

带包覆层管道缺陷的脉冲涡流检测方法研究*

李佳东¹ 张彦杰^{1,2} 邱俊杰¹ 赵希来¹ 邬宇³ 焦少妮¹ 任思齐⁴

(1. 太原理工大学机械工程学院 太原 030024; 2. 海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院 海安 226601;

3. 山西省检验检测中心 太原 030006; 4. 太原理工大学电气与动力工程学院 太原 030024)

摘要: 包覆层管道被广泛应用于化工、石油、燃气等行业,管道腐蚀引起的裂缝、局部腐蚀等都可能带来重大安全隐患,因此对管道缺陷的检测变得极其重要。但管道上较厚的包覆层导致常规的无损检测很难检测到管道的缺陷,而脉冲涡流无损检测技术因其具有强大的激励能量和出色的穿透能力,能够在不拆除包覆层的情况下对管道进行缺陷检测。本研究旨在分析不同信号特征下对缺陷检测的有效性,文章首先利用仿真软件建立带包覆层管道的三维有限元模型,其次选取差分电压峰值、差分电压峰值时间、差分电压过零时间、差分信号基频幅值作为信号特征,对信号特征与缺陷的关系进行分析,最终选取出更适合的评估信号。仿真结果表明:差分电压峰值与基频幅值随缺陷弧长增大而增大,随缺陷深度增大而增大。峰值时间、过零时间只与深度有关,且随外表面深度增大而增大、随内表面深度增大而减小。并通过信号特征与缺陷的拟合,选取出适用于缺陷分辨的信号。这项研究有助于优化脉冲涡流无损检测技术在包覆层管道缺陷检测中的应用,提高检测的准确性和效率。

关键词: 脉冲涡流; 包覆层管道; 有限元仿真; 信号分析

中图分类号: TN04; TG115.28

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 430.25

Research on pulse eddy current testing method for pipeline defects with coating layer

Li Jiadong¹ Zhang Yanjie^{1,2} Qiu Junjie¹ Zhao Xilai¹ Wu Yu³ Jiao Shaoni¹ Ren Siqi⁴

(1. College of Mechanical Engineering of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Haian & Taiyuan University of Technology Advanced Manufacturing and Intelligent Equipment Industrial Research Institute, Haian 226601, China;

3. Shanxi Inspection and Testing Center, Taiyuan 030006, China; 4. College of Electrical and Power Engineering of

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Coated pipelines are widely used in industries such as chemical, petroleum, and gas. Cracks and localized corrosion caused by pipeline corrosion may pose significant safety hazards, making the detection of pipeline defects extremely important. However, the thicker coating on the pipeline makes it difficult for conventional non-destructive testing to detect defects in the pipeline. Pulse eddy current non-destructive testing technology, due to its strong excitation energy and excellent penetration ability, can detect defects in the pipeline without removing the coating. This study aims to analyze the effectiveness of defect detection under different signal characteristics. Firstly, a three-dimensional finite element model of a pipeline with a coating layer is established using simulation software. Secondly, differential voltage peak, differential voltage peak time, differential voltage zero crossing time, and differential signal fundamental frequency amplitude are selected as signal features to analyze the relationship between signal features and defects. Finally, a more suitable evaluation signal is selected. The simulation results show that the peak value of differential voltage and the amplitude of fundamental frequency increase with the increase of defect arc length and with the increase of defect depth. The peak time and zero crossing time are only related to depth, and increase with the depth of the outer surface and decrease with the depth of the inner surface. And by fitting signal features with defects, select signals suitable for defect resolution. This study helps to optimize the

收稿日期: 2024-04-16 Received Date: 2024-04-16

* 基金项目: 国家市场监督管理总局技术保障专项项目(2023YJ13)、山西省应用基础研究计划青年项目(20210302124354, 20210302124051)、海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院开放研发项目(2023HA-TYUTKFYF005)资助

application of pulsed eddy current non-destructive testing technology in defect detection of coated pipelines, improving the accuracy and efficiency of detection.

Keywords: pulsed eddy current; coated pipe; finite element simulation; signal analysis

0 引言

脉冲涡流检测(pulsed eddy current, PEC)是一种非接触式的无损检测方法,由于其具有的出色穿透能力,可实现不拆除包覆层进行缺陷检测,并且检测的经济、人力成本低,安全性好,被广泛应用于金属材料的缺陷检测和表面质量评估^[1-3]。武新军等^[4]对脉冲涡流无损检测技术理论及方法做了全面的论述,PEC 利用涡流原理和脉冲信号相结合,能够快速、准确地检测出材料缺陷,相较于传统涡流检测,检测速度更快、检测深度更深^[5-7]。

包覆层管道拆除需要很高的经济成本,且人力不易拆除,而 PEC 利用其出色的穿透能力可以实现更深缺陷的检测^[8-10]。许多国内外研究学者开始利用 PEC 的这一特性,对包覆层管道缺陷检测开展了大量研究。在信号分析方面,原鹏等^[10]利用差分电压峰值对铁磁性材料管道内外壁缺陷评估做了研究,研究表明差分电压峰值随外壁缺陷深度和宽度增加而增加,差分电压峰值随内壁缺陷深度增加而减小。Song 等^[11]利用差分电压信号最后一个峰值点来评估金属厚度,研究表明该方法具有检测金属厚度减薄能力。赵桐等^[12]从时域和频域上探究了差分电压与金属薄板厚度的变化关系。研究表明在时域上,峰值和峰值时间随金属薄板厚度的增加而增大。在频域上,基频幅值与金属薄板厚度成线性关系。蔡勤等^[13]用单对数坐标系中晚期信号直线段斜率来评估被测构件壁厚,研究表明以单对数坐标系中晚期信号直线段斜率作为评估被测构件壁厚的特征值时,提离高度对结果几乎无影响。Li 等^[14]优化了探头尺寸和激励波形,提取磁通相对变化和差分电压峰值时间两个特征量用于检测包覆层下铁磁性管道的损伤状况。殷雪峰等^[15]通过分析脉冲涡流信号,发现在双对数坐标系中,中期信号直线段的截距与提离高度之间存在幂函数关系。杨盼盼等^[16]利用有限元方法建立了脉冲涡流厚度检测的理论模型,分析了金属板材在不同电导率和厚度时的差分信号。研究表明电导率一定时,差分信号峰值随金属板材厚度增加而增加,金属板材厚度相同时,电导率越大差分信号峰值就越大。

综上所述,这些研究为 PEC 技术在带包覆层管道缺陷检测中的应用提供了有益的研究成果。电压峰值、峰值时间、过零时间等信号特征经常被用来对管道缺陷进行信号分析^[17-20],对利用 PEC 检测带包覆层管道缺陷具有很大参考意义。虽然在 PEC 检测中,研究者们已经提

出了许多信号特征来分析管道缺陷,但对于不同缺陷在不同信号特征下的最优性研究较少。为分析不同信号特征在不同缺陷下的检测适用性,文章在上述研究者的基础上对缺陷特征信号的选取与分辨做了进一步研究,建立三维仿真模型来探究带包覆层管道缺陷与差分信号的关系,对内、外表面两种缺陷类型进行讨论。

1 脉冲涡流检测理论

1.1 检测原理

图 1 为 PEC 工作原理图,脉冲涡流检测技术是利用图 2 所示具有一定占空比的脉冲方波信号作为激励,把脉冲方波信号加载在激励线圈两端,当脉冲方波信号瞬时上升或瞬时下降时,激励线圈就会感应生成初生磁场,初生磁场在试件中会产生涡流,涡流在衰减的过程中又会产生次生磁场,次生磁场会使检测线圈中感应出瞬态的感应电压,从而获得试件的信号特征。当被测试件有缺陷,或者磁导率、电导率等性质改变时,会使涡流发生变化,从而次生磁场发生改变,最终使得检测线圈上的感应电压发生变化。从而可以利用检测线圈感应电压信号来评估缺陷特征。

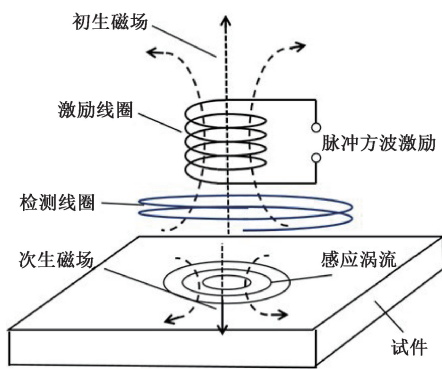


图 1 PEC 工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of PEC

1.2 脉冲涡流渗透深度

在常规的涡流无损检测中,涡流能够渗入导体内的距离称为渗透深度。在导体内部,随着与导体表面距离的增加,涡流密度呈指数衰减,当导体内的涡流密度值衰减到为导体表面涡流密度值的 $1/e$ (37%) 时,称该位置深度为标准渗透深度,也称趋肤深度。渗透深度 δ 公式如式(1)所示。

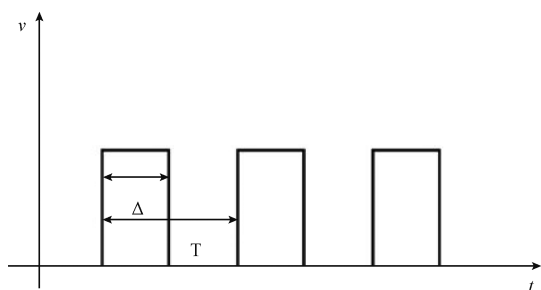


图 2 脉冲方波信号

Fig. 2 Pulse square wave signal

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

对于脉冲涡流同样适用,基波分量下的脉冲涡流的渗透深度 δ_1 可以定义为:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2\Delta}{\pi \mu \sigma}} \quad (2)$$

其中 f 表示脉冲方波频率, μ 为导体磁导率, σ 代表导体电导率, Δ 是脉冲宽度。

2 有限元仿真

2.1 建立仿真模型

图 3 为带包覆层管道三有限元模型,利用 Comsol 软件进行分析,选取物理场为磁场与电路。模型建立中建立半管道,可以有效减少仿真时长,建立外层空气域并设定为无限元域,可以模拟真实的无限大空气环境。图 4 为管道内部缺陷和外部缺陷示意图,管道模型中共有 3 层,自内而外分别是管道、保温层、保护层。线圈模型中(如图 5)采用互感式线圈,内线圈为激励线圈,外线圈为检测线圈。空气模型中采用圆柱形建立,包裹管道和线圈。激励线圈内半径 8 mm,外半径 22 mm,高 29 mm,匝数 400,检测线圈内半径 24 mm,外半径 28 mm,高 10 mm,匝数 400。(模型尺寸见表 1,材料属性见表 2)。在电路设置中,脉冲方波激励信号大小为 20 V,激励频率为 1 Hz,占空比 50%,上升沿,下降沿都为 2 ms。激励线圈激励方式采用电路(电流)方式。在网格划分中,网格采用自由四面体网格,空气域网格常规,在不影响精度的情况下节省计算时间,管道、保温层、保护层网格细化,缺陷及线圈网格选择极细化以提高检测信号精度。边界条件主要设置有安培定律、磁绝缘、磁矢势初始值等。求解器选择全耦合瞬态求解器,全耦合方法采用恒定(牛顿)。

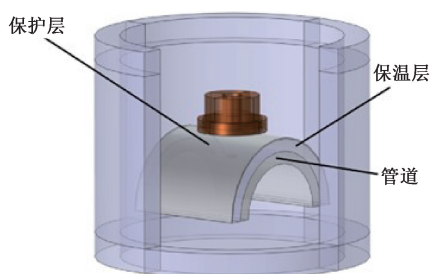


图 3 管道模型

Fig. 3 Pipeline model

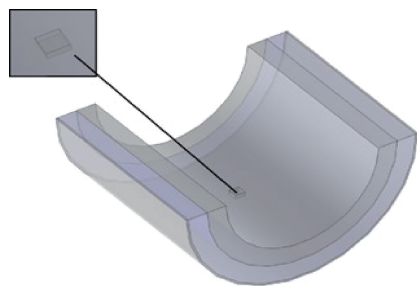
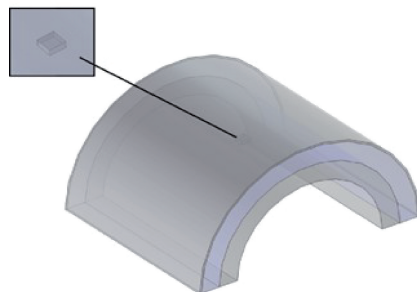
(a) 内表面缺陷
(a) Internal surface defect(b) 外表面缺陷
(b) External surface defect

图 4 管道缺陷

Fig. 4 Pipeline defects

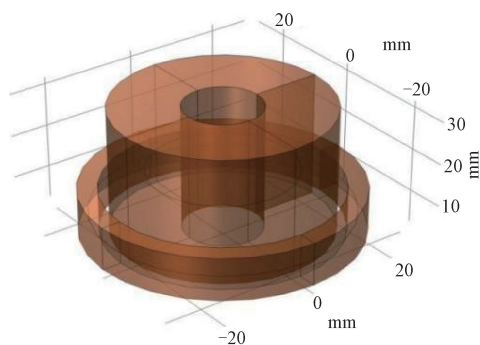


图 5 线圈模型

Fig. 5 Coil model

表 1 模型尺寸
Table 1 Model dimensions

名称	内径 r/mm	外径 r/mm	高度/mm	匝数
激励线圈	8	22	29	400
检测线圈	24	28	10	400
管道	40.5	50.5	100	
保温层	50.5	60.5	100	
保护层	60.5	61.5	100	
空气	90	110	180	

表 2 材料属性
Table 2 Material properties

名称	材料	相对磁导率	电导率/(S·m ⁻¹)	介电常数
线圈	铜	1	6×10^7	1
管道	铝	1	3.7×10^7	1
保温层	石棉	1	0	1
保护层	铝	1	3.7×10^7	1
空气域	空气	1	0	1

3 缺陷仿真时域与频域分析

仿真中以无缺陷管道的感应电压为参考电压,以有缺陷管道的感应电压减去无缺陷管道感应电压 ΔU 为差分电压,用于观察分析。

3.1 表面周向弧长缺陷

在有限元仿真中,选取缺陷宽度 5 mm,缺陷深度 2 mm 不变,周向弧长缺陷设定 2~8 mm,按 1 mm 递增,仿真结果如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出,不同弧长缺陷的差分电压有着不同的峰值,到达峰值的时间几乎不变,差分电压过零时间几乎一致。且外表面周向弧长缺陷差分电压峰值随缺陷弧长增大而增大。

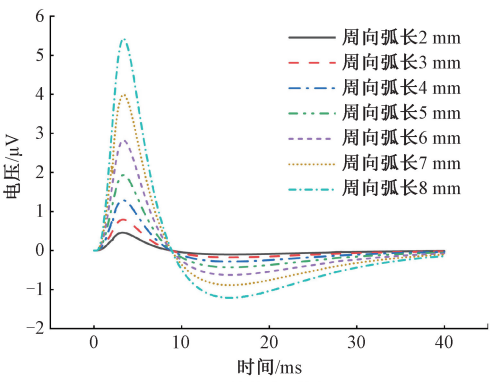
在图 6(b)的拟合曲线中,外表面周向弧长缺陷差分电压峰值与缺陷弧长呈指数函数关系,且拟合效果良好。外表面周向弧长缺陷差分电压峰值与缺陷弧长拟合曲线为: $y = 0.681e^{0.28x} - 0.75$,其相关系数 $r^2 = 0.999\ 8$ 。该拟合函数可评估管道外表面周向弧长缺陷。

3.2 表面深度缺陷

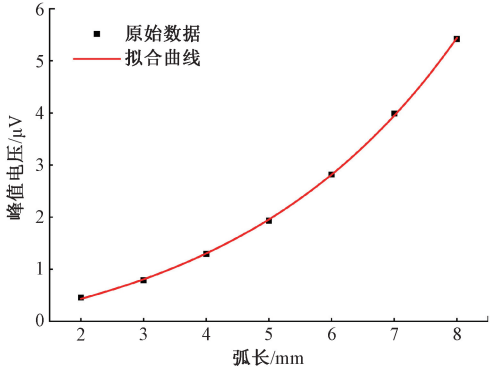
在有限元仿真中,选取周向弧长缺陷长度 5 mm,轴向宽度 5 mm 不变。缺陷深度设定 2~8 mm,按 1 mm 递增,仿真结果如图 7 所示。

从图 7(a)中可以看出,外表面深度缺陷差分电压峰值随着缺陷深度增大而增大,其原因是不同深度缺陷的感应电压存在的差异主要是由于次生磁场的变化导致的,当深度增大时,管道内感应涡流减小,次生磁场随之减弱,叠加后的总磁场变大,感应电压增大。

在图 7(b)的拟合曲线中,外表面深度缺陷差分电压



(a) 差分电压图



(b) 峰值电压与弧长关系图
(b) Peak voltage and arc length relationship diagram

图 6 表面周向弧长缺陷仿真

Fig. 6 Simulation of circumferential arc length defects on the surface

峰值与缺陷深度呈指数函数关系,拟合效果良好。外表面深度缺陷差分电压峰值与缺陷深度拟合曲线为: $y = -4.94e^{-0.27x} + 4.79$,其相关系数 $r^2 = 0.999\ 1$ 。该拟合函数可评估管道外表面深度缺陷。

在图 7(c)的拟合曲线中,峰值时间与过零时间分别随缺陷深度增大而增大,外表面深度缺陷差分电压峰值时间、差分电压过零时间分别与缺陷深度呈一次函数关系,拟合曲线分别为:

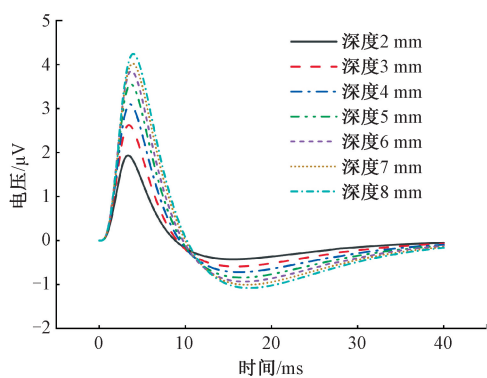
$y_1 = 0.12x + 3.08$,其相关系数 $r_1^2 = 0.986\ 4$ 。

$y_2 = 0.23x + 8.38$,其相关系数 $r_2^2 = 0.997\ 3$ 。拟合函数可评估管道外表面深度缺陷。

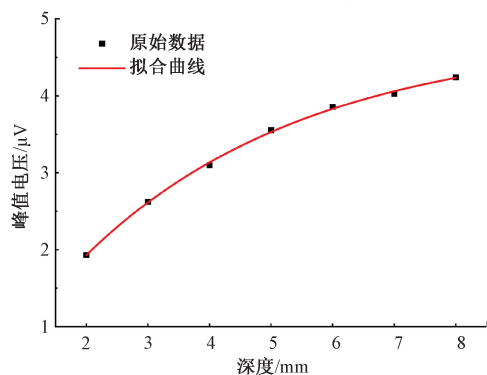
3.3 内表面周向弧长缺陷

在有限元仿真中内表面缺陷同表面设定一致,选取缺陷宽度 5 mm,缺陷深度 2 mm 不变,周向弧长缺陷设定 2~8 mm,按 1 mm 递增,仿真结果如图 8 所示。

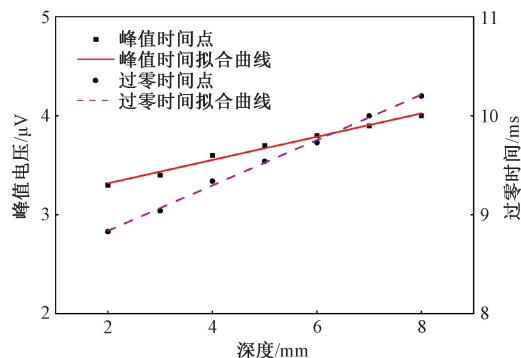
从图 8(a)中可以看出,不同弧长缺陷的差分电压有着不同的峰值,到达峰值的时间几乎不变,差分电压过零时间几乎一致。且内表面周向弧长缺陷差分电压峰值随着缺陷弧长增大而增大。



(a) 差分电压图
(a) Differential voltage diagram



(b) 峰值电压与深度关系图
(b) Peak voltage depth relationship diagram



(c) 峰值时间、过零时间与深度关系图
(c) Diagram of peak time, zero crossing time, and depth relationship

图 7 表面深度缺陷仿真

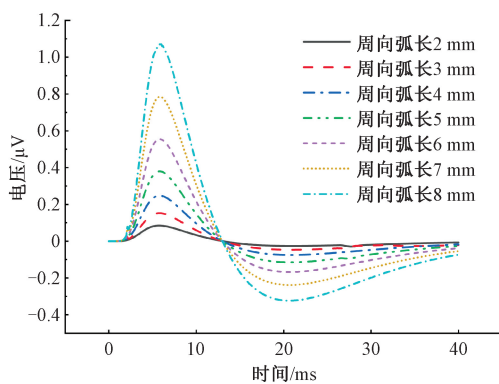
Fig. 7 Simulation of surface depth defects

在图 8(b) 的拟合曲线中,内表面周向弧长缺陷差分电压峰值与缺陷弧长呈指数函数关系,且拟合效果良好。内表面周向弧长缺陷差分电压峰值与缺陷弧长拟合曲线为: $y = 0.14e^{0.27x} - 0.16$,其相关系数 $r^2 = 0.9998$ 。该拟合函数可评估管道内表面周向弧长缺陷。

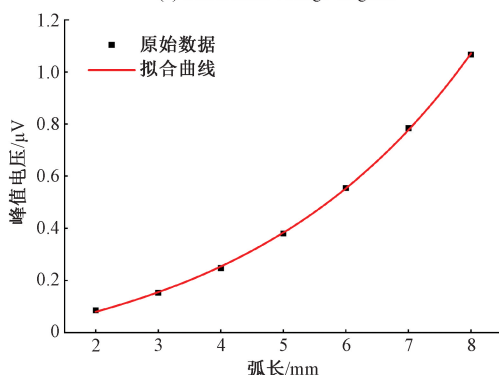
3.4 内表面深度缺陷

在有限元仿真中,选取周向弧长缺陷长度 5 mm,轴向宽度 5 mm 不变,缺陷深度设定 2~8 mm,按 1 mm 递增,仿真结果如图 9 所示。

从图 9(a) 中可以看出,内表面深度缺陷差分电压峰



(a) 差分电压图
(a) Differential voltage diagram



(b) 峰值电压与弧长关系图
(b) Peak voltage and arc length relationship diagram

图 8 内表面周向弧长缺陷仿真

Fig. 8 Simulation of circumferential arc length defects on the inner surface

值随着缺陷深度增大而增大,当深度增大时,管道内感应涡流减小,次生磁场随之减弱,叠加后的总磁场变大,感应电压增大。

在图 9(b) 的拟合曲线中,内表面深度缺陷差分电压峰值与缺陷深度呈指数函数关系,拟合效果良好。外表面深度缺陷差分电压峰值与缺陷深度拟合曲线为: $y = 1.07e^{0.16x} - 1.09$,其相关系数 $r^2 = 0.9999$ 。该拟合函数可评估管道内表面深度缺陷。

在图 9(c) 的拟合曲线中,峰值时间与过零时间分别随缺陷深度增大而减小,内表面深度缺陷差分电压峰值时间、差分电压过零时间分别与缺陷深度呈一次函数关系,拟合曲线分别为:

$$y_1 = -0.18x + 6.15, \text{ 其相关系数 } r_1^2 = 0.9912.$$

$$y_2 = -0.29x + 13.47, \text{ 其相关系数 } r_2^2 = 0.9932. \text{ 拟合函数可评估管道内表面深度缺陷。}$$

3.5 缺陷仿真频域分析

脉冲信号相比于正弦信号,拥有丰富的频率特征,可更好的对缺陷从频域进行分析,因此对差分信号频域的分析有很有必要。对差分信号进行 FFT 变换,选取基频

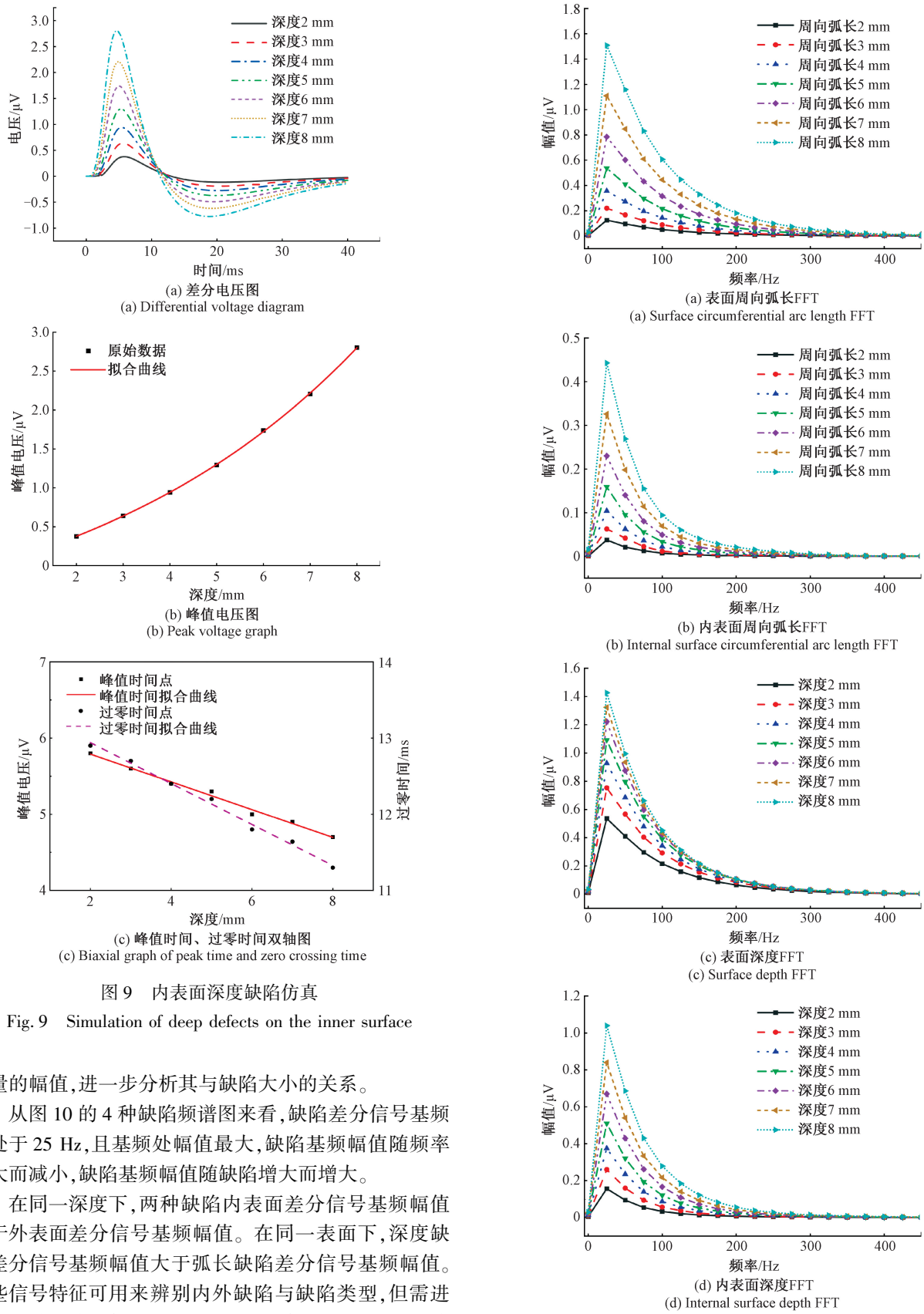


图 9 内表面深度缺陷仿真

Fig. 9 Simulation of deep defects on the inner surface

分量的幅值,进一步分析其与缺陷大小的关系。

从图 10 的 4 种缺陷频谱图来看,缺陷差分信号基频均处于 25 Hz,且基频处幅值最大,缺陷基频幅值随频率增大而减小,缺陷基频幅值随缺陷增大而增大。

在同一深度下,两种缺陷内表面差分信号基频幅值小于外表面差分信号基频幅值。在同一表面下,深度缺陷差分信号基频幅值大于弧长缺陷差分信号基频幅值。这些信号特征可用来辨别内外缺陷与缺陷类型,但需进一步与其他特征信号比较,选取最优信号来用于分析特定缺陷。

图 10 差分信号频域仿真分析

Fig. 10 Frequency domain simulation analysis of differential signals

3.6 内外缺陷分辨

对于缺陷的分辨有助于更好的对缺陷进行系统的分析,所以将内外两类缺陷的基频幅值、差分电压峰值、差分电压峰值时间、差分电压过零时间分别与深度进行联合分析。

从图 11(a)中可以看出,内外表面缺陷差分信号基频幅值都随弧长(深度)增大而减小,且在同一弧长(深度)下,外表面缺陷差分信号基频幅值要大于内表面缺陷差分信号基频幅值。在图 11(b)中可以看出,峰值电压与基频幅值规律一致。从图 11(c)与图 11(d)中可以看出,内表面下弧长与深度型缺陷的峰值时间与过零时间都大于表面弧长与深度型缺陷,且在周向弧长缺陷中,峰值时间与过零时间不随缺陷大小发生变化。基于上述信号特征分析,对内外表面下不同类型缺陷进行系统分类,更好的对缺陷进行判别,做出图 12 所示的缺陷分辨图。

如图 12 与表 3 所示,在内外表面缺陷类别中,内表面缺陷峰值时间都大于 4.5 ms,外表面缺陷峰值时间都小于 4.5 ms。内表面缺陷过零时间都大于 11 ms,外表面缺陷过零时间都小于 11 ms。这两种特征信号相较于峰值电压与基频幅值能更好的对内、外表面类型进行分类。

通过表 4 与表 5 可以看出,2~4 mm 小型弧长与深度缺陷可用峰值电压与基频幅值分辨,4~8 mm 大型弧长与深度缺陷可用峰值时间与过零时间分辨。

表 3 内外表面缺陷判别

Table 3 Identification of internal and external surface defects

缺陷类型	峰值时间/ms	过零时间/ms
内表面缺陷	>4.5	>11
外表面缺陷	<4.5	<11

表 4 小弧长与深度型缺陷判别

Table 4 Discrimination of small arc length and depth type defects

	缺陷类型	基频幅值/ μV	峰值电压/ μV
2~4 mm 缺陷	外表面弧长缺陷	<0.5	<1.5
	外表面深度缺陷	>0.5	>1.5
	内表面弧长缺陷	<0.12	<0.4
	内表面深度缺陷	>0.12	>0.4

表 5 大弧长与深度型缺陷判别

Table 5 Discrimination of large arc length and depth type defects

	缺陷类型	峰值时间/ms	过零时间/ms
4~8 mm 缺陷	外表面弧长缺陷	<3.5	<9
	外表面深度缺陷	>3.5	>9
	内表面弧长缺陷	>5.5	>12.7
	内表面深度缺陷	<5.5	<12.7

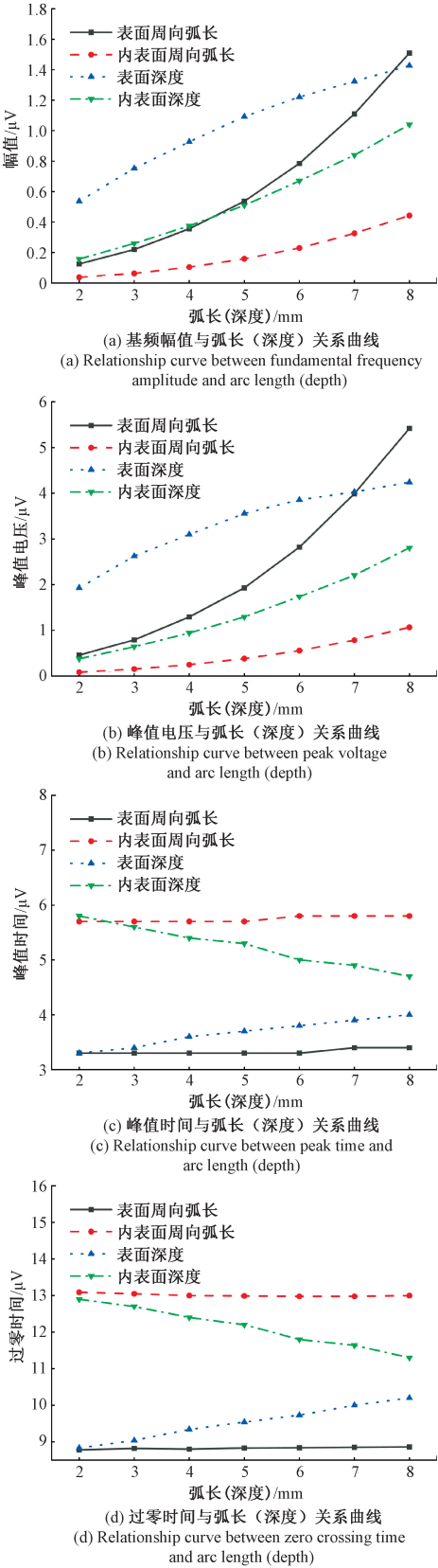
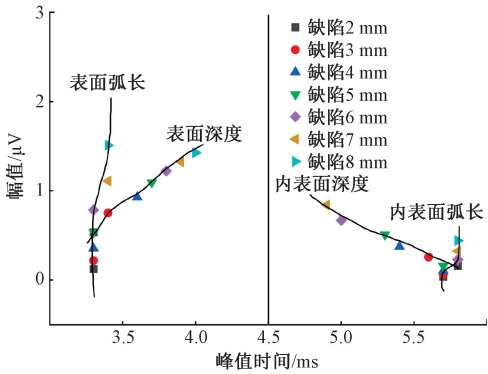
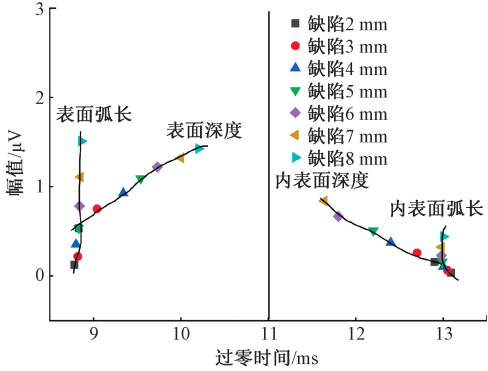


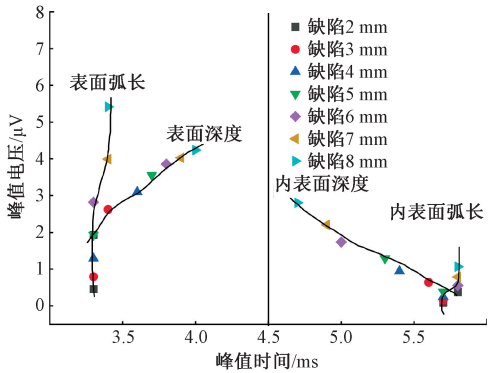
图 11 特征信号与弧长(深度)关系曲线
Fig. 11 Relationship curve between characteristic signal and arc length (depth)



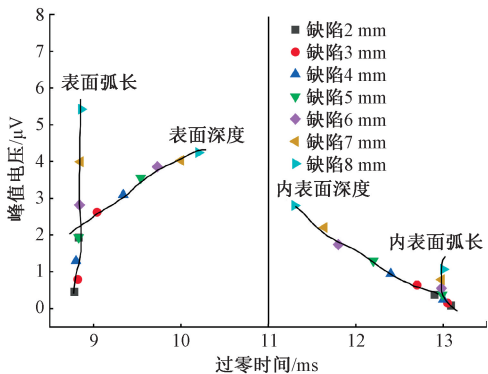
(a) 峰值时间与振幅分辨图
(a) Peak time and amplitude distinguish diagram



(b) 过零时间与振幅分辨图
(b) Zero crossing time and amplitude distinguish diagram



(c) 峰值时间与峰值电压分辨图
(c) Peak time and peak voltage distinguish diagram



(d) 过零时间与峰值电压分辨图
(d) Zero crossing time and peak voltage distinguish diagram

图 12 缺陷分辨图

Fig. 12 Defect distinguish diagram

4 结 论

文章首先介绍了脉冲涡流检测原理,并给出了脉冲涡流渗透深度公式。然后建立了带包覆层管道的三维有限元模型进行仿真分析,选取差分电压峰值、差分电压峰值时间、差分电压过零时间、差分信号基频幅值作为信号特征,对不同信号特征与缺陷的关系进行研究,并验证了不同信号特征对于缺陷检测的适用性。文章提出了将不同信号特征进行联合分析方法,通过峰值时间与峰值电压、过零时间与峰值电压、峰值时间与基频振幅、过零时间与基频振幅的联合结果实现了对不同类别缺陷的分辨,该方法有效的将缺陷类型进行了分类判别,能够有效帮助带包覆层管道缺陷检测,对解决带包覆层管道缺陷评估具有广泛的工程应用价值。但检测信号的提离影响仍未得到有效的解决,在未来的工作中,对于提离的影响有待深入研究。

参考文献

[1] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述 [J]. 自动化学报, 2020, 46 (11): 2319-2336.
LI SH B, YANG J, WANG ZH, et al. Review of development and application of defect detection technology [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(11): 2319-2336.
[2] 曾绪财, 张葛祥, 任涛, 等. 管道内检测研究展及展望 [J]. 交通信息与安全, 2019, 37(6): 20-31.
ZENG X C, ZHANG G X, REN T, et al. Research progresses and prospects of pipeline internal inspection [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(6): 20-31.
[3] 卢泓方, 吴晓南, TOM I, 等. 国外天然气管道检测技术现状及启示 [J]. 天然气工业, 2018, 38 (2): 103-111.
LU H F, WU X N, TOM I, et al. The status quo of natural gas line pipe inspection technologies abroad and its implications for China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 103-111.
[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, et al. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1721.
[5] 李超月, 王璇, 牛卫飞, 等. 金属保护层对脉冲涡流检测影响实验研究 [J]. 电子测量技术, 2023,

- 46(14): 24-29.
- LI CH Y, WANG X, NIU W F, et al. Experimental study on the influence of metal protective layer on pulsed eddy current testing [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(14): 24-29.
- [6] 燕芳, 王志春, 丁东阳. 电涡流测厚系统特征值提取方法[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(7): 18-20.
- YAN F, WANG ZH CH, DING D Y, et al. Extraction method of characteristic value of eddy current thickness measurement system [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(7): 18-20.
- [7] 李兴邦, 叶志浩, 罗宁昭, 等. 基于 TMR 传感器的脉冲涡流 C 扫描成像技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8): 105-113.
- LI X B, YE ZH H, LUO N ZH, et al. Research on pulsed eddy current C-scan imaging technology based on TMR sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(8): 105-113.
- [8] 王安泉, 陈健飞, 杨勇, 等. 铁磁性材料的脉冲涡流测厚与特征量提取[J]. *无损检测*, 2020, 42(11): 38-41.
- WANG A Q, CHEN J F, YANG Y, et al. Pulsed eddy current thickness measurement and characteristic extraction of ferromagnetic materials[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(11): 38-41.
- [9] ZHANG W, SUN H, TAO A H, et al. Local defect detection of ferromagnetic metal casing based on pulsed eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-9.
- [10] 原鹏, 魏治杰, 王恪典, 等. 脉冲涡流技术对包覆层管道缺陷检测[J]. *机械设计与制造*, 2023 (9): 55-58, 63.
- YUAN P, WEI ZH J, WANG K D, et al. Pulse eddy current technology for detection of coating pipe defects[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(9): 55-58, 63.
- [11] SONG Y, WU X J, QIU J H, et al. Thickness measurement for non-ferromagnetic metal under the large liftoff based on the last peak point of differential pulsed eddy current signals[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 64(1-4): 1119-1126.
- [12] 赵桐, 彭斌. 基于脉冲涡流的金属薄板厚度检测研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(1): 117-121.
- ZHAO T, PENG B. Research on thickness detection of metal sheet based on pulse eddy current[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(1): 117-121.
- [13] 蔡勤, 李继承, 戚政武, 等. 基于脉冲涡流(瞬变电磁)技术的带包覆层压力管道壁厚检测研究[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(2): 21-26.
- CAI Q, LI J CH, QI ZH W, et al. Study on wall thickness measurement of pressure pipe with coated layer based on pulse eddy current (transient electromagnetic method) technology [J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(2): 21-26.
- [14] LI J, WU X J, ZHANG Q, et al. Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing[J]. *NDT&E International*, 2015, 75: 57-64.
- [15] 殷雪峰, 程千里, 窦凤杰, 等. 基于脉冲涡流的提高高度检测方法[J]. *压力容器*, 2021, 38(9): 81-86.
- YIN X F, CHENG Q L, DOU F J, et al. Research on liftoff measurement based on pulsed eddy current [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2021, 38(9): 81-86.
- [16] 杨盼盼, 曹丙花, 范孟豹, 等. 脉冲涡流厚度检测仿真与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(6): 821-825.
- YANG P P, CAO B H, FAN M B, et al. Simulation and experimental investigation of thickness measurement using pulsed eddy current technique [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(6): 821-825.
- [17] 田亚团, 向安, 来园凯. 基于脉冲涡流晚期信号斜率的不锈钢壁厚测量[J]. *无损检测*, 2022, 44(3): 18-21, 31.
- TIAN Y T, XIANG AN, LAI Y K. Wall thickness detection of stainless steel based on pulse eddy current late signal slope [J]. *Nondestructive Testing*, 2022, 44(3): 18-21, 31.
- [18] 赵莹, 解社娟, 田明明, 等. 已知深度范围缺陷的选频带脉冲涡流检测方法[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(6): 639-644.
- ZHAO Y, XIE SH J, TIAN M M, et al. Frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for detection of defects under a certain depth range [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(6): 639-644.
- [19] 杨冉, 翟国富, 徐博, 等. 基于脉冲涡流技术的柔性平面差分探头设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2022 (10): 1-5.
- YANG R, ZHAI G F, XU B, et al. Design of flexible planar differential probe based on pulsed eddy current technology [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022 (10): 1-5.
- [20] 原鹏, 孙全德, 王恪典, 等. 大提离下脉冲涡流对铁磁性材料测厚研究[J]. *中国测试*, 2021, 47(4): 14-18, 61.

YUAN P, SUN Q D, WANG K D, et al. Research on thickness measurement of ferromagnetic materials with pulsed eddy current under large lift [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(4): 14-18, 61.

作者简介



李佳东, 2022 年于太原理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为先进无损检测技术。

E-mail: 2023520057@link.tyut.edu.cn

Li Jiadong received his B. Sc. Degree from Taiyuan University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes advanced non-

destructive testing technology.



张彦杰(通信作者), 2016 年于太原科技大学获得硕士学位, 2020 年于北京科技大学获得博士学位, 现为太原理工大学助理研究员, 主要研究方向为先进无损检测技术。

E-mail: zhangyanjie@tyut.edu.cn

Zhang Yanjie (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Taiyuan University of Science and Technology in 2016 and received his Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2020. Now he is a research associate at Taiyuan University of Technology. His main research interest includes advanced non-destructive testing technology.