

新型脉冲漏磁传感器的仿真设计与实验研究

杨宾峰¹, 张辉², 余付平¹, 王韞江¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 科研部, 陕西 西安 710051)

摘要:在对带保温层管道进行检测时,由于保温层的隔离作用使得传统的电磁无损检测方法感生的磁场在传播到管道表面时已衰减的非常微弱,因此,对带保温层管道中腐蚀缺陷的检测是无损检测领域的一个难点。脉冲漏磁方法由于结合了脉冲检测频率丰富以及漏磁检测适于铁磁性管道检测的优势,因而采用脉冲漏磁技术对管道腐蚀缺陷进行了检测。在分析了脉冲漏磁检测原理的基础上,仿真分析了 4 种不同结构的脉冲漏磁传感器沿管道表面和管壁的磁场分布以及对不同厚度保温层的检测能力,仿真结果表明带聚磁板的模型具有较好的检测能力。最后,采用实验的方法研究了这种模型传感器对腐蚀缺陷深度的定量能力,实验结果表明该传感器可以很好地实现对腐蚀缺陷深度的定量检测。

关键词:保温层管道;腐蚀缺陷;脉冲漏磁;传感器

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.012

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0057-05

目前,在电力、石油、化工和天然气等行业中,对带保温层管道腐蚀状况的检测一直是困扰企业的一个难题^[1]。目前应用在管道无损检测中的方法主要有磁粉检测、超声波探测、射线检测、热成像检测等,这些技术虽然各有优势,但由于在应用上都存在不同程度的局限,因而难以很好的实现对带保温层管道的检测。近年来在国外发展起来的脉冲漏磁无损检测技术(Pulsed Magnetic Flux Leakage, PMFL)由于结合了脉冲涡流检测技术(Pulsed Eddy Current, PEC)与漏磁检测技术(Magnetic Flux Leakage, MFL)的特点而对带保温层管道缺陷的定量评估表现出潜在的优势,而成为目前无损检测中一个新的研究方向^[2-6]。

本文提出了采用脉冲漏磁技术对带保温层管道腐蚀缺陷进行检测的方法,并采用仿真的方法研究了 4 种不同结构脉冲漏磁传感器感应场的分布规律以及其对带保温层管道的检测能力,设计了脉冲漏磁检测系统。并采用所设计的脉冲漏磁传感器对带保温层管道中腐蚀缺陷的深度进行了定量检测。

1 脉冲漏磁检测原理

脉冲涡流的基本原理是激励线圈中的脉冲电流感生出一个快速衰减的脉冲磁场,该磁场又会在导体内感应出一个快速衰减的涡流磁场,随着涡流磁场的衰减,检测线圈上就会感应出随时间变化的电压信号,从而反应出导体上缺陷的特征信息^[7-10],建立如图 1 所示的模型来对脉冲涡流进行分析。

图 1 中,被测试件的电导率为 σ_1 ,磁导率为 μ_1 ,位于试件表面的缺陷的长度为 l ,检测线圈的内径为 r_1 ,线圈的抬高高度为 h 。对于线性媒质,在轴对称的情况下,如果激励的脉冲

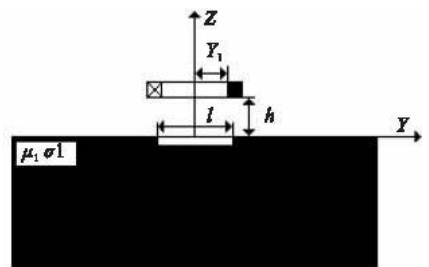


图 1 脉冲涡流检测理论模型

Fig. 1 The model for theoretical calculations of pulsed eddy current testing

* 收稿日期:2010-01-12

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAK02B02);国家自然科学基金资助项目(50807053)

作者简介:杨宾峰(1976-),男,陕西户县人,讲师,博士,主要研究方向为电磁无损检测. E-mail:bf_yang@163.com

电流表示为 $Iu(t)$, 以矢量磁位 \mathbf{A} 表示的 Maxwell 微分方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \sigma_1 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mu_0 Iu(t) \delta(r-r_1) \delta(z-h) \quad (1)$$

边界条件为:

$$\mathbf{A}_{i+1} = \mathbf{A}_i \quad (2)$$

$$\frac{1}{\mu_{i+1}} \frac{\partial \mathbf{A}_{i+1}}{\partial z} - \frac{1}{\mu_i} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} = Iu(t) \delta(r-r_1) \delta(z-h) \quad (3)$$

为了得到检测线圈上的感应电压信号, 可以假定导线的横界面由多个点组成, 则由每个点引起的感应电压为:

$$V_p = -\frac{\partial}{\partial t} \iint B dS = -\int_c \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} dl \quad (4)$$

单匝检测线圈上感应的电压^[11] 为:

$$V = \frac{\iint V_p(r, z, t) dr dz}{\iint dr dz} \quad (5)$$

传统的漏磁检测技术的激励场通过磁芯传导至被测试件形成磁回路, 通过测量漏磁场实现对缺陷的检测。但传统漏磁检测方法主要存在 2 个缺点: 首先是激励信号通常为单频正弦信号, 根据集肤效应原理, 激励场大部分集中在被测件表面, 因而对表面下缺陷的检测灵敏度不高; 其次是单频正弦激励所感生的检测信号频率成分相对较少, 不利于充分反映缺陷信息。

根据以上分析, 将脉冲涡流技术与漏磁检测技术结合, 则形成了脉冲漏磁的检测方法, 脉冲漏磁的检测方法有效的集成了漏磁检测技术和脉冲涡流技术的各自优点, 既实现了对铁磁性管道的磁化, 提高了激励磁场的穿透深度, 同时又利用了脉冲激励所具有的频率成分丰富的优点, 增强了激励场对保温层的穿透效果及对深层缺陷的检测效果, 因而适用于带保温层管道的检测。

2 脉冲漏磁传感器的建模及仿真分析

分别建立了 4 种不同结构的脉冲漏磁传感器的模型, 仿真分析了 4 种传感器模型的感应场在空间的分布规律以及沿管壁径向的衰减规律, 同时, 仿真分析了在带保温层情况下不同结构传感器的检测能力。

2.1 脉冲漏磁仿真模型的建立

在仿真分析中, 建立了 4 种不同结构的脉冲漏磁传感器模型, 模型 1 采用同轴圆柱形结构, 激励线圈为圆柱形线圈, 内外半径分别 15 mm 和 22.5 mm, 高为 10 mm。检测线圈为圆柱形线圈, 内外半径分别 1 mm 和 3 mm, 高为 4 mm。模型 2 采用矩形结构, 长宽高均为 45 mm; 检测线圈为圆柱形结构, 内外径分别 1 mm 和 3 mm, 高为 4 mm。模型 3 采用带连通磁芯的矩形结构, 激励线圈和检测线圈参数与模型 2 的参数相同, 而两端磁路的长宽高分别为 20 mm, 40 mm, 75 mm, 整体磁芯总长度为 90 mm。模型 4 采用加聚磁板的矩形结构, 两端磁路的长宽高分别为 20 mm, 40 mm, 75 mm。

2.2 4 种结构脉冲漏磁传感器的性能比较

图 2 为管道表面路径上磁感应强度分布曲线。从图中可以看出, 模型 1 中的圆柱形激励线圈在管道中感应的磁场在中间位置相互抵消, 致使管道中间部分的磁感应强度分布曲线较小。模型 2、3、4 的磁感应强度在中间位置几乎没有变化, 分布较均匀。模型 4 的磁感应强度均匀分布的范围明显大于模型 2, 且磁感应强度大于模型 2。模型 3 的磁感应强度虽然较强, 但均匀分布的范围与模型 2 相比变差, 并且磁场向两端衰减也较快。

图 3 为 4 种模型在管道中的磁感应强度进行归一化处理后的衰减曲线。从图中可以看出, 模型 1 在管道中磁感应强度斜率最大, 磁感应强度变化最快, 衰减也最快; 模型 2 中磁感应强度衰减变慢, 优于模型 1。但是与模型 3 中的磁感应强度衰减情况相比明显变快。模型 4 磁感应强度斜率最小, 磁感应强度变化最慢, 衰减也最慢, 更利于管道深层缺陷的检测。

图 4 为 4 种模型对不同厚度保温层的检测能力曲线。从图中可以看出, 模型 1 中保温层厚度变化到 15

mm 时感应电压峰值会发生变化,当保温层厚度继续增加时,检测线圈感应电压的峰值几乎不再变化,理论上认为此时检测线圈感应不到管道上的磁场的变化。模型 2 中检测线圈感应电压峰值在保温层厚度为 20 mm 时仍有变化,当保温层继续增加时感应电压信号峰值几乎保持不变。模型 3 和模型 4 中,随着保温层厚度的增加,感应电压信号的峰值不断变小,当保温层厚度为 50 mm 时感应电压信号峰值仍有变化,但变化较小。综上所述对比发现,对带一定厚度保温层管道腐蚀缺陷进行检测时模型 3 和模型 4 表现出了一定的优越性。

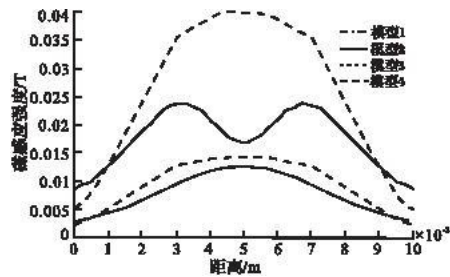


图2 管道表面沿中间轴向路径上磁感应强度变化曲线

Fig. 2 The magnetic field curve along the axis of pipeline surface

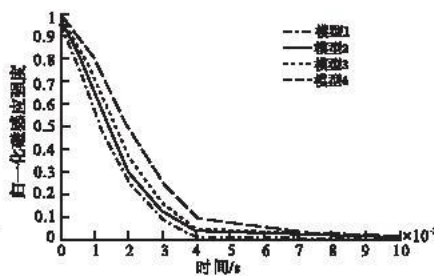


图3 管道中磁感应强度的衰减曲线

Fig. 3 The magnetic field attenuation curve in pipeline

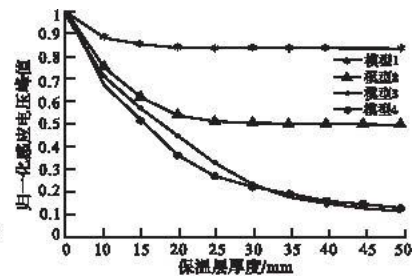


图4 不同厚度保温层时检测线圈感应电压峰值归一化曲线

Fig. 4 The voltage peak value unitary curve of pick-up coil for different thicknesses of pipeline heat preservation

通过对以上仿真结果的综合分析可以看出,模型 4 的空间激励场分布范围较大,管道表面磁场较强,且均匀分布的范围较大,管道中磁场衰减较慢,对较厚保温层管道的缺陷检测能力较强。因此,选用这种结构的传感器进行实验研究。

3 脉冲漏磁检测实验装置

脉冲漏磁检测系统主要由信号发生模块、功率放大模块、信号调理模块、数据采集模块和 PMFL 传感器几个部分组成。信号发生模块采用 DDS 芯片 AD7008 产生正弦信号,再进行滤波整形得到检测所需的激励脉冲信号。功率放大模块采用功率放大芯片 TDA2030 进行设计,主要作用是将信号发生模块产生的激励信号进行功率放大,放大后的信号加载到传感器激励线圈两端。

信号调理模块主要包含信号的前置放大和滤波两大功能。数据采集模块采用美国 NI 公司生产的 12 位 PCI 数据采集卡 PCI-6010,采样频率设置为 100 kHz。

脉冲漏磁传感器激励线圈尺寸(长×宽×高)为 45 mm×40 mm×40 mm,用 0.35 mm 的漆包线共绕了 600 匝;聚磁板尺寸(长×宽×高)为 20 mm×40 mm×70 mm;检测线圈磁芯尺寸(外径×高)为 10 mm×8 mm,用 0.08 mm 的漆包线共绕了 1 000 匝;激励方波电压为 ± 12 V,频率为 80 Hz,占空比为 0.5;保温层厚度为 20 mm。

在外径 108 mm、壁厚 5 mm 的钢管管壁上加工了 2 组缺陷,表面缺陷的尺寸(长×宽×深)分别为:40 mm×10 mm×4 mm、36 mm×10 mm×3 mm、36 mm×15 mm×3 mm、36 mm×20 mm×3 mm、30 mm×10 mm×2 mm;表面下缺陷的尺寸(长×宽×深)为:20 mm×10 mm×1 mm、20 mm×10 mm×2 mm、20 mm×15 mm×2 mm、20 mm×20 mm×2 mm、20 mm×10 mm×3 mm。

4 腐蚀缺陷深度的定量检测

为提高检测灵敏度,扫描过程中,当检测线圈感应信号出现最大值时进行数据采集,再将采集的原始信号波形与参考信号波形(即无缺陷处采集的信号波形)进行差分,从而得到感应信号的差分波形。

4.1 同深腐蚀缺陷的检测结果

图 5 为深度相同、宽度不同的表面缺陷的检测结果,图 6 为深度相同、宽度不同的表面下缺陷的检测结果。从图上可以看出,对于同深缺陷,不论缺陷宽度如何变化,过零时间几乎相同。表面缺陷差分信号的过

零时间均出现在 $374 \mu\text{s}$ 处,表面下缺陷的过零时间均出现在 $509 \mu\text{s}$ 处。由此可以得出结论,对于带保温层的管道表面和表面下缺陷,差分信号的过零时间与被测缺陷宽度无关,而只与被测缺陷深度有关。

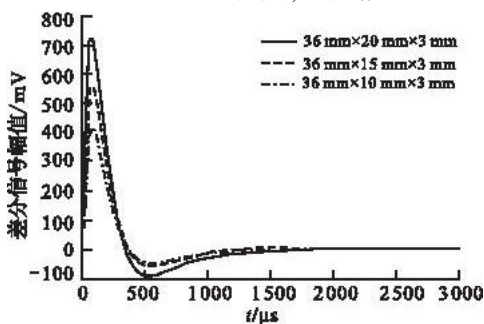


图6 表面同深不同宽缺陷的差分信号波形

Fig. 6 The difference signal for different width surface defect

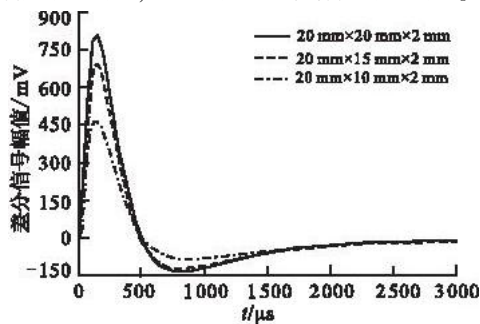


图7 表面下同深不同宽缺陷的差分信号波形

Fig. 7 The difference signal for different width subsurface defect

4.2 不同深腐蚀缺陷的检测结果

图8为不同深的表面缺陷的检测结果,图9为不同深的表面下缺陷的检测结果。从图中可以看出,当表面缺陷深度分别为 4 mm 、 3 mm 、 2 mm 时,检测结果中差分信号的过零时间依次出现在 $341 \mu\text{s}$ 、 $374 \mu\text{s}$ 、 $458 \mu\text{s}$ 处;当表面下缺陷深度分别为 1 mm 、 2 mm 、 3 mm 时,差分信号的过零时间依次出现在 $446 \mu\text{s}$ 、 $509 \mu\text{s}$ 、 $643 \mu\text{s}$ 处。由此可以得出差分信号的过零时间随腐蚀缺陷深度的变化规律,对于表面缺陷,腐蚀深度越深,差分信号的过零时间越小;对于表面下缺陷,腐蚀深度越深,差分信号的过零时间越大。

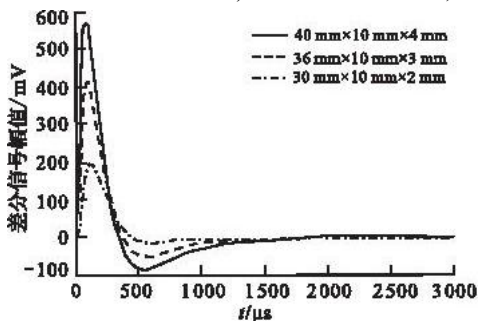


图8 表面不同深缺陷的差分信号波形

Fig. 8 The difference signal for different depth surface defect

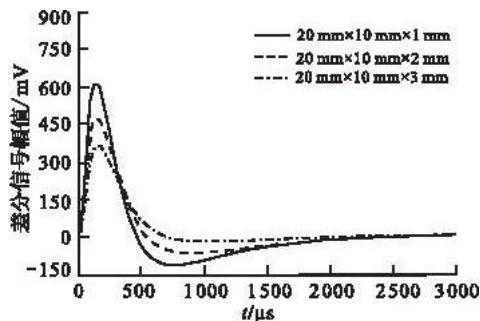


图9 表面下不同深缺陷的差分信号波形

Fig. 9 The difference signal for different depth subsurface defect

对以上实验数据采用最小二乘法进行数据拟合,得到带保温层管道表面腐蚀缺陷深度 d 与过零时间 t 的对应关系式为: $d = -0.016 1t + 9.285 7$,表面下腐蚀缺陷深度 d 与过零时间 t 的对应关系式为: $d = 0.009 7t - 3.183 4$ 。因此对于带保温层管道的腐蚀缺陷,可以通过提取差分信号的过零时间作为特征量,再根据对应关系式来实现对缺陷深度的定量检测。

5 结束语

脉冲漏磁无损检测技术由于集成了脉冲涡流检测和漏磁检测的优点,因而成为解决带保温层管道腐蚀缺陷检测难题的一种有效方法。本文仿真分析了4种不同结构的脉冲漏磁传感器模型,对其磁场的分布规律以及对带保温管道的检测能力进行了比较,从仿真结果可以看出,带聚磁板的模型具有较好的检测能力,论文最后采用实验的方法研究了这种模型传感器对腐蚀缺陷深度的定量能力,实验结果表明这种传感器可以实现对带保温管道中腐蚀缺陷深度的定量。

参考文献:

[1] 郑中兴,韩志刚. 穿透保温层和防腐层的脉冲涡流壁厚检测[J]. 无损探伤,2008,32(1):1-4.

ZHENG Zhongxing, HAN Zhigang. Pulse Eddy Current Testing for Depth of Pipeline by Getting through Heat Preservation Layer

- and Antisepsis Layer[J]. NDT,2008,32(1):1-4. (in Chinese)
- [2] Sophian A, TIAN G Y, Zairi S. Pulsed Magnetic Flux Leakage Techniques for Crack Detection and Characterisation [J]. Sensors and Actuators A, 2006,125:186-191.
- [3] Wilson J W, TIAN G Y. Pulsed Electromagnetic Methods for Defect Detection and Characterisation [J]. NDT&E International, 2007, (40):275-283.
- [4] 杨宾峰,罗飞路,潘孟春. 脉冲涡流无损检测中腐蚀缺陷边缘的识别[J]. 机械工程学报,2008,44(12):75-79.
YANG Bin-feng, LUO Fei-lu, PAN Meng-chun. Identification of Corrosion Fringe in Pulse Eddy Current Nondestructive Testing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(12):75-79. (in Chinese)
- [5] YANG B F, LUO F L. Pulsed Eddy Current Technique Used for Nondestructive Inspection of Aging Aircraft [J]. NDT&E International, 2006, 48(7):411-414.
- [6] 康宜华,武新军. 数字化磁性无损检测技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
KANG Yihua, WU Xinjun. Digital Magnetism Nondestructive Testing Technology[M]. Beijing:China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Espina Hernandez J H, Grossinger R, Hallenb J M. Local Eddy Current Measurements in Pulsed Fields[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2008,320:300-303.
- [8] LI Shu, HUANG Songling, ZHAO Wei. Development of Differential Probes in Pulsed eddy Current Testing for Noise Suppression[J]. Sensors and Actuators A,2007,135:675-679.
- [9] Lefebvrea J H V, Mandacheb C. Pulsed Eddy Current Thickness Measurement of Conductive Layers Over Ferromagnetic Substrates[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2008,27:1-8.
- [10] Smith R A, Hugo G R. Transient Eddy Current NDE for Aging Aircraft - capabilities and Limitations[J]. Insight, 2001, 43(1):14-25.
- [11] Dai X W, Ludwig R, Palanisamy R. Numerical Simulation of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Phenomena[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(6):3089-3096.

(编辑:徐楠楠)

Simulation Design and Experimentation Research on A New Type of Pulsed Magnetic Flux Leakage Sensor

YANG Bin-feng¹, ZHANG Hui², YU Fu-ping¹, WANG Yun-jiang¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In the course of testing the insulated pipeline, because of the insulation of the insulating layer, the magnetic field generated by the traditional electromagnetic nondestructive testing technique will be badly attenuated when diffusing to the surface of pipeline. So detecting the corrosion in the insulated pipeline is a crux in nondestructive testing (NDT). Pulsed magnetic flux leakage (PMFL) technique is adopted to detect the corrosion in the insulated pipeline because it combines the advantages of richness frequency components of pulsed eddy current testing and the superiority of the magnetic flux leakage technique adapted to the inspection ferromagnetic pipeline together. Based on analyzing the principle of PMFL and by using finite element method, the distribution of magnetic field along the pipeline surface and pipeline wall, and the detection abilities of four different sensor models to the insulated layers in different thickness are studied. The result of simulation shows that the model with the core in both sides of the exciting coil has a better testing ability. Finally, the performances of this sensor are investigated by experiment; the result shows that this sensor can be used to perform quantitative detection of corrosion depth.

Key words: insulated pipeline; corrosion; pulsed magnetic flux leakage; sensor