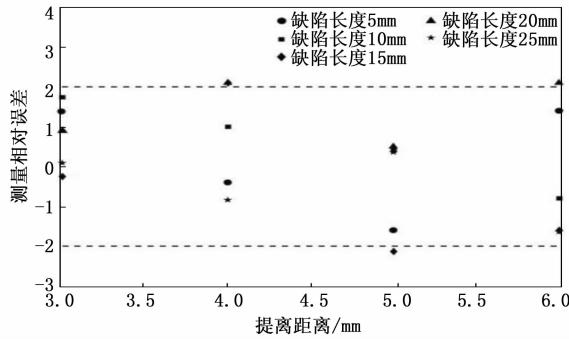


图 11 缺陷长度误差分布图

显著波动。这一现象有力验证了所提方法在抑制提离效应方面的有效性。

与传统管道缺陷定量检测方法 (如仅依赖检测电压峰值和到峰时间的分析手段^[18-20]) 相比, 本方法的测量误差显著降低: 传统方法的测量误差通常在 $\pm 8\% \sim 15\%$ 之间, 而本方法将误差控制在 $\pm 3\%$ 以内, 测量精度提升幅度超过 60%。该结果充分表明, 所提方法能够实现裂纹缺陷尺寸参数的高精度定量评估, 为工业管道的无损检测提供了更可靠的技术方案。

3.2.2 盲孔缺陷检测

同理, 通过实验获取不同盲孔缺陷直径下提离距离与电压峰值的关系曲线。结果显示, 当盲孔直径处于 $1\sim6\text{ mm}$ 范围时, 电压峰值随提离距离变化呈现稳定的线性特征, 且不同直径缺陷的曲线具有明显区分度。

基于此, 确定盲孔缺陷直径的有效测量量程为 $1\sim6\text{ mm}$ 。进一步对各曲线进行线性拟合, 提取拟合直线斜率参数, 建立斜率值与盲孔直径的定量数学表达式, 为盲孔缺陷尺寸的精准检测提供理论依据:

$$D = 7.473e14 * e^{-(k+17.97/2.913)^2} + 14.31 * e^{-(k+5.671/4.497)^2} \quad (11)$$

计算得到表 7 所示的盲孔直径和深度的测量误差, 与裂纹缺陷一致, 相对误差均小于 $\pm 2\%$, 且不受提离变化的影响。

表 7 盲孔直径和深度测量误差 %

盲孔直径/mm	1	2	3	4	5	6
提离距离 3 mm	-1.15	1.95	0.36	-0.78	0.08	0.12
提离距离 4 mm	-0.41	-1.34	1.78	0.88	1.00	0.54
提离距离 5 mm	-1.23	1.59	1.26	0.56	0.74	-1.44
盲孔深度/mm	1	2	3	4	5	6
提离距离 3 mm	-0.28	1.07	1.54	-0.40	0.72	0.42
提离距离 4 mm	0.78	1.74	0.81	1.22	0.98	-0.09
提离距离 5 mm	-0.98	0.81	0.44	1.58	0.92	-0.45

3.2.3 腐蚀缺陷检测

采用上述检测方法对腐蚀缺陷的边长与深度进行测量, 结果如表 8 所示。数据显示, 所有测量值的相对误差均控制在 $\pm 3\%$ 以内, 验证了该方法对腐蚀缺陷几何参数的高精度检测能力。

表 8 腐蚀边长和深度测量误差

腐蚀边长/mm	4	6	8	10	12
提离距离 3 mm	-0.42	0.49	-0.76	-1.51	0.35
提离距离 4 mm	-1.52	1.56	-0.50	1.74	-1.49
提离距离 5 mm	-0.36	-1.98	1.84	-1.69	0.34
腐蚀深度/mm	1	2	3	4	5
提离距离 3 mm	0.78	1.82	1.57	0.95	1.92
提离距离 4 mm	-1.02	0.51	-0.94	-0.46	1.31
提离距离 5 mm	1.49	-0.69	-1.15	0.91	-1.17

结合前文裂纹与盲孔缺陷的实验结果, 表明所提方法能有效抑制提离效应的干扰, 实现管道裂纹、盲孔及腐蚀等多类型缺陷的定量检测, 突破了传统脉冲涡流检测对缺陷类型的限制, 将检测范围拓展至包含长度、直径、深度的多维缺陷参数空间。

3.3 影响因素分析

在工业检测场景中, 管道管径差异与材料磁导率变化显著制约缺陷检测精度。管径变化主要通过改变趋肤效应的作用强度和涡流传播路径影响检测灵敏度: 小直径管道因曲率效应增强导致涡流分布更集中于周向; 而大直径管道的涡流分布则趋近于平板模型但周向检测能力下降。材料磁导率的差异则通过调控磁场耦合效率和趋肤深度改变缺陷调制效果: 高磁导率材料增强磁场集中效应, 使涡流更局限于表面, 显著提升检测灵敏度但同时引入磁噪声干扰, 非铁磁性材料则因磁场分布均匀使缺陷信号主要依赖电导率变化。两者的耦合作用导致信号特征复杂化。现有技术常因管径适配性不足或材料特性干扰产生测量偏差, 威胁管道安全评估可靠性。

本研究以 45 号钢管道为基础, 开展系统性实验: 选取 80、100、120 mm 三种管径, 针对 10 mm 长、2 mm

深裂纹缺陷进行检测。如图 12 所示, 在 3~6 mm 提离距离范围内, 不同管径下缺陷测量相对误差均控制在 $\pm 2\%$ 以内。

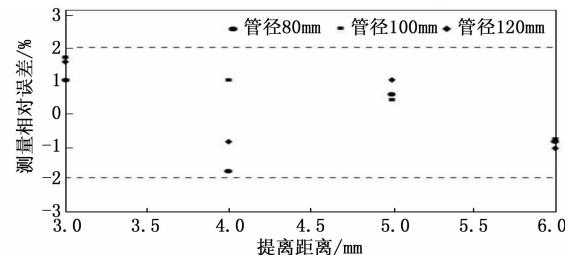


图 12 不同管径对测量结果的影响

此外, 选用 304 不锈钢 ($\mu_r=1.005$)、45 号钢 ($\mu_r=600$)、Q235 钢 ($\mu_r=4000$) 探究磁导率影响, 实验结果 (图 13) 显示, 不同材料的测量误差均小于 $\pm 2\%$ 。综合分析表明, 本文提出的抑制提离的缺陷定量评估方法不受管径变化与材料磁导率差异的影响, 可实现缺陷精准量化, 具备优异的普适性与工程应用价值。

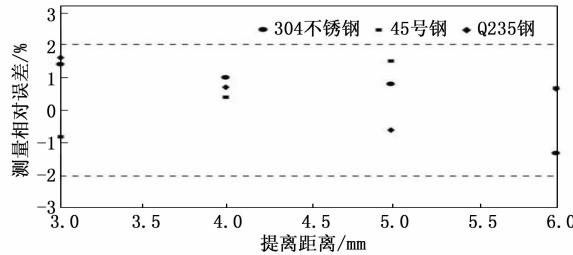


图 13 材料对测量结果的影响

4 结束语

本研究通过有限元仿真优化差分传感器结构, 显著提升了缺陷检测灵敏度; 提出基于提离距离—差分电压峰值斜率的定量评估模型, 实现管道缺陷几何参数的精确评估。实验数据表明, 针对 45# 钢管道预制的裂纹、盲孔和腐蚀缺陷, 在缺陷长度 5~25 mm、直径 1~6 mm、深度 1~6 mm 的范围内, 测量相对误差均控制在 $\pm 3\%$ 以内。相较于传统仅依赖电压峰值和到峰时间的检测方法 (误差范围 $\pm 8\% \sim 15\%$), 测量精度提升幅度超 60%。此外, 在 80~120 mm 管径范围及 304 不锈钢 ($\mu_r=1.005$) 至 Q235 钢 ($\mu_r=4000$) 的磁导率区间内, 不同材质管道的测量误差波动范围小于 $\pm 1.2\%$, 满足 TSG D7005-2018《压力管道定期检验规则——工业管道》等工程检测标准要求。

本文提出的方法通过仿真检测和部分管道实测双重验证, 为脉冲涡流技术在复杂管道下的缺陷定量检测提供了系统的理论支撑与工程解决方案。下一步的研究将着重于优化测量过程, 简化操作步骤, 并结合更多实际管道测试数据进行验证与完善。

(下转第 127 页)