

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407615

电磁脉冲涡流检测下金属管道缺陷检测研究*

杨超¹ 孙虎² 唐超¹

(1. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 2. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500)

摘要:电磁脉冲涡流检测技术因其瞬态响应信号具有丰富的时域特征而广泛地用于金属管道缺陷检测中,然而脉冲电磁场在空间中快速衰减现象导致瞬态响应信号易受噪声干扰。为提高脉冲涡流检测中瞬态响应信号的信噪比并实现管道缺陷检测,此处优化了检测线圈参数并给出了一种金属管道壁厚腐蚀缺陷检测方法。首先,通过有限元仿真软件分析了激励线圈对瞬态响应信号的影响,优化了激励线圈参数;然后研究了优化前后检测线圈对金属管道缺陷的检测效果,优化后检测信号的幅度提高了4~5倍,分析了瞬态响应信号缺陷检测灵敏度与检测信号时间的关系,并给出了缺陷检测方法;最后,通过搭建的脉冲涡流金属管道缺陷检测实验平台,在具有环状缺陷的金属管道上进行了缺陷检测方法验证。实验结果表明,该方法得到的缺陷检测曲线在瞬态响应信号较前时刻具有良好的信噪比和缺陷识别灵敏度,可用于金属管道整体壁厚变薄情况评估。

关键词:脉冲涡流;金属管道;缺陷检测;瞬态响应;有限元仿真

中图分类号: TH878; TN06

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4030

Research on metal pipe defect detection based on electromagnetic pulsed eddy current testing

Yang Chao¹ Sun Hu² Tang Chao¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Electromagnetic pulse eddy current detection technology is widely used in metal pipeline defect detection because its transient response signal has rich time domain characteristics. However, the rapid attenuation phenomenon of pulse electromagnetic field in space makes the transient response signal susceptible to noise interference. In order to improve the signal-to-noise ratio of the transient response signal in pulsed eddy current testing and realize the pipeline defect detection, this paper optimizes the parameters of the detection coil and proposes a method for metal pipeline wall thickness corrosion defect detection. Firstly, the influence of excitation coil on transient response signal was analyzed by finite element simulation software, and the parameters of excitation coil were optimized. Then, the detection effect of the detection coil on metal pipe defects before and after optimization was studied, the amplitude of the detection signal is increased by 4 to 5 times after optimization. The relationship between the defect detection sensitivity of the transient response signal and the detection signal time was also analyzed, and the defect detection method was given. Finally, through the established pulse eddy current metal pipeline defect detection experimental platform, the defect detection method was verified on the metal pipeline with annular defects. The experimental results show that the defect detection curve obtained by the proposed method has preferable signal-to-noise ratio and defect detection sensitivity at the previous time of the transient response signal, and can be used to evaluate the wall thickness thinning of metal pipes.

Keywords: pulsed eddy current; metal pipes; defects inspection; transient response; finite element simulation

收稿日期: 2024-06-24 Received Date: 2024-06-24

* 基金项目: 国家自然科学基金(62303385)、南充市-西南石油大学市校科技战略合作专项资金(23XNSYSX0012)、四川省区域创新合作项目(2024YFHZ0104)资助

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,我国大部分油气田在本世纪已进入开采的中后期,大量油气管道经常年的高温、高压和电化学腐蚀,已经出现一定程度上的老化,进而出现管道的管壁变薄、穿孔等现象,从而引起管体变形和扭曲,并最终导致油气井的关闭或停产。

为降低由金属管道管壁变薄或穿孔引起的油气事故风险,对在役油气管道进行定期的检测和评分十分必要。在金属管道的缺陷评估检测中,无损检测手段因其不破坏被检测对象,操作简单等优点而得以广泛应用。当前管道缺陷检测领域常用的无损检测技术主要包括超声检测、漏磁检测、射线检测和电磁涡流检测。其中,超声检测因具有较高的缺陷检测精度而在金属管道的腐蚀缺陷检测与评估中得以大量的应用^[1],然而超声检测过程中需要耦合剂,且被测对象的表面平整度对超声检测效果具有明显的影响。漏磁检测技术因具有较快的检测速度和较好的检测灵敏度亦被广泛地应用于铁磁性管道缺陷检测^[2],然而漏磁检测中须对被检测材料进行磁化,因此检测效果易受检测材料的铁磁特性影响。射线检测技术在金属裂纹、腐蚀缺陷的检测中表现出了较高的检测精度、灵敏度^[3],然而射线检测易对人体产生一定程度的损害。

电磁涡流检测技术因其操作简单、无需耦合剂、无需接触被检测试件、对人体无害且对管道内外表面缺陷具有较好的检测灵敏度等优点从20世纪60年代便逐渐应用于管道的缺陷检测^[4]。其中远场涡流检测技术利用涡流信号将在近场区和远场区两次穿透管壁的现象对管壁内外表面缺陷进行检测^[5-7],但远场涡流检测信号频谱较窄,难以分辨内外表面缺陷,且受限于检测原理,检测信号内存在伪峰,需做相应的伪峰处理^[6]。脉冲涡流检测技术因其检测信号具有较为丰富的时域和频域信息因而逐渐在金属管道缺陷检测领域引起研究人员的关注^[8-20]。陈兴乐等^[8]研究了铁磁性套管外非轴对称线圈的瞬态响应解析解,并分析了线圈不同放置方式下管壁内感应涡流的分布和扩散规律。付跃文等^[9]研究了金属管道内中心轴线垂直于管道轴线的线圈脉冲涡流检测灵敏度,并得出了检测线圈对与平行缺陷的检测灵敏度高于与其垂直的缺陷检测灵敏度结论。为克服传统远场涡流的缺陷,徐志远等^[10]研究了基于脉冲涡流的缺陷检测方法,该方法将激励线圈和接收线圈均放于金属管道外侧,并给出了管壁外表面缺陷和脉冲涡流响应信号过零时间成正比的结论。余兆虎等^[11]研究了小管径脉冲涡流检测中差分线圈的检测效果,检测结果表明差分线圈可以有有效的抑制伪峰信号并对裂纹和通孔具有良好的检

测灵敏度。宋韵等^[12]针对传统脉冲涡流检测线圈对非铁磁性管道检测效果不佳的问题,提出了一种跑道型线圈,该线圈提高了小管经不锈钢壁厚的检测灵敏度。陈涛等^[13]提出使用脉冲涡流和电磁超声复合检测的方式对压力管道进行检测,并得到了较好的检测结果。张超等^[14]使用脉冲涡流对双层铁磁性套管进行了检测,并使用脉冲涡流响应信号的负峰值评估了管道的壁厚变化。然后张超等^[15]又研究了一种具有屏蔽结构的远场脉冲涡流检测方法,该方法有效地提高了多层管道缺陷的检测效果。刘正帅等^[16]基于脉冲调制激励信号并结合一种漏斗形探头提高了内外表面缺陷的检测灵敏度。李超月等^[17]分析了脉冲涡流检测方法在不同金属保护层下的检测效果,检测结果表明金属保护层越厚,检测效果受到的影响越大。姚文胜等^[18]使用脉冲涡流研究了具有不导电、不导磁包覆层的铁磁性材料腐蚀缺陷,并得到了较好的检测结果。张玉彬等^[19]基于脉冲感应电涡流于材料内产生的热效应实现了带涂层的亚表面缺陷检测。Faurschou等^[20]使用瞬态响应的衰减曲线对金属材料的厚度变化进行了检测,并指出衰减曲线可有效区分不同厚度的缺陷。

文献[20]提出的脉冲涡流检测衰减曲线可以有有效的区分不同厚度的缺陷,但采用电压源作为激励信号的检测方式产生的感应涡流密度较小,在实际检测中涡流响应信号易受噪声影响。为提高脉冲涡流检测中瞬态响应信号的信噪比,此处对线圈参数进行了优化,并给出了金属管道壁厚变薄缺陷检测方法。首先,使用有限元仿真软件分析了激励线圈内激励电流与线圈参数的关系,并对线圈参数进行优化以提升金属管道内感应涡流的密度。然后在有限元仿真软件中对优化前后的检测线圈进行管道环状缺陷检测实验。仿真实验和实测实验结果表明,本文提出的缺陷检测方法可以检测管道整体壁厚腐蚀缺陷,且检测信号具有良好的信噪比。

1 脉冲涡流管道缺陷检测原理

使用脉冲涡流进行管道缺陷检测的示意图如图1所示。由麦克斯韦方程组可知,变化的电场将产生变化的磁场,因此当向激励线圈两端施加一个变化的电流时,激励线圈将在空间中产生一个变化的磁场。而由麦克斯韦方程组亦可知,变化的磁场也将在空间中产生变化的电场。若此时空间中存在导电介质,由激励磁场在空间的产生的电场将使得导电介质内的自由电子产生定向移动,从而在导电介质内部形成感应电涡流。

由于导电介质内部的感应电涡流是闭环流动的,因此该电涡流又将在空间中形成涡流磁场。若此时管壁上存在缺陷,缺陷将对管壁内感应电涡流的分布产生较大

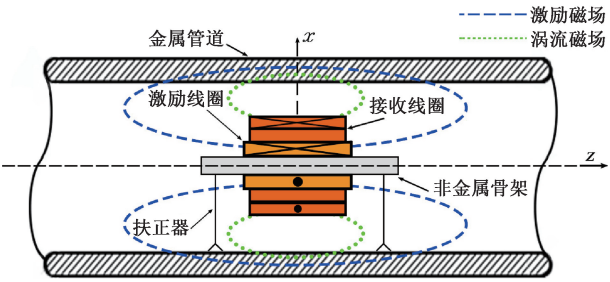


图 1 金属管道脉冲涡流检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse eddy current testing on metal pipe

的影响,并进而导致空间中涡流磁场强度的明显变化。因此通过分析接收线圈内由涡流磁场引起的感应电压变化即可对金属管道的管壁缺陷进行检测和评估。

2 脉冲涡流管道缺陷检测仿真分析

激励线圈参数如线圈厚度、长度和匝数等将直接影响空间中产生的激励磁场强度,因此此处通过有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 6.0 分析激励线圈参数对接收线圈内瞬态响应的影响,进而优化激励线圈设计。仿真分析中检测线圈和被检测管道的参数如表 1 所示。仿真的核心模块为磁场模组、电路模组。电路模组中脉冲电压幅度设置为 3 V,上升、下降时间均设置为 17 μ s;检测线圈均采用紫铜,电导率为 5.7 MS/m,相对磁导率为 1;网格划分时,检测线圈和套管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。

表 1 检测线圈和金属管道参数

Table 1 Parameters of the testing coils and the metal pipe

	内半径/ mm	外半径/ mm	厚度/ mm	长度/ mm	匝数
激励线圈	12	17.5	5.0	120.0	600
接收线圈	22	26.5	4.5	120.0	93 000
金属管道	31.00	36.50	5.5	1 000.0	—

2.1 激励线圈长度仿真分析

此处通过仿真设置不同的线圈长度来分析线圈长度参数对瞬态响应信号的影响。当激励线圈的线径不变,且激励线圈长度发生变化时,其对应的线圈匝数也会发生相应的变化。为使仿真结果准确可靠,仿真中使用不同的线圈长度时,线圈的匝数也进行了相应的变化。此处仿真中,激励线圈铜线的线径为 0.8 mm,接收线圈铜线的线径为 0.06 mm。在激励线圈内径、厚度和铜线线径不变的情况下,不同激励线圈长度下计算得到的激励线圈匝数和激励线圈电感如表 2 所示,通过有限元仿真

可得相应的瞬态响应对数曲线如图 2 所示。

表 2 不同线圈长度下激励线圈的匝数和电感值

Table 2 Turns and inductance of the driver coil under different coil lengths

长度/mm	80	100	120	140	160
线圈匝数	400	500	600	700	800
线圈电感/mH	1.29	1.66	2.02	2.39	2.76

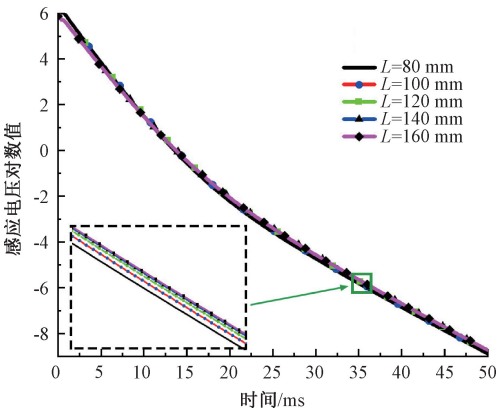


图 2 不同线圈长度下金属管道的瞬态脉冲涡流响应

Fig. 2 Pulsed eddy current transient responses of metal pipes under different coil lengths

由表 2 可知,增加激励线圈的长度会一定程度增加激励线圈的电感值,电感值过大会导致激励线圈内的激励电流上升缓慢,从而导致管壁内感应涡流的幅度偏小,而此处电感值最大为 2.76 mH,对检测影响较小。由图 2 可以看出,增加激励线圈的长度可以提高接收线圈中瞬态响应曲线的幅度,但幅度增加的值较小。其原因是增加激励线圈的长度主要影响磁场的分布范围,而对于同一处的感应涡流密度影响较小。因此增加激励线圈的长度可较小程度地增加瞬态响应信号幅度。

2.2 激励线圈厚度仿真分析

为分析不同激励线圈厚度下,接收线圈中瞬态响应信号的差异,此处分别设置激励线圈的厚度为 2.2、4.4、6.6 和 8.8 mm,然后可得对应的线圈匝数和电感如表 3 所示,对应瞬态响应曲线如图 3 所示。

表 3 不同线圈厚度下激励线圈的匝数和电感值

Table 3 Turns and inductance of the driver coil under different coil thicknesses

厚度/mm	2.2	4.4	6.6	8.8
线圈匝数	240	480	720	960
线圈电感/mH	0.27	1.22	3.04	5.97

从表 3 可知,增加激励线圈的厚度将明显地提高瞬态响应信号的幅度,此外激励线圈的电感值也随线圈的厚度明显增加。因此在线圈其余参数不变的情况下,增

加线圈的厚度可提搞瞬态响应信号的幅度,但线圈的电感值也将增加。

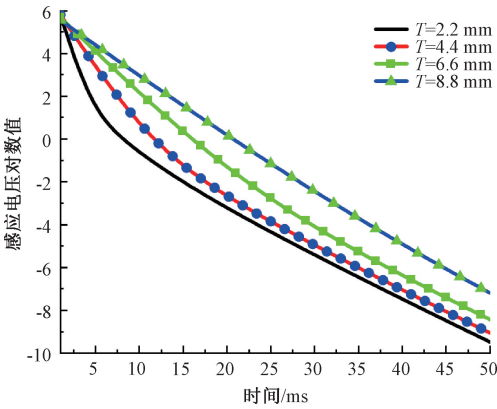


图3 不同线圈厚度下金属管道的瞬态脉冲涡流响应
Fig.3 Pulsed eddy current transient responses of metal pipes under different coil thicknesses

2.3 激励线圈线径仿真分析

除激励线圈的长度和厚度仿真分析外,此处还分析了不同激励线圈线径下,瞬态响应信号的幅度变化。在激励线圈长度和厚度不变的情况下,分别设置激励线圈的线径为0.2、0.5、0.8和1 mm,可得其对应的线圈匝数和线圈电感如表4所示,不同线径下对应的瞬态响应信号如图4所示。

表4 不同线径下激励线圈的匝数和电感值
Table 4 Turns and inductance of the driver coil under different coil wire diameters

线径/mm	0.2	0.5	0.8	1.0
线圈匝数	16 800	2 640	1 050	689
线圈电感/mH	1 589.52	39.2	6.19	2.67

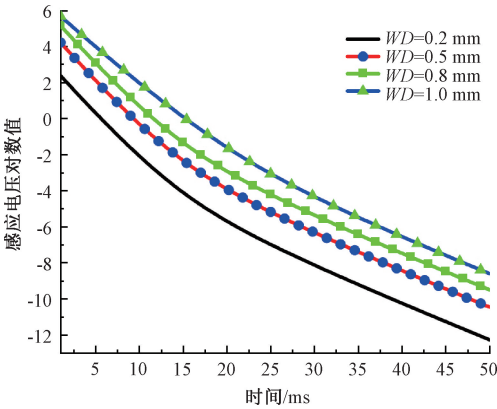


图4 不同线圈线径下金属管道的瞬态脉冲涡流响应
Fig.4 Pulsed eddy current transient responses of metal pipes under different coil wire diameters

从表4可知,当激励线圈的线径增加时,其对应的线圈匝数将快速下降,且线圈本身的电感也将快速下降。此外,虽然线圈线径增加时,线圈匝数快速下降。但从图4可知,线径越大,对应的瞬态响应信号幅度越大。其主要原因是增加激励线圈的线径可以有效地降低激励线圈自身电阻,从而在相同的脉冲激励电压下使激励线圈内部获得更大幅度的激励电流,并在自由空间和金属管壁内分别形成强度更大的电磁场和密度更大的感应电涡流,故检测线圈内的瞬态响应电压幅度更大。因此,在激励线圈厚度和长度无法增加时,增加激励线圈的线径可以有效地提高瞬态响应信号幅度并明显地降低激励线圈电感值,有助于提高检测信号的幅度和信噪比。

2.4 环状缺陷检测仿真分析

为进一步验证不同线径下检测线圈的缺陷检测灵敏度,此处通过有限元仿真软件测试检测线圈的环状缺陷检测能力,仿真中待检测管道的三维网格划分如图5所示。

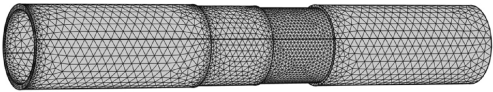


图5 脉冲涡流检测中环状缺陷管道的网格划分
Fig.5 Meshing of annular defect pipes in pulsed eddy current testing

仿真中管道的长度为1.2 m,壁厚为5.5 mm,此处设置了两个环状缺陷,其深度分别为1.5和3 mm,环状缺陷的长度均为15 cm,环状缺陷的开始于套管45 cm处,结束于套管75 cm处。

检测中,脉冲激励信号的幅度和周期分别为3 V和100 ms,每次移动检测线圈5 mm,并分别取每个检测点瞬态响应信号于30、20和15 ms处的对数幅度值,可得相应的环状缺陷检测结果如图6~8所示。

从图6~8可知,当激励线圈的线径为1 mm时,其相应的瞬态响应信号对数幅度明显大于线径为0.5 mm时对应的幅度。以45 cm处的幅度值为例,当响应信号分别位于30、20和15 ms处时,线径为1 mm时的幅度分别是线径为0.5 mm时幅度的4.39、4.56和4.69倍。因此,当激励线圈采用更大的线径时可以有效地提高瞬态响应信号幅度,从而在实际检测中获得更好的信噪比。

此外,从图6~8亦可知,用于缺陷识别的对数幅度值对应的时刻越靠后,缺陷处的响应信号幅度变化越大,这表示此时的缺陷检测灵敏度越高。然而此时不同深度缺陷的响应信号幅度难以区分。当选取较前时刻的对数幅度值进行缺陷识别时,虽缺陷检测灵敏度有所下降,但不同深度的缺陷信号差异逐渐明显且信号幅度较大,因此可在实际检测中选择瞬态响应信号中间时刻的对数幅

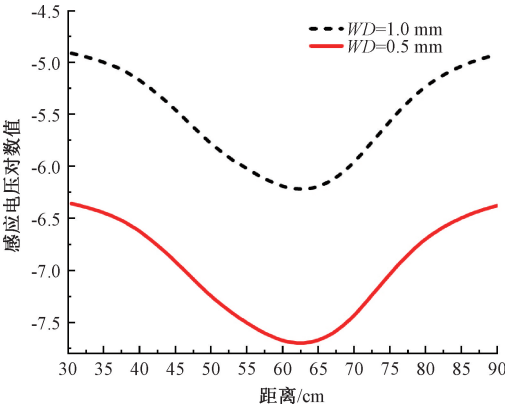


图 6 30 ms 处瞬态响应对数值检测曲线
Fig. 6 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 30 ms

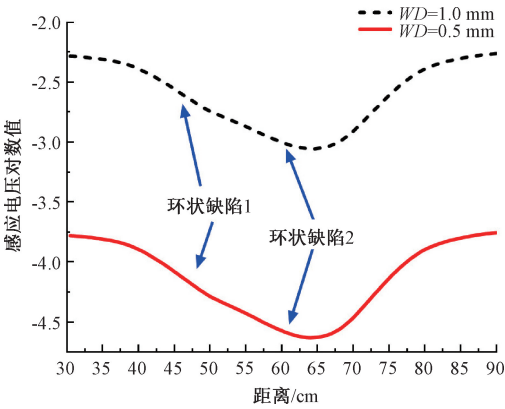


图 7 20 ms 处瞬态响应对数值检测曲线
Fig. 7 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 20 ms

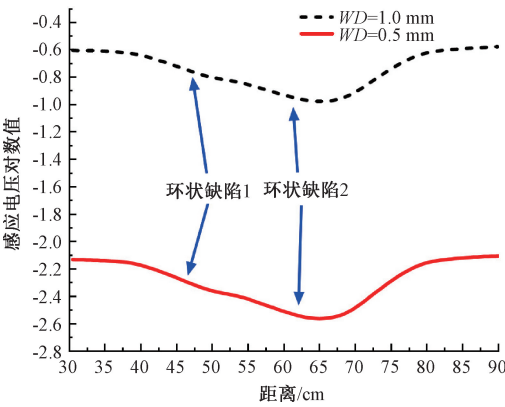


图 8 15 ms 处瞬态响应对数值检测曲线
Fig. 8 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 15 ms

出,使用响应信号不同时刻的对数幅度亦可有效地检测出管道内壁环状缺陷。

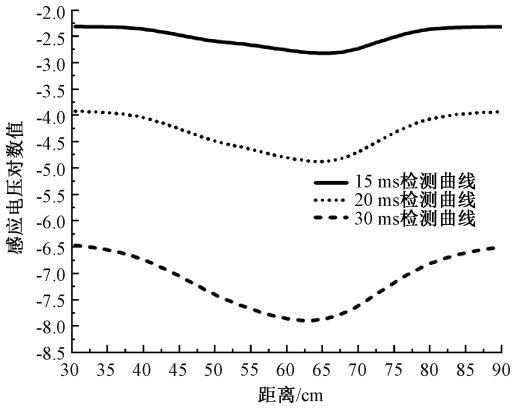


图 9 内壁环状缺陷不同时刻的检测曲线
Fig. 9 The detection result of inner wall annular defects at different times

此外,分别在管道的内、外表面设置长度为 15 cm,厚度依次为 0.1 和 0.3 mm 的单个环状缺陷,可得其检测结果如图 10 所示,其中 H_{Inner} 和 H_{Outer} 分别表示内、外表面缺陷深度。从图 10 可知,对于同尺寸缺陷,其位于内表面时的响应幅度大于其位于外表面时的响应幅度。此外,检测线圈经过 0.1 和 0.3 mm 环状缺陷时的幅度变化分别大约为 5 和 15 mV。因响应信号在较前时刻具有较好的信噪比,故理论情况下设计的检测线圈可识别出 5.5 mm 金属管道内、外表面 0.1 mm 及以上的壁厚变化。

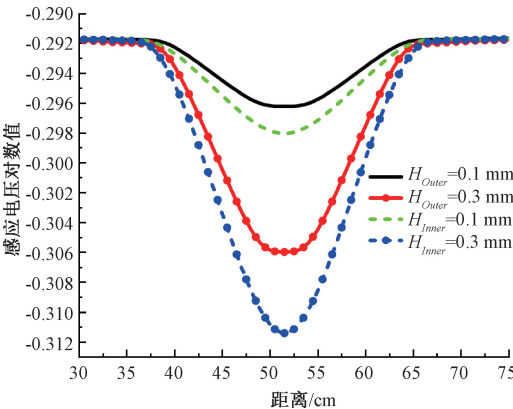


图 10 10 ms 处内外壁环状缺陷最小壁厚检测结果
Fig. 10 Minimum wall thickness detection results of annular defects in inner and outer walls at 10 ms

3 实验

为进一步对仿真实验中得到的结论进行验证,此处设计了实际检测线圈,并对带有人造缺陷的套管进行了检测。加工的检测线圈和套管参数如表 5 所示。

度进行缺陷识别。若在金属管道内部设置相同尺寸的内壁环状缺陷,可得检测结果如图 9 所示。由图 9 可以看

表 5 实际检测线圈和金属管道参数
Table 5 Practical parameters of the coils and the metal pipe

	内半径/ mm	外半径/ mm	厚度/ mm	长度/ mm	匝数
激励线圈	11.85	17.50	5.65	120.00	689
接收线圈	21.50	26.20	4.70	120.00	96 400
金属管道	31.00	36.50	5.50	1 000.00	—

设计的检测线圈和带有人造缺陷的待测管道如图 11 所示。其中,待测管道的长度为 1 m,壁厚为 5.5 mm;环状缺陷开始于套管 25 cm 处,结束于套管 55 cm 处,缺陷的尺寸与外部环状缺陷仿真中一致。

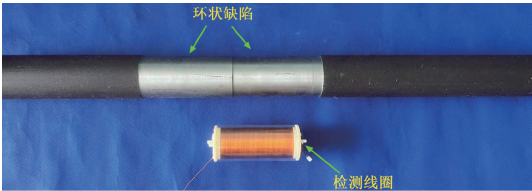


图 11 检测线圈和待检测管道实物

Fig. 11 The designed testing coil and the casing to be tested

在金属套管脉冲涡流检查中,激励线圈两侧的脉冲激励电压幅度为 3 V,频率为 10 Hz,检测时每次移动检测线圈 5 mm。由于接收线圈匝数较多,导致接收线圈内早期瞬态响应信号幅度可达 500 V 左右,为消除瞬态响应信号中的高压部分,处理电路首先使用钳位二极管将瞬态响应信号的幅度钳至 3.3 V,然后再对该瞬态响应信号进行放大,最后可得接收线圈内瞬态响应信号如图 12 所示。

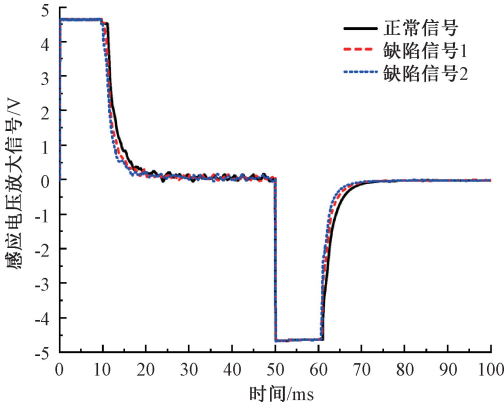


图 12 不同位置处接收线圈内瞬态响应信号
Fig. 12 Transient response in the pick-up coil corresponding to different position

从图 12 可知,接收线圈在脉冲激励信号的上升沿和下降沿分别感应出正负瞬态响应信号,且对应于上升沿

的瞬态响应信号(前 50 ms)于后期存在较大的噪声干扰。其原因是脉冲激励信号处于高电平时,内部存在纹波和其他噪声,该噪声将导致激励线圈内的激励电流也发生变化,从而导致接收线圈内的瞬态响应信号出现跳变。因此在本次实验中均使用脉冲激励下降沿产生的瞬态响应信号(后 50 ms)进行缺陷检测,然后可得不同时刻瞬态响应信号对数值的缺陷检测结果如图 13~15 所示。

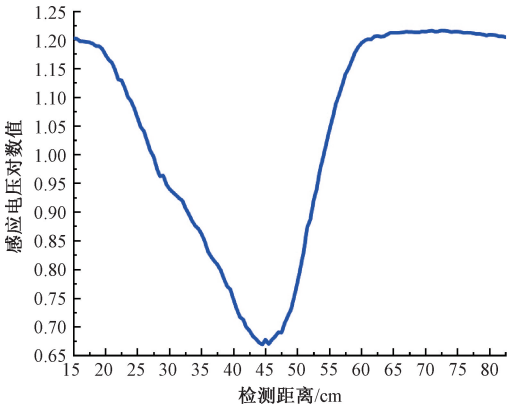


图 13 11.5 ms 处瞬态响应对数值检测曲线
Fig. 13 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 11.5 ms

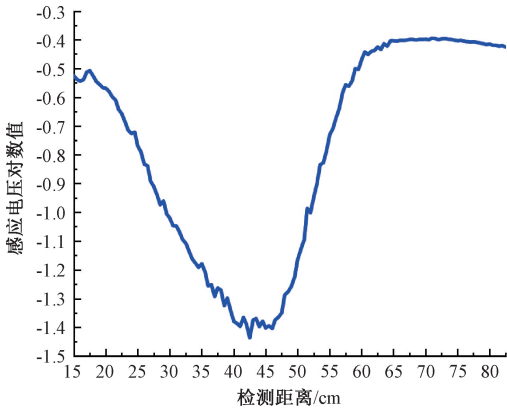


图 14 15.5 ms 处瞬态响应对数值检测曲线
Fig. 14 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 15.5 ms

从图 13~15 可知,选取用于缺陷识别的瞬态响应信号时刻越靠前,其相应的对数幅度值越大,因此信噪比越高,如图 13 所示。相反,当选取的时刻相对靠后,则相应的对数幅度值越小,信噪比也越差,如图 15 所示。

从图 13~15 亦可知,选取的时刻越靠前(非放大饱和区域),其相应的缺陷检测信号差异越明显,图 13 中环状缺陷 1 和 2 检测信号在 33 cm 附近存在可识别的差异,而 15.5 和 20.5 ms 对应的检测曲线则无明显差异。

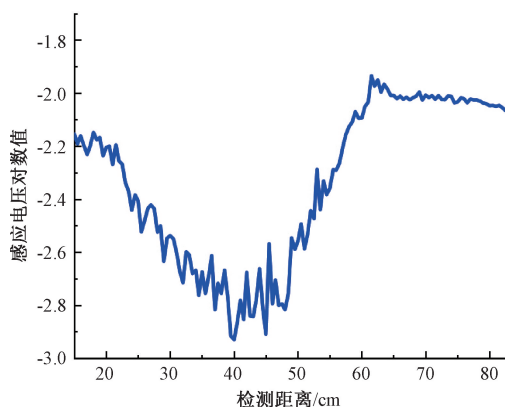


图 15 20.5 ms 处瞬态响应对数值检测曲线

Fig. 15 The detection result with the logarithmic amplitude of the transient response at 20.5 ms

此外,图 13 的检测曲线数值变化并不完全对应环状缺陷的开始或截止位置,出现该现象的原因是激励电磁场将在线圈周围形成大面积感应电涡流,线圈所在位置管壁内的感应电涡流密度最大,线圈周围管壁内感应电涡流的密度稍弱。因此在检测线圈接近环状缺陷 1 时,已有部分感应电涡流存在于环状缺陷 1 中,因此瞬态相应信号的幅度会开始发生变化。同理,当检测线圈刚离开环状缺陷 2 时,由于检测线圈左侧位置的管壁内亦存在感应电涡流,瞬态相应信号的幅度变化不会立刻停止,而是移动一段距离后才逐渐变为正常壁厚信号。图 13 检测结果表明,此处提出利用瞬态响应信号不同时刻对数幅度进行金属管道环状缺陷检测的方法可以有效地识别出金属管道环状缺陷。

4 结 论

为提高金属管道脉冲涡流检测中瞬态响应信号的信噪比,此处通过有限元仿真软件分析了激励线圈参数对瞬态响应信号的影响。仿真结果表明,增加激励线圈的线径可以有效地提高激励电流密度并降低激励线圈电感值。线径为 1 和 0.5 mm 时的缺陷检测曲线幅度对比结果表明,前者幅度为后者幅度 4 倍。最后通过实际测试验证了激励线圈线径为 1 mm 时,检测线圈的缺陷检测效果。实验结果显示,1 mm 线径下可以有效地识别环状缺陷,且信号差异明显,因此该检测线圈可用于评估金属管道整体壁厚腐蚀变薄的情况。未来将基于本文得到的瞬态响应信号进行金属管道壁厚准确反演研究。

参考文献

[1] 王晓娟,杨帆,王错,等. 面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 71-80.

WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 71-80.

[2] 莫丽,雍浩,李长俊,等. 油气管道组合缺陷漏磁检测信号数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(1): 5-10.

MO L, YONG H, LI CH J, et al. Numerical simulation study on magnetic flux leakage testing signals of combined defects in oil and gas pipelines[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(1): 5-10.

[3] 赵子文,金永,陈友兴,等. 基于改进 YOLVOv5s 的 X 射线图像粘接缺陷实时检测[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 181-186.

ZHAO Z W, JIN Y, CHEN Y X, et al. Real-time detection of adhesive defects in X-ray images based on improved YOLVOv5s[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 181-186.

[4] SCHMIDT T R. History of the remote eddy current inspection technique[J]. Materials Evaluation, 1989, 47(1): 6-15.

[5] 肖奇,徐志远,伍权. 基于远场涡流的碳钢管道缺陷外检测方法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(11): 1684-1689.

XIAO Q, XU ZH Y, WU Q. Outside inspection method for carbon steel pipe defects based on remote field eddy current[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(11): 1684-1689.

[6] 孙虎,师奕兵,张伟,等. 一种铁磁管道中远场涡流的伪峰移除方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 60-67.

SUN H, SHI Y B, ZHANG W, et al. A pseudo-peak removing method of remote field eddy current in ferromagnetic pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 60-67.

[7] 徐慧,王诗鹏,刘致秀,等. 基于涡流技术的管道表面缺陷探测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 119-122, 126.

XU H, WANG SH P, LIU ZH X, et al. Pipeline surface defect detection system based on eddy current technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(4): 119-122, 126.

[8] 陈兴乐,雷银照. 导电导磁管道外任意放置线圈激励下脉冲涡流场时域解析解[J]. 物理学报, 2014(24): 10.

CHEN X L, LEI Y ZH. Analytical solutions to pulsed eddy current field excited by a differently oriented probe coil outside a conducting ferromagnetic pipe[J]. Acta

- Physica Sinica, 2014(24): 10.
- [9] 付跃文, 喻星星. 脉冲涡流方法过油管检测套管横向裂缝研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 1-9.
FU Y W, YU X X. Research on transverse crack detection in casing through tubing using pulsed eddy current method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 1-9.
- [10] 徐志远, 肖奇. 基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 31(2): 80-87.
XU ZH Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy currents[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 31(2): 80-87.
- [11] 余兆虎, 付跃文, 江礼凡, 等. 小径管脉冲远场涡流检测研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 10-18.
YU ZH H, FU Y W, JIANG L F, et al. Study on inspection for small diameter tubes using pulsed remote field eddy current method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 10-18.
- [12] 宋韵, 武新军. 不锈钢小径管跑道型脉冲涡流测厚传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 30-32, 37.
SONG Y, WU X J. Research on racetrack-type sensor for thickness measurement of stainless-steel pipe with small diameter using PECT[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(5): 30-32, 37.
- [13] 陈涛, 何倩, 吕程, 等. 压力管道缺陷电磁超声/脉冲涡流复合检测方法研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 860-867.
CHEN T, HE Q, LYU CH, et al. Study on the hybrid detection method of pressure pipeline defects with EMAT/PECT[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 860-867.
- [14] 张超, 李勇, 闫贝, 等. 双层异质金属套管缺陷的脉冲涡流检测研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(11): 8-10, 14.
ZHANG CH, LI Y, YAN B, et al. Research on defect detection in double-casing tube with layers of different materials via PEC[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(11): 8-10, 14.
- [15] 张超, 李勇, 刘正帅, 等. 航空金属套管结构脉冲远场涡流检测机制及探头优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 16-21.
ZHANG CH, LI Y, LIU ZH SH, et al. Testing mechanism and probe optimization of remote field pulsed eddy current evaluation of aviation metallic casing pipes[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 16-21.
- [16] 刘正帅, 李勇, 任淑廷, 等. 构件损伤脉冲调制涡流检测探头新构型及性能综合分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 170-178.
LIU ZH SH, LI Y, REN SH T, et al. Novel structure and performance analysis of pulse-modulation eddy current probes for testing of damages in structural components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 170-178.
- [17] 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.
- [18] 姚文胜, 叶宇峰, 王锋淮, 等. 基于参数反演算法的铁磁构件腐蚀减薄缺陷脉冲涡流检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2023(9): 80-86.
YAO W SH, YE Y F, WANG F H, et al. Pulse eddy current testing method for corrosion thinning defects of ferromagnetic components based on parameter inversion algorithm[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(9): 80-86.
- [19] 张玉彬, 刘鹏谦, 陈丽娜, 等. 基于YOLOv5的带涂层钢结构亚表面缺陷脉冲涡流热成像智能检测[J]. 红外技术, 2023, 45(10): 1029-1037.
ZHANG Y B, LIU P Q, CHEN L N, et al. YOLOv5-based intelligent detection for eddy current pulse thermography of subsurface defects in coated steel structures[J]. Infrared Technology, 2023, 45(10): 1029-1037.
- [20] FAURSCO K, UNDERHILL P R, MORELL J, et al. Pulsed eddy current probe optimization for steel pipe wall thickness measurement[C]. 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2019: 2243.

作者简介

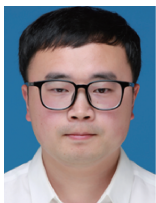


杨超(通信作者), 2014年于西南石油大学获得学士学位, 2017年于西南石油大学获得硕士学位, 现为西南石油大学实验师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: yangchao@swpu.edu.cn

Yang Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2014 and M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2017. Now he is an engineer in Southwest Petroleum University. His main

research interests include automatic detection technology and equipment.



孙虎, 2014 和 2018 年分别于西南石油大学获得学士和硕士学位, 2022 年于电子科技大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为电磁涡流无损检测、电磁涡流解析模型和信号处理。

E-mail: hsun_uestc@163.com

Sun Hu received his B. Sc. and M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2014 and 2018 and Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2022, respectively. Now he is a lecturer in Southwest Petroleum University. His main research interests include eddy

current testing, eddy current analytical model and signal processing.



唐超, 2017 年于西南石油大学获得学士学位, 2020 年于电子科技大学获得硕士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为图像处理与机器视觉、深度学习。

E-mail: 18180405319@163.com

Tang Chao received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2017, M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2020, respectively. Now he is a lecturer in Southwest Petroleum University. His main research interests include image processing and machine vision, deep learning.