脉冲涡流不拆保温探头优化设计的 数值模拟方法研究

李炳青¹,殷雪峰²,程千里²,崔建杰³

(1.青岛市黄岛区市场监督管理综合保障中心,山东 青岛 266500; 2.中国石化青岛炼油化工有限责任 公司,山东 青岛 266500; 3.天津特米斯科技有限公司,天津 300131)

摘要:通过比较分析国外脉冲涡流不拆保温探头的技术原理和设计范例,针对现有文献中探头的参数,进 行上下梯度模拟,提出具有针对性的探头优化设计方法。通过理论计算和数值模拟,取灵敏度为优化指标, 得到最优发射线圈的直径与高度数据;通过数值模拟和计算求解,得到发射线圈最优线径和最优匝数;通 过数值模拟得到最优的接收线圈线径和匝数;通过实际测试和正交试验,得到实际应用化的发射线圈最佳 线径和匝数,以及接收线圈的最佳线径和匝数。依据有限元模型,脉冲涡流不拆保温探头的参数在一定范 围内都进行了优化。针对特有脉冲涡流系统的传感器探头,依据现有文献中参数进行理论计算和数值模拟 提出的探头优化设计方法是可行的。

关键词:脉冲涡流;传感器探头;优化设计思路;数值模拟

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)10-0126-08 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.017

Optimal Design of Pulsed Eddy Current Probe without Disassembly

LI Bing-qing¹, YIN Xue-feng², CHENG Qian-li², CUI Jian-jie³

(1. Huangdao District Market Supervision and Management Comprehensive Support Center, Shandong Qingdao, 266500, China; 2. SINOPEC Qingdao Refining & Chemical Co., Ltd., Shandong Qingdao, 266000, China; 3. Tianjin TEMS Technology Co., Ltd., Tianjin, 300131, China)

ABSTRACT: By comparing and analyzing the technical principles and design examples of pulsed eddy current probe without disassembly in foreign countries, and aiming at the parameters of probe in existing literatures, the upper and lower gradient simulation is carried out, and a targeted optimization design method of probe is proposed. Through theoretical calculation and numerical simulation, the sensitivity is taken as the optimization index to obtain the optimal diameter and height data of the transmitting coil. Through numerical simulation and calculation, the optimal line diameter and the optimal number of turns of the transmitting coil are obtained. The optimal diameter and number of turns of receiving coil were obtained by numerical simulation. Through practical test and orthogonal experiment, the optimal line diameter and turn number of transmitting coil are obtained. According to the finite element model. The parameters of the pulsed eddy current insulation probe are

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-07-26

Received: 2021-05-12; Revised: 2021-07-26

作者简介:李炳青(1969—),男,高级工程师,主要研究方向为炼化装置设备安全保障。

Biography: LI Bing-qing (1969-), Male, Senior engineer, Research focus: safety assurance of refinery equipment.

引文格式: 李炳青, 殷雪峰, 程千里, 等. 脉冲涡流不拆保温探头优化设计的数值模拟方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 126-133. LI Bing-qing, YIN Xue-feng, CHENG Qian-li, et al. Optimal Design of Pulsed Eddy Current Probe without Disassembly[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 126-133.

optimized in a certain range. The results show that the optimal design method of the probe based on theoretical calculation and numerical simulation is feasible for the probe of a particular pulsed eddy current system.

KEY WORDS: pulsed eddy current; sensor probe; optimization design idea; numerical simulation

长久以来,对防腐结构或者保温层下承压管道腐 蚀情况的检测是电力、石油、化工和天然气行业中的 科研难题。现阶段检测承压管道的方法是拆除其外敷 材料,有时还需要对承压管道的外表面进行处理,表 面处理的同时也会给承压设备造成一定的损伤,最后 再采用常规无损检测手段(如超声波测厚)进行评估。 脉冲涡流检测技术^[1-5]避免了传统涡流只能检测设备 上表面缺陷的局限,在低频条件下激励能量更强,具 有很好的穿透性,能穿透绝热保护层,并继续穿透碳 钢管壁,可真正实现在不拆除保护层的情况下对承压 构件进行不停机检测。

现有脉冲涡流检测技术在针对铁磁性材料进行 检测时(在一定提离条件下),一般使用晚期信号斜 率法来进行壁厚测量^[6-10]。在末期信号斜率算法基础 之上,传感器探头的结构组成优化设计,决定了整体 系统的检测精度。因此,针对特有脉冲涡流系统(末 期信号斜率固定算法)的传感器探头,如何进行设计 优化是一个重要的技术难题。本文从脉冲涡流检测技 术的基本原理入手,介绍了不拆保温探头的优化设计 思路(数值模拟),并结合现有公开文献中的探头结 构参数^[10-14],提出探头优化设计的方法^[15-16]。

1 脉冲涡流不拆保温探头的优化设计

脉冲涡流检测技术(Pulsed Eddy Current, PEC) 是近些年来在传统涡流检测基础上发展起来的一种 新型无损检测技术。脉冲涡流新型检测技术激励源则 采用具有一定占空比的激励方波,检测结果采用由工 件上脉冲涡流信号引起检测线圈上的感应电压变化 (特征值)作为检测分析结果。

1.1 脉冲涡流不拆保温探头基本组成

脉冲涡流不拆保温检测探头,主要由发射线圈和 接收线圈耦合组成^[17-20]。现有的公开文献中,发射线 圈一般放置在内部,而接收线圈则放置在外部。这种 结构设置的好处是接收电压较为稳定,信噪比相对于 接收线圈内置时要高很多。典型的脉冲涡流不拆探头 结构如图1所示。

利用现有公开文献中^[6-10]的脉冲涡流探头参数为 设计基础数据:发射线圈的高度取 24 mm,线径取 0.8 mm,匝数取 850 匝,内径取 15 mm;接收线圈的 高度取 10 mm,外径取 68 mm,线径取 0.21 mm,匝 数为 803 匝。针对上述基础探头的技术参数,如何进 行优化设计,是本文着重要解决的问题之一。



图 1 脉冲涡流不拆保温探头结构 Fig.1 Schematic Diagram of Pulsed Eddy Current Probe without Disassembly Structure

1.2 探头优化设计原理与边界条件设定

所谓探头优化^[21-24],是指探头满足多个边界条件的技术参数平衡:1)必须优先保证穿透能力,满足 在提离高度下对碳钢管道内壁全渗透的条件下,最大 程度提高检测精度,探头直径要足够小;2)探头发 射线圈的磁场优质程度最优(涉及到高径比和聚焦磁 芯选择);3)在一定关断时间条件下,发射线圈的磁 感应强度和磁能最大(涉及发射线圈的最佳线径和匝 数);4)接收线圈的线径和匝数应用化选择(通过数 值模拟数据与实际测试验证相结合而得到)。

综上所述, 探头优化设计的总体思路为:1)设 定碳钢壁厚和提离高度条件,通过理论计算和数值模 拟,取灵敏度为优化指标,得到最优发射线圈的直径 与高度数据(即骨架基本结构参数);2)取发射线圈 磁能最大、取骨架空间固定值和关断时间为固定值这 3个边界条件,通过数值模拟和计算求解,得到发射 线圈的最优线径和最优匝数;3)通过数值模拟得到 最优的接收线圈线径和匝数;4)通过实际测试和正 交试验,得到实际应用化的发射线圈最佳线径和匝 数,以及接收线圈的最佳线径和匝数。

2 探头优化设计过程

2.1 条件设定与数值模拟

本文依托 COMSOL 中建立的有限元仿真模型, 数值模拟获得优化的发射线圈外径 D₁、发射线圈高度 H₁、发射线圈线径 a₁、接收线圈外径 D₂和接收线圈线 径 a₂。文中有限元模型^[25-26]如图 2 所示,其相关参数 见表 1。其中,碳钢壁厚设定为 10 mm,保温层厚度 设定为 100 mm,铝皮厚度设定为 1 mm,保温层材料 为聚氨酯发泡。以碳钢层外壁减薄 1 mm 时电压信号以 0.08~0.10 s 平均斜率的变化(探头灵敏度)作为优化指 标。优化过程中,保持发射线圈输入驱动电压不变。



图 2 有限元模型 Fig.2 The Schematic Diagram of Finite Element Model

表 1	无缝碳钢管壁条件设定
Tab.1 Seamless Car	bon Steel Pipe Wall Condition Setting

	电导率/(MS·m ⁻¹)	相对磁导率	径向高度/mm
磁芯	0	150	20
铝板层	34	1	1
保温层	0	1	100
碳钢层	1.5	400	10

2.2 发射线圈高度 H 数值模拟计算

依据公开文献数据,设定发射线圈初始参数:高 度为 24 mm,线径为 0.8 mm,匝数为 850。保持线径 不变,粗略计算发射线圈匝数 N₁随高度 H₁的变化规 律,如式(1)所示。

$$N_1 = \operatorname{ceil}\left(\frac{H_1}{24} \times 850\right) \tag{1}$$

式中: ceil 为向上取整函数。依据有限元模型对 高度 H₁在 20~30 mm 内(2 mm 梯度延展)的扫查计 算,获得线圈高度对电压信号、0.08~0.10 s 平均斜率 及探头灵敏度的变化规律,如图 3 所示。

由图 3 可知,发射线圈高度增大对电压信号衰减 速率的影响表现为在拐点前减小衰减速率,在拐点后 增大衰减速率。发射线圈高度 H₁ 对探头灵敏度的影 响大,当发射线圈高度增加时,探头灵敏度先逐步增 大,在高度为 28 mm 时达到最大值,随后随线圈高 度增加逐步减小。据此得出,发射线圈最优高度 H₁ 为 28 mm 时,对应灵敏度提升最高可达 20.17%。



图 3 不同发射线圈高度对探头灵敏度的影响

Fig.3 The influence of different transmitting coil heights on probe sensitivity: a) the voltage curve of standard specimen; b) the voltage curve of specimen with a surface thinning of 1mm; c) the slope of 0.08s-0.10s at different transmitting coil heights; d) the probe sensitivity at different transmitting coil heights

2.3 发射线圈外径 D₁数值模拟计算

圈外径 D_1 的变化规律,见式 (2)。

基于发射线圈最优高度 H₁下进行发射线圈外径 D₁的优化工作。粗略计算发射线圈匝数 N₁随发射线

$$N_1 = \operatorname{ceil}\left(\frac{28}{24} \times 850 \times \frac{D_1 - 15}{60 - 15}\right) \tag{2}$$

依据有限元模型,对发射线圈外径 D₁ 在 52~68 mm (4 mm 梯度延展)进行扫查计算(此过程中保持发射 线圈内径为 15 mm),获得发射线圈外径对电压信号、 0.08~0.10 s平均斜率及探头灵敏度变化规律如图 4 所 示。由图 4 可知,基于发射线圈最优高度 H_1 =28 mm 条件下,发射线圈外径 D_1 对探头灵敏度影响较大, 其影响也是先增大后逐步减小。当发射线圈最优外径 D_1 为 60 mm 时,对应的灵敏度提升最高可达 10.20%。





Fig.4 The influence of different transmitting coil outer diameter on probe sensitivity: a) the voltage curve of standard specimen; b) the voltage curve of specimen with a surface thinning of 1mm; c) the slope of 0.08s-0.10s at different transmitting coil outer diameters; d) the probe sensitivity at different transmitting coil outer diameters

2.4 发射线圈线径 ai 数值模拟计算

基于上述已获得的发射线圈最优高度 H₁ 和最佳 直径 D₁,进行发射线径 a₁的优化。此处仍以发射线 圈初始参数作为参考,粗略计算发射线圈匝数 N₁ 随 发射线径的变化规律,见式(3)。

$$N = \operatorname{ceil}\left(\frac{28}{24} \times 850 \times \frac{0.8^2}{a_1^2}\right)$$
(3)

依据有限元模型,对发射线径 *a*₁ 在 0.4~1.2 mm (0.2 mm 梯度延展)内进行扫查计算,获得发射线 径对电压信号、0.08~0.10 s 平均斜率及探头灵敏度变 化规律如图 5 所示。

由图 5c 可知,发射线圈线径对缺陷评价指标 (0.08~0.10 s 平均斜率)的影响很小。图 5d 中,发射 线径对探头灵敏度的影响较小,减小发射线径会使灵 敏度只有些许提升,提升程度在 0.4~1.2 mm (0.4-0.8-1.2 mm梯度延展),不超过 0.65%。之所以 出现这样的结论(即发射线圈结构固定 D₁=60 mm/H₁= 28 mm 条件下,线径在 0.4~1.2 mm 变化时,灵敏度提 升不超过 0.65%),是因为骨架空间固定后,发射线圈 漆包线的缠绕容纳体积为固定值。如果发射线径较细, 则漆包线匝数会较多,电阻较大,电感也很大;如果 发射线径较粗,则匝数较小,但电阻也较小,电感也 较小。在一定驱动电压下(如 10 V),发射线圈磁能 和电感成正比、和驱动电流的平方成反比。当线径较细 时,虽然电感较大,但驱动电流的平方会较小;当线径 较粗时,虽然电感较小,但驱动电流的平方会较大。

求解发射线圈某个线径是最佳线径,起关键作用 的是激发电流在瞬间关断时,发射线圈本身阻抗所造 成的"关断时间"的限制和约束。骨架固定空间条件 下,发射线圈从较细线径的满缠状态,到较粗线径的 满缠状态,"关断时间"有一个从高到低的过渡区间。 通过大量实验验证,线圈关断时间在 80 μs 时,线圈 的磁能效果最佳,因此可以通过瞬变电磁的公式(4) 计算,在已知结果T条件下,求解最佳发射线径和对 应缠绕匝数。



Fig.5 The influence of different transmitting coil wire diameter on probe sensitivity: a) the voltage curve of standard specimen;
b) the voltage curve of specimen with a surface thinning of 1mm; c) the slope of 0.08s-0.10s at different transmitting coil wire diameters; d) the probe sensitivity at different transmitting coil wire diameters

$$T = \frac{N_1 \mu b}{\sqrt{\pi R}} \left[N_1 \ln \frac{8b}{a_1 \sqrt{\pi}} - (2N_1 - 1.25) \right] \ln \left(\frac{2V}{V + 1.5} \right) (4)$$

式中: *T* 为关断时间; N_1 为匝数; *R* 为电阻; a_1 为线圈线径; *b* 为线圈平均直径; *V* 为激发电压。通过夹逼法计算求解可知, 当 *T*=80×10⁻⁶ s, 发射电压 设定为 10 V 时,最佳线径 a_1 为 0.6 mm, 对应匝数 N_1 为 1764。

2.5 接收线圈外径 D2数值模拟计算

基于优化得到的发射线圈最优参数进行接收线 圈线径的优化。已知文献中,接收线圈初始参数:线 径为 0.21 mm,匝数为 600。粗略计算接受线圈匝数 *N*₂随接收线径的变化规律,见式(5)。

$$N_2 = \operatorname{ceil}\left(600 \times \frac{0.21^2}{D_2^2}\right)$$
(5)

接收线圈外径 D₂的扫查范围为 62~70 mm(1 mm 梯度延展),此过程中保证发射线圈内径不变。获得 接收线圈外径对电压信号、0.08~0.10 s 平均斜率及探 头灵敏度变化规律如图 6 所示。由图 6 可知,接收线 圈外径的增加对探头灵敏度影响不大,探头灵敏度总 体随接收线圈外径增加先增大、后减小,最高灵敏度 出现在 D₂=68mm 处。

2.6 接收线圈线径 a₂与匝数 №数值模拟 计算

基于发射线圈最优参数,在接收线圈最优高度、 最优外径下进行接收线圈线径的优化工作。接收线圈 基准参数:高度为 10 mm,内径为 60 mm,外径为 68 mm,线径为 0.21 mm,匝数为 803。改变接收线 圈线径,线圈匝数 N₂与线径 a₂基本满足式(6)。

$$N_2 = \operatorname{ceil}\left(803 \times \frac{0.21^2}{a_2^2}\right) \tag{6}$$

式(6)的估算考虑了圆导线直径对线圈层数以 及每层匝数的影响。接收线圈线径 a₂的扫查范围为 0.1~0.3 mm(0.02 mm梯度延展),在此过程中,保证 接收线圈高度与内径、外径不变。获得接收线圈线径 对接收线圈电压信号影响如图 7 所示。

由图 7 可知,接收线圈线径增大对电压信号的影响 主要体现在幅值的减小,对拐点前和拐点后的衰减速率 并无明显影响。平均衰减速率随接收线圈线径的增大变 化不明显。计算外管壁损失 1 mm 与管壁无损失情况下 接收线圈电压衰减速率之差,得到探头灵敏度随线圈线 径的变化趋势,最高灵敏度出现在 0.25~0.30 mm。据此, 取接收线圈最优线径为 *a*₂=0.25 mm。此线径在 0.1~ 0.3 mm 内最高有 3.2%的灵敏度提升。



图 6 不同接收线圈外径对探头灵敏度的影响





图 7 不同接收线圈线径对探头灵敏度的影响

Fig.7 The influence of different receiving wire outer diameter on probe sensitivity: a) the voltage curve of standard specimen;b) the voltage curve of specimen with a surface thinning of 1mm; c) the slope of 0.08s-0.10s at different receiving coil wire diameters; d) the probe sensitivity at different receiving coil wire diameters

3 结论

依据有限元模型,针对发射线圈高度 H₁、发射 线圈外径 D₁、发射线圈线径 a₁、接收线圈高度 H₂、 接收线圈外径 D₂、接收线圈线径 a₂在一定范围内进 行了参数优化。依据探头灵敏度随探头参数的变化规 律,认为线圈尺寸参数(高度、外径)对探头灵敏度 的影响较大,而线径对探头灵敏度的影响较小。综合 以上结果,优化前与优化后的探头技术参数见表2。 通过参数发现,针对特有脉冲涡流系统的传感器

探头,依据现有文献中参数进行理论计算和数值模拟 提出的探头优化设计方法是可行的。

表 2 脉冲涡流不拆保温探头数值模拟优化之前与之后的技术参数对比 Tab.2 Technical parameters comparison of the pulsed eddy current probe before/after optimization

类别	对比项目	优化前	优化后	灵敏度提升			
发射线圈	内直径	15 mm (固定)	15 mm (固定)				
	外直径 D_1	60 mm	60 mm				
	高度 H ₁	24mm	28 mm (调整)	20.17%			
	线径 a1	0.8mm	0.6 mm (调整)	0.(50/			
	匝数 N ₁	850	1764(调整)	0.05%			
接收线圈	内直径	60.1 mm (稍大于 D ₁)	60.1 mm (稍大于 D ₁)				
	外直径 D_2	68 mm	68 mm				
	高度 H ₂	10 mm	10 mm				
	线径 a2	0.21 mm	0.25 mm (调整)	3.2%			
	匝数 N ₂	803	567(调整)				

参考文献:

- 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 Xin-jun, ZHANG Qing, SHEN Gong-tian. Review on Advances in Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [2] 周德强,田贵云,王海涛,等.脉冲涡流无损检测技术的研究进展[J].无损检测,2011,33(10):25-29.
 ZHOU De-qiang, TIAN Gui-yun, WANG Hai-tao, et al. The Recent Developments of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2011, 33(10): 25-29.
- [3] 杨洲. 基于脉冲涡流技术的板形检测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
 YANG Zhou. Application of Pulsed Eddy Current in the Shape Measurement[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
 [4] 段成功. 基于脉冲涡流的管道检测方法研究[D]. 沈阳:
- [4] 20歳の. 塗り旅神病流的普通極後の方法研究[D]. 花柄.
 沈阳工业大学, 2013.
 DUAN Cheng-gong. Probing Approaches to Pipeline Detection Based on Pulsed Eddy Current[D]. Shenyang:
 Shenyang University of Technology, 2013.
- [5] 陈定岳. 基于脉冲涡流技术的带包覆层管道内壁局部 腐蚀检测研究[Z]. 国家科技成果, 2017. CHEN Ding-yue. Investigation of Local Corrosion Detection of Inner Wall of Pipeline with coating based on Pulsed Eddy Current Technology[Z]. National Scientific and Technological Achievements, 2017.
- [6] 郑岗,刘丁,张震,等. 基于提离点的脉冲涡流测厚研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1745-1749.
 ZHENG Gang, LIU Ding, ZHANG Zhen, et al. Research

on Thickness Measurement Based on Lift-off Intersection of Pulsed Eddy Current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8): 1745-1749.

- [7] 张震. 脉冲涡流测厚技术研究[D]. 西安: 西安理工大 学, 2007.
 ZHANG Zhen. Research on the Metal Thickness Measurement of Pulsed Eddy Current[D]. Xi'an: Xi'an Univer-
- sity of Technology, 2007.
 [8] 冯小勤,魏东旭. 脉冲涡流测厚参数的优化[J]. 淮阴师 范学院学报(自然科学版), 2010, 9(6): 481-483.
 FENG Xiao-qin, WEI Dong-xu. The Parameter Optimization of Pulsed Eddy Current Thickness Measurement[J].
 Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science), 2010, 9(6): 481-483.
- [9] 吴鑫, 李方奇, 石坤, 等. 脉冲涡流测厚技术理论与应用[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 20-23.
 WU Xin, LI Fang-qi, SHI Kun, et al. Theory and Application of Thickness Measurement Technique by Pulsed Eddy Current[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 20-23.
- [10] 柯海, 徐志远, 黄琛, 等. 基于信号斜率的铁磁性材料 脉冲涡流测厚研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2376-2381.
 KE Hai, XU Zhi-yuan, HUANG Chen, et al. Research on Thickness Measurement of Ferromagnetic Materials Using Pulsed Eddy Current Based on Signal Slopes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2376-2381.
- [11] 付跃文,康小伟,喻星星.带包覆层铁磁性金属管道局 部腐蚀的脉冲涡流检测[J].应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 786-795.
 FU Yue-wen, KANG Xiao-wei, YU Xing-xing. Detection

of Localized Corrosion in Ferromagnetic Metal Pipe under Insulation with Pulsed Eddy Current Testing[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4): 786-795.

[12] 辛伟, 丁克勤, 黄冬林, 等. 基于 ANSYS 的脉冲涡流 激励参数选取的仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2010(2): 58-60.
XIN Wei, DING Ke-qin, HUANG Dong-lin, et al. Simulation and Analysis of Selected Excitation Parameters on

Pulsed Eddy Current Based on ANSYS[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2010(2): 58-60.

[13] 徐志远,武新军,黄琛,等.有限厚铁磁性试件脉冲涡流响应研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2011, 39(6):91-95.

XU Zhi-yuan, WU Xin-jun, HUANG Chen, et al. Pulsed Eddy Current Response to a Ferromagnetic Specimen with Finite Thickness[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 91-95.

- [14] 陈兴乐, 雷银照. 铁磁平板脉冲涡流场感应电压时域 近似式[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 14-19. CHEN Xing-le, LEI Yin-zhao. Time-Domain Approximate Expressions for Voltage Induced by Pulsed Eddy Current Field of Ferromagnetic Plate[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 14-19.
- [15] 张斌强.脉冲涡流检测系统的设计与研究[D].南京: 南京航空航天大学, 2009.
 ZHANG Bin-qiang. The Design and Research of Pulsed Eddy Current Testing System[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [16] 刘世杭,过玉清.脉冲涡流感应测量方法的研究[J].东 华大学学报(自然科学版), 2001, 27(6): 49-52.
 LIU Shi-hang, GUO Yu-qing. Research of Pulsed Eddy Current Induction Testing Method[J]. Journal of Donghua University, Natural Science, 2001, 27(6): 49-52.
- [17] 宫吴,郝宪锋,王安泉,等.脉冲涡流检测激励参数和
 激励线圈参数的优化设计[J].无损检测,2020,42(3):
 20-25.

GONG Hao, HAO Xian-feng, WANG An-quan, et al. Optimization Design of Excitation Parameters and Excitation Coil Parameters in Pulsed Eddy Current Testing[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2020, 42(3): 20-25.

- [18] 朱红运, 王长龙, 江涛, 等. 激励电流对脉冲涡流检测 的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 1-8. ZHU Hong-yun, WANG Chang-long, JIANG Tao, et al. Study on the Effect of Excitation Current on Pulsed Eddy Current Testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 1-8.
- [19] 周德强, 闫向阳, 尤丽华. 激励参数对脉冲涡流缺陷检测的仿真分析[J]. 无损检测, 2012, 34(10): 8-11. ZHOU De-qiang, YAN Xiang-yang, YOU Li-hua. Simulation on the Defect Effect of Excitation Parameters Using

Pulsed Eddy Current Testing[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2012, 34(10): 8-11.

 [20] 徐志远,武新军,黄琛,等.激励参数和试件电磁参数 对脉冲涡流检测影响的仿真分析[J].无损检测,2011, 33(6): 1-4.
 XU Zhi-yuan, WU Xin-jun, HUANG Chen, et al. Analy-

sis of the Effect of Excitation and Specimen Electromagnetic Parameters on Pulsed Eddy Current Testing Signal with Simulation Method[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2011, 33(6): 1-4.

- [21] 王金凯. 基于磁导体架构的管道周向缺陷涡流检测探 头设计与分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
 WANG Jin-kai. Design and Analysis of Eddy Current Probe for Small Diameter Tubes Based on Magnetic Conductor Framework[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [22] 邓炜,高斌,汤光平,等. 多层金属材料内部缺陷的脉冲涡流探头优化研究[C]//2016 远东无损检测新技术论坛——现代无损检测要素——先进技术+高素质人员论文集.南昌:南昌航空大学,2016.
 DENG Wei, GAO Bin, TANG Guang-ping, et al. Finite Element Modeling of Pulsed Eddy Current Probe Structure Optimization for Inner Defect NDT of Multilayer Metal Material[C]//2016 Far East New Technology Forum —Modern Nondestructive Testing Elements—Advanced Technology+High-Quality Personnel Paper Collection. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [23] 周德强,张斌强,王海涛,等.脉冲涡流圆柱型探头参数的优化设计[J].无损检测,2012,34(9):7-11. ZHOU De-qiang, ZHANG Bin-qiang, WANG Hai-tao, et al. Optimization Design of Pulsed Eddy Current Circular Probe[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2012, 34(9):7-11.
- [24] 张玉华. 基于场一路耦合模型的涡流探头设计及提离 干扰抑制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
 ZHANG Yu-hua. Research on Design of Eddy Current

Probe and Suppression of Probe's Lift-off Noise Based on Field-Circuit Coupled Modeling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

[25] 胡树丞.基于有限元法的钢辊表面涡流探伤仿真分析
[D].包头:内蒙古科技大学,2019.
HU Shu-cheng. Simulation Analysis of Surface Eddy Current Inspection of Steel Roller Based on Finite Element Method[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.

[26] 周海婷, 厚康, 潘红良, 等. 基于有限元分析的涡流传 感器性能研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016(11): 14-18. ZHOU Hai-ting, HOU Kang, PAN Hong-liang, et al. Research of Eddy Current Sensor Performance Based on Finite Element Analysis[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(11): 14-18.

责任编辑:刘世忠