

带包覆层管道脉冲涡流壁厚定量检测研究*

李朝阳¹, 赖圣², 汤陈怀³, 付跃文¹, 师文¹, 黄文丰¹, 曹爱松³

(1.南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌, 330063)

(2.宁波市特种设备检验研究院 宁波, 315048)

(3.上海市特种设备监督检验技术研究院 上海, 200062)

摘要 为了研究脉冲涡流检测技术量化带包覆层管道壁厚并评估管道寿命的效果,首先,针对不同类型探头的涡流场动态特性和接收信号的变化特征,分析比较不同探头在壁厚定量方面的差异,研究提高高度和管径变化对于壁厚定量的影响;其次,为了减小噪声对定量的干扰,探索了实际带噪信号情况下的算法设计;最后,针对不同壁厚管道和不同提高距离,进行了圆柱形探头在径向摆放、横向摆放和纵向摆放3种情况下的仿真和试验研究。结果表明:探头纵向放置方式信号衰减慢,纵向聚焦特性好,且不易受提高高度和管道直径的影响,能够对环向小范围内的整个管道圆周的壁厚进行有效定量,在壁厚定量方面具有更高的灵敏度;横向探头在周向方向上聚焦特性较好,在面积型腐蚀的壁厚定量方面不具有优势;对于壁厚定量时噪声的干扰,基于信号特征计算自适应噪声限的方法可在定量计算中抑制噪声的影响。

关键词 脉冲涡流检测;管道壁厚;有限元仿真;噪声抑制

中图分类号 TG115;TH878

引言

工业领域上的输油输气管道常常工作在高温高压或腐蚀性气体液体等恶劣的条件下,在长期使用过程中,管道内壁和外壁容易发生大面积腐蚀或壁厚减薄的情况。为保障管道的使用安全,需要对管道进行定期检测。在役管道大部分使用包覆层进行保护和隔热,这增加了不拆除包覆层情况下的检测难度^[1-3]。脉冲涡流检测(pulsed eddy current testing,简称PECT)使用的是方波激励信号,含有一系列的频率成分,其中低频成分可以有效克服趋肤效应的影响,能够检测更深的缺陷,也能穿透包覆层对管道进行在役检测^[4]。PECT通常应用于对缺陷的识别研究中,通过对比有无缺陷的信号特征识别缺陷,通过改变探头形状或者规格提高探头性能^[5-8]。与识别缺陷不同的是,对壁厚进行定量研究需要通过信号的特征反演管道信息,包括管道厚度、管道电导率及磁导率等,这些实施起来更为困难。由于量化剩余壁厚是对结构件预期寿命的重要评估方法^[9],因此受到了很多研究者的重视。

利用PECT对壁厚的定量研究主要从理论、仿

真与试验相结合的角度出发。Huang等^[10]基于电路理论建立多线圈耦合模型,拟合接收线圈响应信号衰减曲线并进行简化,其信号数学特征为指数项累加。Ulapane等^[11]基于电路理论模型建立接收线圈的电压衰减信号与厚度二次方的关系,并试验验证了这种量化剩余壁厚的方法与实际值吻合程度较好,但其仅针对没有包覆层检测的情况。文献[12-14]讨论了不同提高高度(探头距离管道的高度)下对壁厚的定量分析,所用的探头模型均为圆柱形探头径向放置模型(Pancake探头),这种探头在面对复杂的检测情况时性能不足。Han等^[15]针对Pancake探头的分析表明,该探头的聚焦性能在大提高下表现欠佳。Yu等^[8]研究认为,圆柱形探头的结构在管道上的感应涡流为圆周走向,中间为不存在涡流的检测盲区,且随着提高高度的增加,涡流扩散明显,不利于检测局部缺陷。

目前,对管道的定量研究存在以下问题:①Pancake探头所形成的涡流场具有中间弱的特点,不利于检测局部缺陷,而其他主要用于聚焦类型的探头缺乏定量特征的研究;②检测信号存在仪器本身噪声和环境噪声的干扰,也会对厚度定量时所提取的

* 国家自然科学基金资助项目(52067016)

收稿日期:2023-07-06;修回日期:2023-10-20

特征造成干扰。因此,需要改进建立在理想化模型基础上的特征提取方法,以便抑制噪声,提升噪声背景下的定量精度。

笔者基于已有的3种探头模型^[16],对3种探头在量化管道壁厚方面进行了研究。首先,利用仿真软件研究3种类型探头在不同提高高度下管道的涡流分布及其动态变化情况,计算涡流场有效覆盖范围来描述不同探头的涡流场特性;其次,通过仿真计算了纵向探头在不同提高高度和不同管道内径的信号特征,并将仿真结果与试验结果进行了比较;最后,提出一种分析噪声的方法,并基于信号特征计算自适应噪声限,以抑制噪声干扰,增加管道壁厚定量的准确性。

1 信号特征提取方法

1.1 PECT信号特征

带包覆层管道检测的脉冲涡流激励信号为矩形脉冲,在激励线圈电压下降沿时刻,采集接收线圈的电压,该电压被称为脉冲涡流响应信号。图1为PECT响应信号示意图。

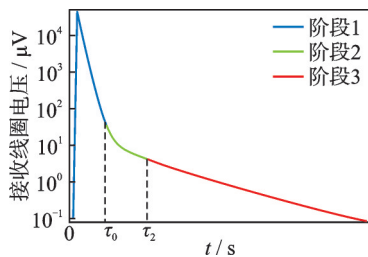


图1 PECT响应信号示意图

Fig.1 Schematic of PECT signal response characteristics

接收线圈的感应电压可以分为3个阶段^[16]。其中:第1阶段($0 \sim \tau_0$)与第2阶段($\tau_0 \sim \tau_1$)的信号主要取决于探头的特性,此时的信号来自于激励线圈电压瞬时关断后感应到的超强电压,在极短时间内感应线圈电压急剧升高,然后又随时间指数级下降,信号主要取决于激励线圈的电阻和电感;第3阶段属于长时衰减段($t > \tau_1$),此时接收线圈的感应电压下降的速率逐渐趋于平缓,试件上感应涡流的范围向四周扩散,感应涡流密度逐渐衰减。

第1阶段和第2阶段受被测试件的参数影响较小,很难反映出被测试件的信息,一般定量分析壁厚时不采用该时间段的信号;第3阶段包含着被测试件的信息,其信号的幅值与提高高度成正比,信号的衰减速率与磁导率、电导率和厚度的平方成反比^[17]。

1.2 特征提取方法

将第3阶段的信号特征提取出来,即用数学方法建立信号衰减率与厚度的关系,从而对厚度进行定量研究。文献[11]给出了信号响应的斜率与厚度的关系。由于本研究分析响应信号采用的是semi-log坐标轴分析(y轴对数显示),所以首先对电压值取对数,数据的对数处理统一采用以10为底,即

$$\lg[V(t)] = \lg \left[b_1 e^{-\left(\frac{-\pi^2 t}{\mu \sigma d^2}\right)} + \sum_{i=2}^{\infty} b_i e^{-c_i t} \right] \quad (1)$$

其中: b_i, c_i 为拟合系数, i 表示不同的拟合项, $b_i, c_i \in \mathcal{R}, c_i > 0$,对所有 i 都成立; μ 为试件磁导率; σ 为电导率; d 为厚度; e 为自然常数。

当信号处于第3阶段,即 $t > \tau_1$ 时,累加项可以略去^[11],此时

$$\lg[V(t)]|_{t > \tau_1} \approx \lg b_1 - \frac{\pi^2 t}{\mu \sigma d^2} \lg e \quad (2)$$

对时间求导,即

$$\left. \frac{d \lg[V(t)]}{dt} \right|_{t > \tau_1} \approx -\frac{\pi^2}{\mu \sigma d^2} \lg e \quad (3)$$

设一个表达式 $\beta(t)$ 为式(3)的倒数,即

$$\beta(t)|_{t > \tau_1} = \left| \frac{dt}{d \lg[V(t)]} \right|_{t > \tau_1} \approx \frac{\mu \sigma d^2}{\pi^2 \lg e} \quad (4)$$

对于同一种被测试件的不同部位,可以认为 μ, σ 为不变的常量,此时有

$$d^2 \propto \beta(t)|_{t > \tau_1} \quad (5)$$

经过推论可知, d^2 与信号特征 β 成正比关系,但在建立数学模型的过程中,第3阶段信号略去了部分小项, d^2 与 β 最终的拟合曲线不一定会经过原点,可能会有一个小的常数项。

1.3 噪声限的计算与应用

在实际试验中,信号特征的使用效果与理论及仿真结果相比不够理想。在第3阶段的后期,受制于仪器精度和其他因素的影响,信号会受到噪声的很大干扰。

分别取管道壁厚较厚、较薄区域的检测数据及探头在空气中的数据,得到PECT仿真信号与试验信号的对比示意图,如图2所示。由图可以看出:仿真中的信号比较平稳,但试验信号在低于某个电压值时就进入了噪声区间;对于较薄的壁厚,噪声在较高的电压值时就会出现较大的幅值,并对信号造成较大干扰。

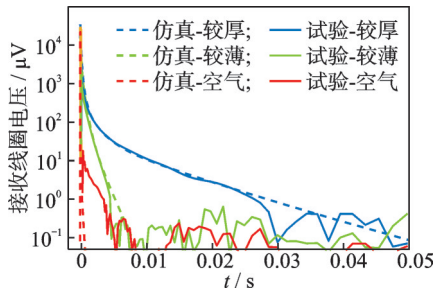


图 2 PECT 仿真信号与试验信号的对比示意图

Fig.2 Comparison between PECT simulation signal and experiment signal

为了抑制噪声的影响,改善结果的准确性,本研究提出一种自适应噪声限的计算方法,用于找出噪声开始急剧增加的起点,以便在计算壁厚时避开噪声剧烈的区间。

对从接收线圈接收的检测信号进行分段处理,将每个检测点的检测信号分成若干个片段(每个片段称为 1 个时窗)^[18]。第 i 个测点得到的电压矢量为

$$V_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{i(N-1)} \ v_{iN}] \quad (6)$$

其中: N 为每个测点的时窗总数; v_{ij} 为第 i 个测点的第 j 个时窗的平均电压值。

假设有 M 个测点,则 M 个测点的电压矢量可以合成为矩阵 W ,即

$$W = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1(N-1)} & v_{1N} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2(N-1)} & v_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ v_{M1} & v_{M2} & \dots & v_{M(N-1)} & v_{MN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对每一个时窗取所有测点的最大值,即

$$V_{\max} = W_{\max} = [v_{\max 1} \ v_{\max 2} \ \dots \ v_{\max(N-1)} \ v_{\max N}] \quad (8)$$

对电压值取以 10 为底的对数,即

$$\lg V_{\max} = \lg [v_{\max 1} \ v_{\max 2} \ \dots \ v_{\max(N-1)} \ v_{\max N}] \quad (9)$$

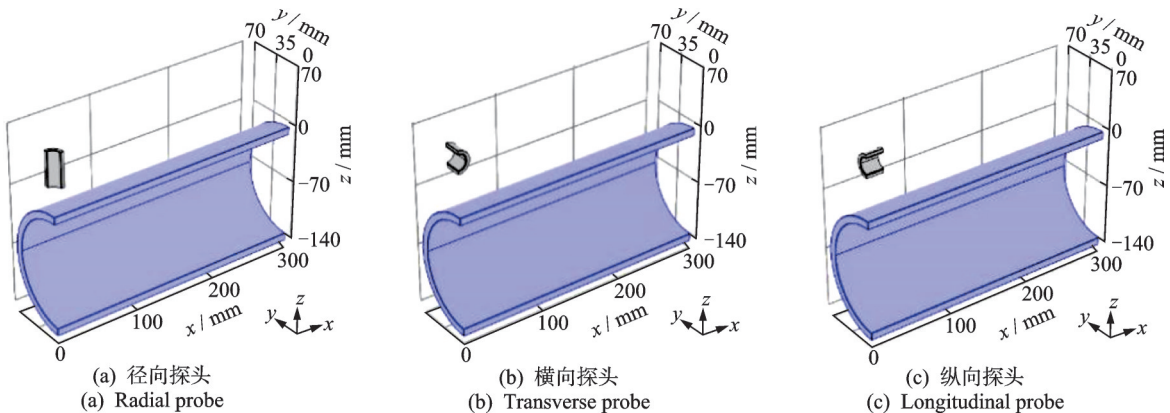


图 4 仿真模型的建立

Fig.4 Establishment of simulation model

采取指数函数对 $\lg V_{\max}$ 进行拟合,即

$$f(t) = a \exp(bt) \quad (10)$$

根据经验公式,自适应噪声限 NL 设定为

$$NL = \frac{2}{3} 10^{f(t)/2} \quad (11)$$

图 3 为噪声限选取示意图。其中,在噪声限上面的感应电压为可用于提取特征量的信号,噪声限下面是噪声剧烈区信号,计算时舍去。噪声限会随着响应信号的不同而自适应调节,当提高高度或者管道直径变化时,仍可以避开噪声剧烈区且最大化保留可用数据。

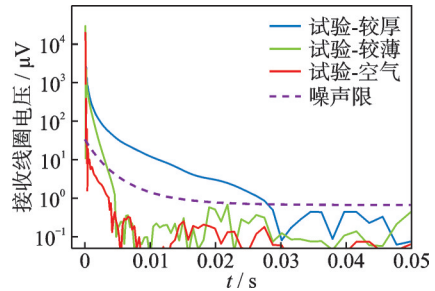


图 3 噪声限选取示意图

Fig.3 Schematic of noise limit selection

2 仿真建模及分析

2.1 模型的建立

使用有限元仿真软件建立径向探头、横向探头和纵向探头 3 种朝向的 1/4 模型,如图 4 所示。

探头的接收线圈与激励线圈采用同轴放置,长度为 40 mm。接收线圈内径为 18 mm,外径为 20 mm,仿真设置线径为 0.14 mm,共 933 圈;激励线圈内径为 20 mm,外径为 26 mm,仿真设置线径为 0.4 mm,共 768 圈。探头采用与试验相同的 0.65 A 电流 4 Hz 双极性方波激励,设置管道相对磁导率为

175,电导率为4.46 MS/m。在不影响最终结果的条件下为简化计算量,将管道长度设置为600 mm,管道内径为124 mm,外径分别为127、128、130、132、134、136和140 mm,共计7种厚度。提高高度设置为10~80 mm。

2.2 模型计算结果

轴向切面涡流密度分布如图5所示。其中:提高高度为50 mm;时间为信号第3阶段的0.02 s时刻。由图可知:对于径向探头,在其正下方中心位置涡流很弱,中间存在盲区,其最强涡流位置在x为50 mm附近,且涡流在x轴扩散较宽,导致能量比较分散,最大涡流密度相对于另外2个探头不高;横向探头和纵向探头在轴向切面上的聚焦特性有明显改善,能量更为集中;在轴线方向上,能量最为集中的是纵向探头。

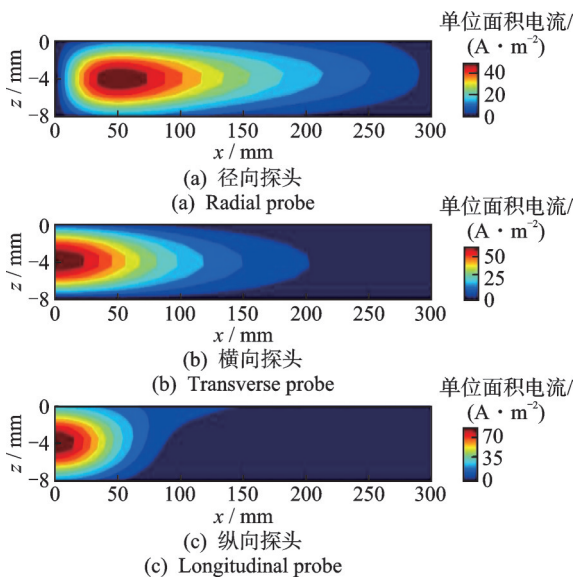


图5 轴向切面涡流密度分布

Fig.5 Results of eddy current density distribution in axial

为了量化聚焦性能,本研究提出了在仿真中计算探头有效覆盖区域的方法,以涡流密度大于最大涡流密度的30%^[19]作为轴向有效覆盖区域,用于评价涡流的轴向聚焦特性。有效覆盖区域小表明在检测过程中可得到更高的空间分辨率。不同提高高度下的有效覆盖区域如图6所示。由图可知,纵向摆放探头的有效覆盖区域在任何提高情况下都小于另外2种探头,且横向摆放探头有效覆盖区域小于径向摆放。3种探头在x轴的聚焦特性优劣顺序依次为:纵向摆放、横向摆放、径向摆放。

径向截面涡流密度分布如图7所示。其中:提高高度为50 mm;时间为0.02 s时刻。由图可知:径

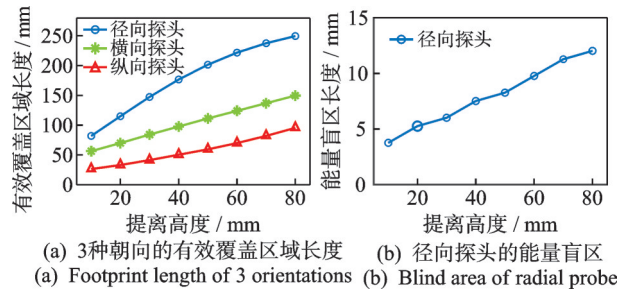


图6 不同提高高度下的有效覆盖区域

Fig.6 Effective coverage area in different lift-offs

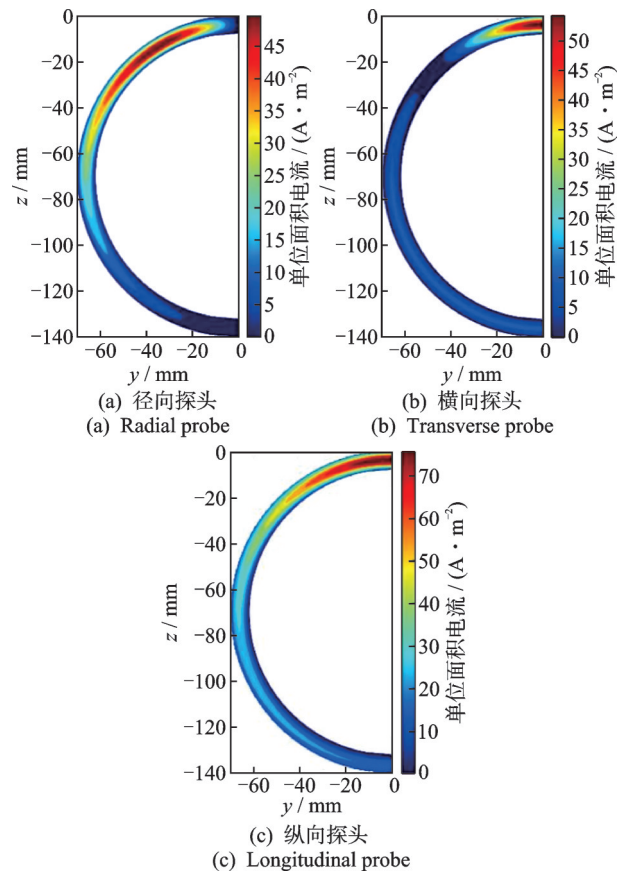


图7 径向截面涡流密度分布

Fig.7 Results of eddy current density distribution in radial section

向探头和纵向探头的涡流在周向方向上扩散较多;横向探头涡流场在周向方向的电流比较集中,这是因为磁场方向为径向,涡流方向为轴向,周向没有涡流回路,所以周向方向的能量较为集中。

相关研究表明,纵向探头的涡流中绕管道周向流动的涡流占了很大比例^[16]。基于这一现象,将纵向探头置于管道一侧,通过周向流动的涡流即可检测整个圆周的壁厚,包括不可接近的一侧和较小的局部减薄的场合。

对于径向探头,其中间存在盲区且聚焦性不强,不利于检测局部小缺陷;对于面积远大于盲区的面积型壁厚减薄而言,中间的盲区没有太大影响。

对于横向探头,其信号衰减显著快于其他 2 种探头。3 个探头信号的比较如图 8 所示。由图可知:纵向探头的信号衰减较慢,说明涡流存在的时间更长;横向探头信号很快变弱,这是由于涡流经过的导体电阻大于另外 2 种探头,因此涡流衰减更快。

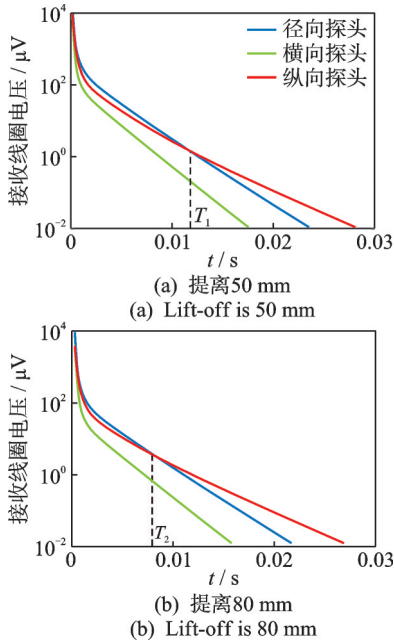


图 8 3 个探头信号的比较

Fig.8 Comparison of response signals of 3 probes

提高高度为 50 mm 时,不同壁厚的 PECT 信号仿真结果如图 9 所示。图 9(a)为 3 种探头在不同厚度的后期信号衰减速率,其值越大则衰减越快。当

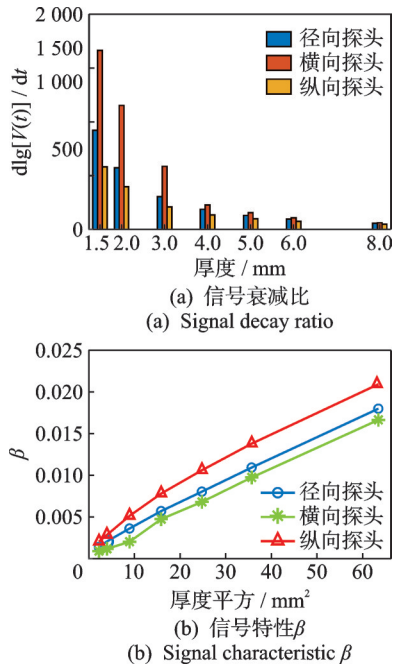


图 9 不同壁厚的 PECT 信号仿真结果

Fig.9 Simulation result of PECT signal response with different pipe thickness

管道厚度增加时,其衰减速度降低,这是因为更厚的壁厚降低了电阻,使涡流可以在管道内存在更久。对任意一个厚度,纵向探头都有更小的衰减速度。

图 9(b)采用 2.2 节的信号提取方法提取特征信号 β ,结果表明,在仿真模型中,对于 3 种探头都可以较好地提取信号用于表征厚度。

不同提高条件下 PECT 信号的仿真结果如图 10 所示。图 10(a)为纵向探头在不同提高高度下管道壁厚为 8 mm 的信号响应,当提高高度升高时,其响应信号幅值下降较显著,但其后期信号基本保持平行状态。对不同提高高度的响应信号提取特征量 β ,得到厚度平方与 β 的关系,如图 10(b)所示,可见提高高度变化对管道量化结果的影响不大。

对不同提高高度的特征信号进行线性拟合,即

$$\beta = ad^2 + b \quad (12)$$

其中: d 为管道厚度; $a, b \in \mathcal{R}$ 。

拟合结果为 $a \approx 2.5 \times 10^{-4}, b \approx 8 \times 10^{-4}$ 。提高高度变化时,拟合斜率 a 变化较小。这说明该方法受提高信号的影响较小,对不同的提高高度,其拟合曲线基本保持不变。

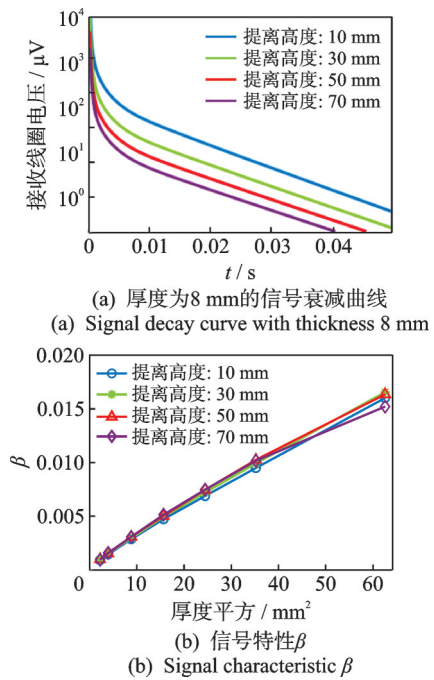


图 10 不同提高条件下 PECT 信号的仿真结果

Fig.10 Simulation result of PECT signal response with different lift-off

提高高度为 50 mm 时,仿真研究了不同管道直径对于壁厚定量的影响。不同内径的 PECT 信号仿真结果如图 11 所示。由图 11(a)可以看出,随着内径的增大,其后期信号幅值略有降低。图 11(b)为厚度平方与响应信号特征量 β 的关系,按照式(12)

进行拟合,这3个内径的拟合曲线结果为 $a \approx 2.5 \times 10^{-4}$, $b \approx 1.2 \times 10^{-3}$,与上述不同提高高度的拟合曲线近似。这说明此方法对不同管道直径,其拟合曲线基本保持不变。

在仿真研究中,纵向探头可以应对不同提高高度和不同管道直径的厚度定量,从信号响应提取特征信号 β ,对式(12)进行变形,得到反演壁厚信息的公式为

$$d = \sqrt{(\beta - b)/a} \quad (13)$$

其中 a, b 可以近似取值 2.5×10^{-4} 和 1×10^{-3} ,当厚度较厚时,其结果主要受 a 的影响。

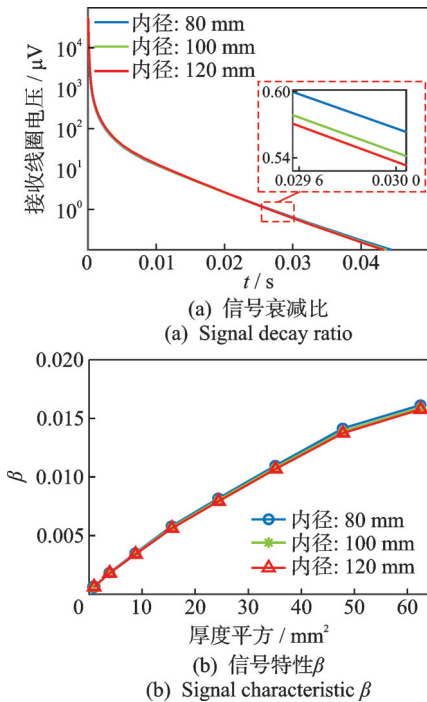


图11 不同内径的PECT信号仿真结果
Fig.11 Simulation PECT signal response with different pipe inner diameter

3 试验与仿真结果比较

3.1 试验平台

试验平台如图12所示,由激励信号发生器、信号接收器、计算机、管道试件和探头组成。激励设备可发射频率为0.0625~32 Hz的等宽双极性方波脉冲激励,最大电流为10 A。设备的16位采集和处理单元可以测量微弱电磁信号。

实际管道试件尺寸如图13所示。管道内径为124 mm,厚度分别为8、6、5、4、3、2和1.5 mm。测试过程中将探头放到每种厚度的中心位置分别测试,

沿着管道圆周等间隔共选取5个测点,每个测点采集5次数据,最终将25组数据进行平均,得到当前厚度的测试结果。

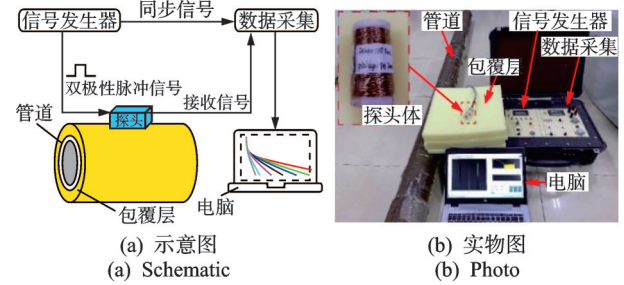


图12 试验平台

Fig.12 Experiment platform

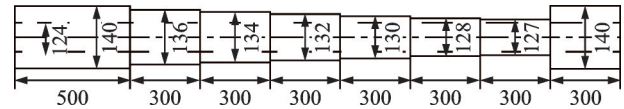


图13 实际管道试件尺寸(单位:mm)

Fig.13 Actual dimensions of pipe specimens (unit:mm)

3.2 试验结果

本研究进行了提高高度为10~70 mm的试验,并将其与仿真数据进行比较。提高高度为10 mm时,纵向探头仿真和试验结果的比较如图14所示。可以发现,试验信号与仿真信号吻合较好。为减少试验噪声的影响,引入噪声限以便在信号进入噪声之前提取信号。

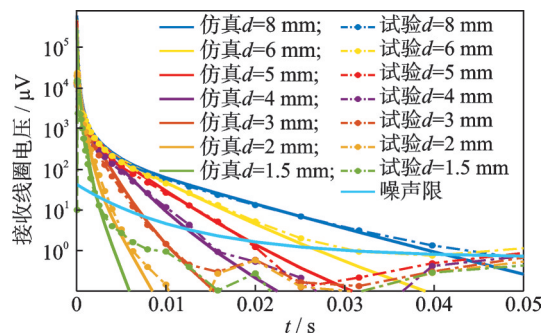


图14 纵向探头仿真和试验结果的比较

Fig.14 Comparison of simulation and experimental with longitudinal probe

纵向探头试验提取特征量 β 并和曲线进行拟合,结果如图15所示。由图可知:在低提高情况下,纵向探头可以较为准确地量化壁厚;当提高增高时,由于试验存在各种噪声,其误差会增大;在高提高下,相对于径向探头和横向探头,纵向探头对厚度的灵敏度仍优于另外2种摆放方式的探头。

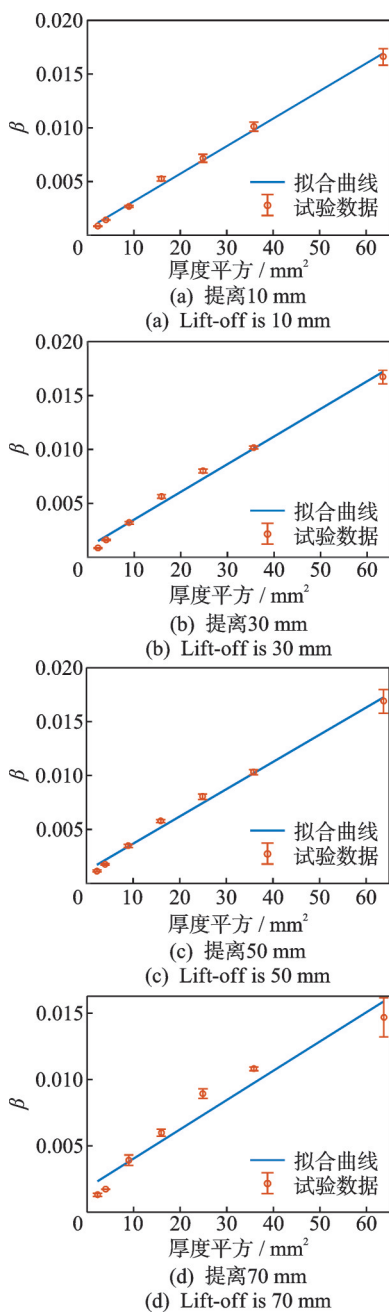


图 15 纵向探头试验结果

Fig.15 Experiment result with the longitudinal probe

提高高度为 70 mm 时,径向探头和横向探头特征量与厚度平方的拟合结果如图 16 所示。

3 种探头拟合曲线的斜率如图 17 所示。由图可知:3 种探头随着提高高度的增加,拟合曲线斜率整体均有降低;在低提高下(10~40 mm),径向探头灵敏度与纵向探头灵敏度接近,均高于横向探头;在高提高下,纵向探头灵敏度比径向探头和横向探头都低;在任何提高高度下,横向探头对厚度变化的灵敏度都没有径向探头和纵向探头高;当提高高度进一步增加,3 种探头的性能均会受到影响,需要采用更加复杂的探头以提高灵敏度。

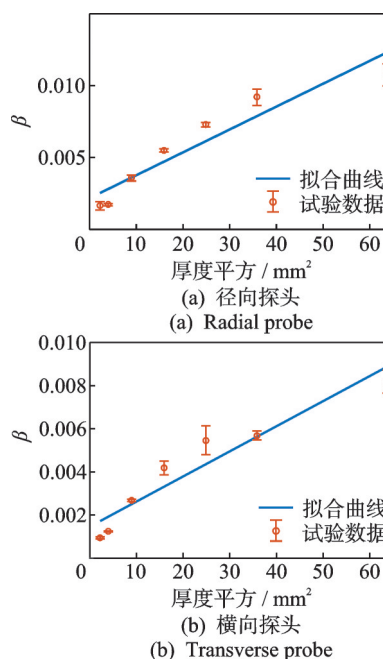


图 16 径向探头和横向探头特征量与厚度平方的拟合结果

Fig.16 Fitting results of characteristic parameters of radial probes and transverse probes versus the square of thickness

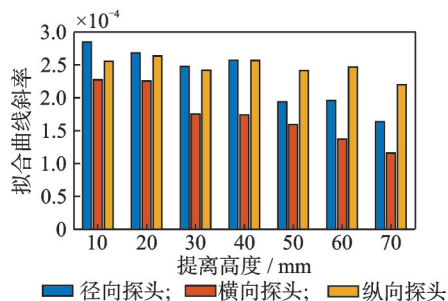


图 17 3 种探头拟合曲线的斜率

Fig.17 Slope of the fitting curve with 3 probes

4 结 论

1) 通过建立数值仿真模型,对涡流场的特性进行分析,对其有效覆盖区域进行了计算。在管道轴向切面上,计算了探头 3 种摆放方式的轴向有效覆盖区域。结果表明,纵向摆放的探头有效覆盖区域在轴向方向最小,其轴向聚焦性能优于另外 2 种探头。在管道径向切面上,纵向探头电流覆盖整个圆周,使其在管道一侧即可检测整个圆周,但其周向聚焦特性不如另外 2 种探头。横向探头的周向聚焦性能比其他 2 种探头好,但其轴向聚焦特性比纵向探头差。径向探头的轴向聚焦特性在三者中最差,但周向聚焦特性则优于纵向探头,且径向探头中间有能量盲区。

2) 仿真分析了 3 种摆放朝向的探头响应信号,

并对比其衰减速率和厚度检测灵敏度。研究结果表明,纵向探头的信号衰减速率最慢,对厚度检测灵敏度最高,且提高高度和管道直径的变化不会影响定量特性。横向探头在周向方向上聚焦特性较好,但信号衰减快,受噪声影响大,在面积型腐蚀的壁厚定量方面不具有优势。

3) 高提高下信号幅值较低,容易被噪声干扰。根据噪声特点,提出了基于信号特征计算自适应噪声限的方法,在定量计算中可以抑制噪声的影响。

参 考 文 献

- [1] AMER A, CUNNINGHAM V, ALSHEHRI A, et al. Inspection challenges for detecting corrosion under insulation (CUI) in the oil and gas industry[C] // Proceedings of the 17th Middle East Corrosion Conference and Exhibition. Bahrain: International NACE, 2021: 30.
- [2] CAO Q, POJTANABUNTOENG T, ESMAILY M, et al. A review of corrosion under insulation: a critical issue in the oil and gas industry[J]. Journal of Sensors, 2021(4): 1-16.
- [3] WU R K, ZHANG H, YANG R Z, et al. Nondestructive testing for corrosion evaluation of metal under coating[J]. Journal of Sensors, 2021(1): 6640406.
- [4] SOPHIAN A, TIAN G, FAN M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: a review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.
- [5] XIE L, GAO B, TIAN G Y, et al. Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT[J]. Sensors and Actuators: Physical, 2019, 293: 189-199.
- [6] YANG F, LI Z Y, FU Y W, et al. Comparison of different types of focusing probes in pulsed eddy current testing[J]. AIP Advances, 2022, 12(7): 075010.
- [7] XIE S J, TIAN M M, CHEN H E, et al. Evaluation of wall thinning defect in magnetic material based on PECT method under magnetic saturation[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55(suppl): 49-59.
- [8] YU Z H, YANG F, FU Y W, et al. Investigation of focusing properties of probes for pulsed eddy current testing[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26830-26838.
- [9] ULAPANE N, NGUYEN L. Review of pulsed-eddy-current signal feature-extraction methods for conductive ferromagnetic material-thickness quantification[J]. Electronics, 2019, 8(5): 470.
- [10] HUANG C, WU X J, XU Z Y, et al. Ferromagnetic material pulsed eddy current testing signal modeling by equivalent multiple-coil-coupling approach[J]. NDT & E International, 2011, 44: 163-168.
- [11] ULAPANE N, ALEMPIJEVIC A, VALLS MIRO J, et al. Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using pulsed eddy current sensor detector coil voltage decay rate[J]. NDT & E International, 2018, 100: 108-114.
- [12] NAFIAH F, TOKHI M O, MAJIDNIA S, et al. Pulsed eddy current: feature extraction enabling In-Situ calibration and improved estimation for ferromagnetic application [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(3): 52.
- [13] XINGLE C, RONGRONG X. A pulsed eddy current testing method for relative thickness of ferromagnetic components considering local hysteresis characteristics [J]. NDT & E International, 2021, 124: 102541.
- [14] ZHANG Q, WU X. Wall thinning assessment for ferromagnetic plate with pulsed eddy current testing using analytical solution decoupling method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(10): 4356.
- [15] HAN Y, TAO Y C, SHAO C B, et al. Pulsed eddy currents in ferromagnetic pipes with cladding in nuclear power plants [J]. Energy Reports, 2022, 8(suppl7): 104-111.
- [16] FU Y, UNDERHILL P R, KRAUSE T W. Factors affecting spatial resolution in pulsed eddy current inspection of pipe[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 34.
- [17] CHENG W Y. Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation and cladding [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(3): 215-224.
- [18] YU Z H, FU Y W, JIANG L F, et al. Detection of circumferential cracks in heat exchanger tubes using pulsed eddy current testing[J]. NDT & E International, 2021, 121: 102444.
- [19] CHENG W Y, KOMURA I. Pulsed eddy current testing of a carbon steel pipe's wall-thinning[C] // Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. Seattle, DC, USA: [s.n.], 2012: 22-24.



第一作者简介:李朝阳,男,1999年11月生,硕士生。主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: zhaoyang3048@foxmail.com

通信作者简介:付跃文,男,1967年1月生,博士、教授、硕士生导师。主要研究方向为电磁无损检测与信号处理。

E-mail: fuyuewen@126.com