

# 脉冲电磁缺陷检测融合机理研究

潘萌<sup>1,2</sup>, 周德强<sup>1,2</sup>✉, 常祥<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡, 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡, 214122)

**摘要** 针对铁磁性构件表面和下表面缺陷检测的难题,建立了脉冲电磁检测模型,揭示了表面缺陷和下表面缺陷的脉冲漏磁与脉冲磁阻检测相融合的物理机制。仿真与实验结果表明:铁磁性构件表面缺陷存在漏磁,而下表面缺陷主要体现在脉冲磁阻的变化。对于不同深度的铁磁性构件表面缺陷,GMR传感器拾取的脉冲漏磁响应信号的检测结果线性度更好,灵敏度更高;对于不同深度的铁磁性构件下表面缺陷,双侧检测线圈拾取的脉冲磁阻响应特征值与缺陷深度的变化关系呈近似线性增长关系,区分度较大,检测性能更好。

**关键词** 脉冲电磁检测;脉冲漏磁检测;脉冲磁阻检测;缺陷

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.015

**中国分类号**:TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0085-06

## Research on the Fusion Mechanism of Pulsed Electromagnetic for Defect Detection

PAN Meng<sup>1,2</sup>, ZHOU Deqiang<sup>1,2</sup>✉, CHANG Xiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;

2. The Key Laboratory for Advanced Food Manufacturing Equipment Technology of Jiangsu Province, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that the defects of surface and subsurface are very hard to detect on the ferromagnetic components, the pulsed electromagnetic testing model is established. The physical mechanism of a method composed of the pulsed magnetic flux leakage (PMFL) and pulsed magnetic reluctance (PMR) under the surface and subsurface defect is revealed. Both the simulation and experimental results indicate that the magnetic flux leakage exists in the surface defect of ferromagnetic, but the subsurface defect detecting signal is the change of the pulsed magnetic resistance. For the different depth of the surface defects, the pulse leakage magnetic response signal picked by GMR sensor is better linearity and higher sensitivity; For the different subsurface defects of ferromagnetic components, the relationship between the characteristic value of the pulse magneto-resistance response and the depth of the defects is similar to the linear growth relationship, and the discrimination degree is larger and the detection performance is better.

**Key words:** pulsed electromagnetic testing; pulsed magnetic flux leakage; pulsed magnetic reluctance; defect

铁磁性构件在石油管道、输气管道、铁路轨道、桥梁等领域广泛应用,因此对于结构简单、价格低廉且检

**收稿日期:** 2017-03-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(51107053);教育部重点实验室基金(ZD201629001)

**作者简介:** 潘萌(1992—),女,江苏徐州人,硕士生,主要从事电磁无损检测研究. E-mail:1638781747@qq.com

**通讯作者:** 周德强(1979—),男,湖北天门人,副教授,主要从事电磁无损检测研究. E-mail:zhoudeqiang@jiangnan.edu.cn

**引用格式:** 潘萌,周德强,常祥. 脉冲电磁缺陷检测融合机理研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6):85-90. PAN Meng, ZHOU Deqiang, CHANG Xiang. Research on the Fusion Mechanism of Pulsed Electromagnetic for Defect Detection[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6):85-90.

测效率高,检测效果好的检测系统具有很大的市场需求。

针对铁磁性构件的缺陷检测,J Wilson 和 G Y Tian 采用 U 型磁轭绕制单侧检测线圈实现对下表面缺陷的检测<sup>[1]</sup>;Wang P 等人提出采用阵列传感器的方法实现对钢轨表面水平和垂直裂纹缺陷的快速识别与评估,但是阵列传感器在实际的检测过程中受提高高度的影响较大,被测缺陷的相对位置也会对检测结果产生影响<sup>[2]</sup>;Antipov A G 等人将漏磁技术应用于钢轨表面横向裂纹的在线检测,实现对缺陷深度的定量评估<sup>[3]</sup>,但是对于钢轨下表面的缺陷检测和深度评估没有作深入研究。

本文提出脉冲漏磁和脉冲磁阻相融合的检测方法和在 U 型磁轭上绕制双侧检测线圈的检测方式。

## 1 理论分析

### 1.1 脉冲漏磁检测原理

脉冲漏磁检测过程中,激励探头在脉冲激励的作用下,被测试件达到局部磁饱和的状态,由于试件表面存在缺陷,形成几何体的不连续性,缺陷部位的磁场会泄露到试件上方的空气域中,此时磁场传感器通过拾取漏磁场部位的磁场信号,实现对缺陷的定位检测,通过对响应信号中时域的信息进行进一步的分析,实现对缺陷检测深度的定量分析<sup>[4-8]</sup>。

电磁场渗入试件内部的深度称为渗透深度,将感应磁场密度衰减为表层数值的  $1/e(37\%)$  时的渗入深度定义为标准渗透深度,也称为趋肤深度<sup>[9-10]</sup>。其计算公式为:

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

式中: $f$  为激励信号频率; $\mu$  为磁导率; $\sigma$  为电导率。由式(1)可知, $\delta$  随着  $f$  的增大而减小,即趋肤深度随着激励频率的增大而减小。

周期性的脉冲方波具有高频成分和低频成分,2 种成分的分量随着时间进行周期性变化<sup>[11]</sup>,根据式(1),低频分量可以提高激励的渗透深度,高频成分可以提高检测的灵敏度。缺陷深度的信息主要集中在感应信号的低频部分,因此选择的激励信号频率应低于  $50 \text{ Hz}$ <sup>[5]</sup>。

### 1.2 脉冲磁阻检测原理

本文采用的 U 型磁轭,激励线圈绕制在磁轭的水平部位,将检测线圈分别同时绕制在 U 型磁轭的 2 个极靴部位,构成双侧线圈检测方式。依据电磁阻检测机理进行缺陷检测分析,电磁阻( $R$ )的计算公式为:

$$R = \frac{l}{\mu_r \mu_o S} \quad (2)$$

式中: $\mu_r$  和  $\mu_o$  为磁导率; $l$  为磁通量回路的长度, $S$  为导体磁回路的横截面积。

由闭合磁路定理可知,闭合磁路的磁通势等于磁路上磁势降的和,因此磁通势  $\epsilon_m$  与磁阻  $R$  之间的关系为:

$$\epsilon_m = N_1 i = \Phi R \quad (3)$$

式中: $N_1$  为激励线圈匝数; $i$  为激励电流。则闭合磁路的磁通量计算公式为:

$$\Phi = \frac{N_1 i}{R} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,检测线圈获得的感应电压  $u$  为:

$$u = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

式中: $N_2$  为检测线圈匝数。由于缺陷处和无缺陷处的磁导率变化会引起电磁阻的变化,由式(4~5)可以看出,磁阻的变化会引起通过检测线圈磁通量的变化,从而导致检测检测线圈感应电压的变化,因此通过绕制在极靴上的检测线圈可以实现对构件缺陷深度的测量。

## 2 仿真分析

### 2.1 脉冲激励下仿真模型建模

本文采用有限元仿真软件 COMSOL4. 3b,建立三维的 U 型探头脉冲漏磁检测模型,结果见图 1(a)。其中,U 型磁轭采用铁氧体材料,其相对磁导率为 4 000。仿真所建模型中 U 型探头和被测试件的结构尺寸见图 1(b)。根据脉冲激励具有时域性的特点<sup>[12-15]</sup>,对所建模型的瞬态磁场进行分析。表 1 为仿真模型材料的具体参数。

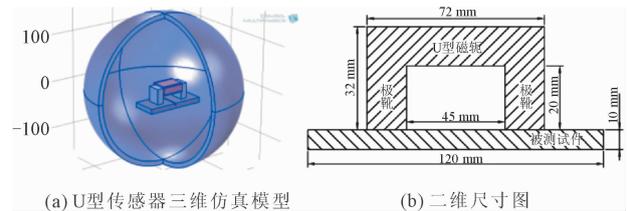


图 1 脉冲电磁检测的有限元建模

Fig. 1 The finite element modeling of pulsed electromagnetic detection

表 1 仿真模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of simulation model

物理量	材料属性	电导率 ( $S \cdot m^{-1}$ )	相对介电常数	相对磁导率
激励线圈	铜	$6 \times 10^7$	1	1
试件	铁	$1.12 \times 10^7$	1	4 000
空气域	空气	0.001	1	1

### 2.2 脉冲激励磁化场分布特性

为了研究脉冲激励下铁磁性构件表面缺陷和下表面缺陷磁化场的分布和渗透规律,仿真过程中保持激励频率的大小不变,被测试件的表面和下表面缺陷深度的大小设置为:2 mm、4 mm、6 mm 和 8 mm。图 2 和图 3 分别给出了不同深度的表面缺陷和下表面缺陷在中心截面上的磁感应强度 Z 分量。

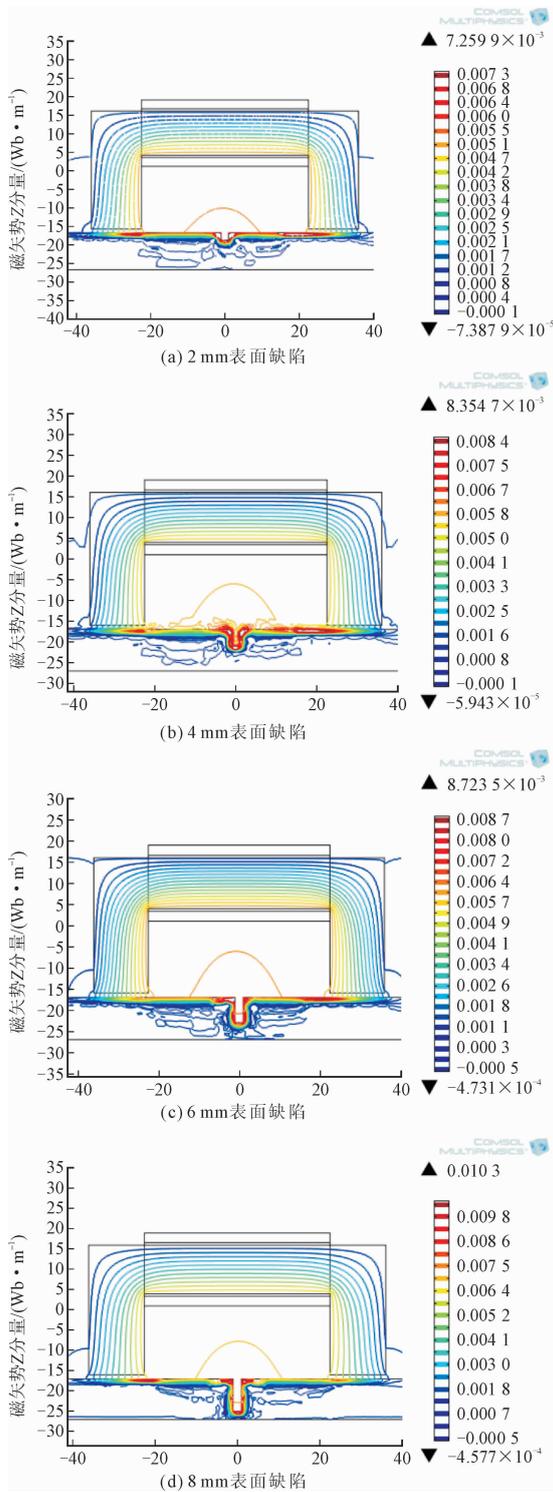


图 2 不同表面缺陷深度下磁力线分布

Fig. 2 The distribution of the magnetic field lines under different surface defect depth

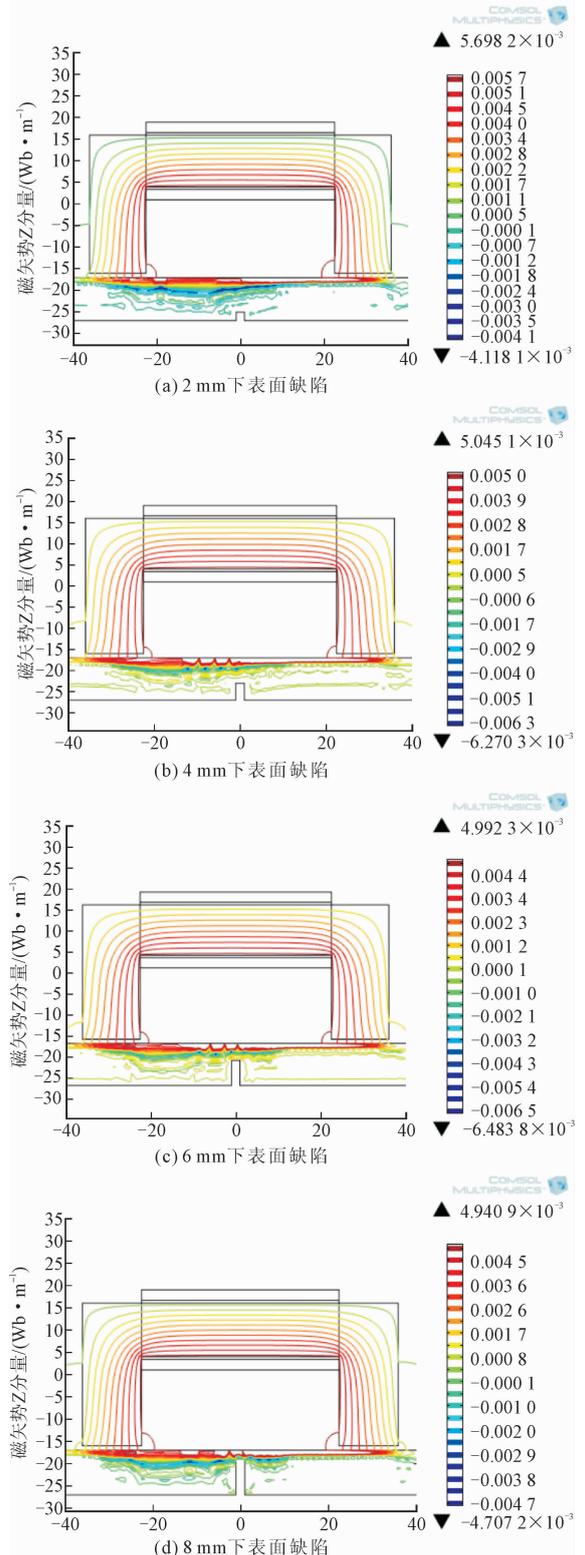


图 3 不同下表面缺陷深度下磁力线分布

Fig. 3 The distribution of the magnetic field lines under different subsurface defect depth

对于表面缺陷,在相同的激励条件下,从图 2 中可以得出,2 mm、4 mm、6 mm、8 mm 的缺陷所对应的磁感应强度最大值分别为  $7.2599 \times 10^{-3}$  Wb/m、 $8.3547 \times 10^{-3}$  Wb/m、 $8.7235 \times 10^{-3}$  Wb/m、0.0103 Wb/m,仿真结果表明,磁力线在缺陷部位形成漏

磁,随着缺陷深度的增加,缺陷上方的磁力线的幅度也在增大,磁感应强度大小也随之增加,因此可以在缺陷部位设置磁传感器,通过拾取缺陷部位的脉冲漏磁响应信号实现对缺陷深度的定量分析。

从图3可以看出,在被测试件的表面不存在漏磁现象,但是,随着下表面缺陷深度的增加,2 mm、4 mm、6 mm、8 mm的缺陷所对应的磁感应强度最大值分别为 $5.6982 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}$ 、 $5.0451 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}$ 、 $4.9923 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}$ 、 $4.9409 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}$ ,说明在磁轭与试件之间所形成的磁场发生了变化,即通过U型磁轭极靴的磁通量发生了变化,磁阻的大小随着磁通量的减小而增大,因此可以在U型磁轭的极靴部位设置检测线圈,通过分析磁场的变化量与脉冲响应信号之间的关系实现对下表面缺陷的评估。

采取传感器固定被测试件移动的方式,提取缺陷深度为2 mm时距离检测中心不同移动距离的仿真响应结果,提取磁矢势Z分量响应的最大值结果见图4,当缺陷进入U型传感器检测范围内时,磁矢势的响应结果明显高于非缺陷区域,且当缺陷位于U型磁轭中心部位时的响应值最大。

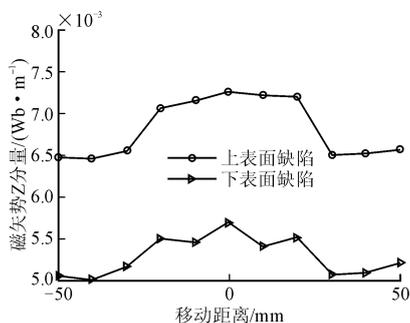


图4 不同移动距离的仿真结果

Fig. 4 The simulation results of different moving distances

根据上述仿真结果,提出采用脉冲漏磁与脉冲磁阻相融合的检测方法,在相同的激励条件下:对于铁磁性构件表面缺陷,通过磁传感器拾取缺陷部位的脉冲漏磁检测信号;对于下表面缺陷,在U型磁轭极靴部位绕制检测线圈,用于拾取缺陷部位的脉冲磁阻检测信号。在极靴部位绕制检测线圈对脉冲磁阻响应进行检测的方式一般有2种:单侧线圈检测和双侧差分线圈检测,本文提出一种新的检测方式:双侧串联线圈检测。这3种检测方式的结构见图5。

对这3种检测方式进行有限元仿真,极靴每一侧的线圈绕制匝数为600匝,在相同的激励条件下仿真下表面缺陷深度为2 mm的结果见图6。

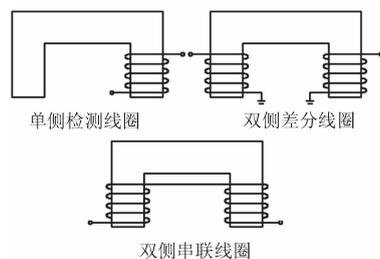


图5 不同的检测线圈结构

Fig. 5 Different detection coil structure

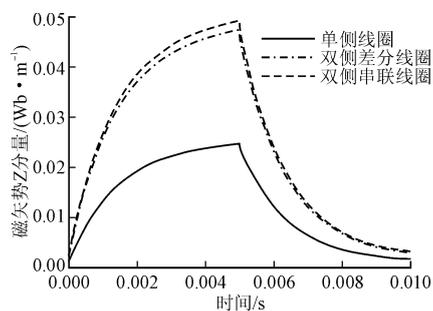


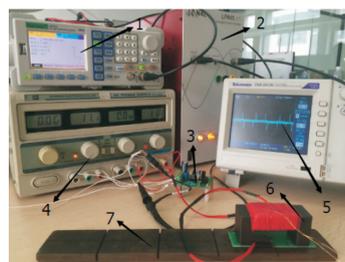
图6 不同的脉冲磁阻检测方法响应结果

Fig. 6 The response of different pulse reluctance detection methods

## 3 实验分析

### 3.1 实验平台

为了验证本文方法,以带有人工缺陷的Q235钢板作为检测对象,搭建脉冲电磁检测的实验系统。实验系统整体构成的实物图见图7。



1-信号发生器;2-功率放大器;3-信号调理电路;4-直流稳压电源;5-示波器;6-U型传感器;7-铁磁性材料被测试件

图7 检测系统实物图

Fig. 7 Photograph of testing system

在本实验中,采用ET3325波形信号发生器,生成5 Hz的脉冲方波作为激励信号;选用LPA05型功率放大器对激励信号进行放大;激励线圈采用线径为0.3 mm的铜制漆包线绕制800匝;检测线圈采用线径为0.1 mm的铜制漆包线,在U型磁轭的极靴部位分别绕制600匝;U型磁轭采用具有高导磁性铁氧体材料,与仿真模型的尺寸大小一致。对于设计的双侧线圈检测方式,将两侧的检测线圈

引线一端连接在一起,相当于将两侧的检测线圈串联,另一端两侧的引线连接到信号调理电路。磁敏传感器选用 GMR 传感器(AA004-02E),GMR 均置于 U 型磁轭两极靴中间的部位,并通过焊接的 PCB 电路板进行结构固定,检测信号输入到信号调理电路中进行处理。

通过搭建的实验检测系统来研究不同的检测方式检测信号与缺陷深度之间的关系,在 Q235 钢板上制作宽度为 2 mm,深度分别为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm 的缺陷。

### 3.2 铁磁性构件表面缺陷的检测

在脉冲漏磁检测铁磁性构件表面缺陷检测实验中,缺陷部位的漏磁场信号分别通过 GMR 传感器和检测线圈分别进行拾取。

GMR 传感器拾取的脉冲漏磁响应信号见图 8(a),可以看出,其对于不同深度的检测缺陷在峰值上呈现明显的区分,随着缺陷深度的增加,峰值大小不断增大,这与仿真结果一致。

图 8(b)为双侧检测线圈拾取脉冲磁阻响应信号,可以看出,表面缺陷深度的增加,响应信号的峰值随之增大,根据式(5)可以得出磁感应强度的变化量与检测线圈拾取的压降值互为相反数,因此检测结果与仿真结果的变化趋势一致。

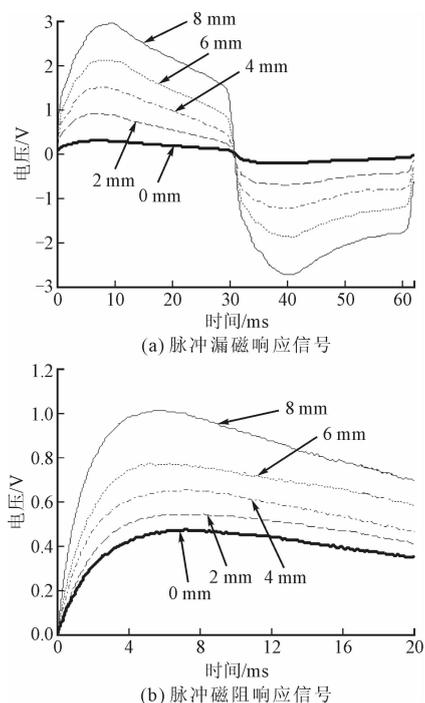


图 8 表面缺陷响应信号

Fig. 8 The surface defect detect signal

取 0 mm 位置的脉冲响应信号作为参考信号,将不同深度缺陷部位的检测信号与参考信号作差,得到差分脉冲响应信号,提取差分脉冲响应信号的

最大值作为特征值<sup>[16]</sup>。

2 种检测方式的结果对比见图 9,可以看出,双侧检测线圈拾取的响应信号特征值与 GMR 检测方式相比较区分度不明显,且随缺陷深度的增加呈非线性增长趋势。

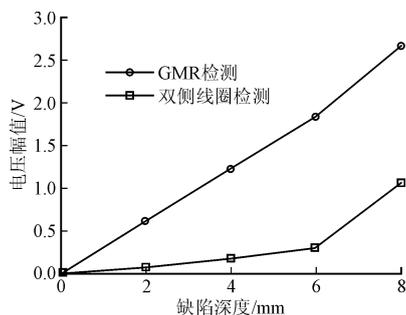


图 9 表面缺陷两种检测方式对比

Fig. 9 The comparison of surface defect testing method

### 3.3 铁磁性构件下表面缺陷的检测

将被测试件翻转,使得缺陷朝下,形成下表面缺陷。双侧检测线圈和 GMR 传感器拾取的检测结果见图 10。

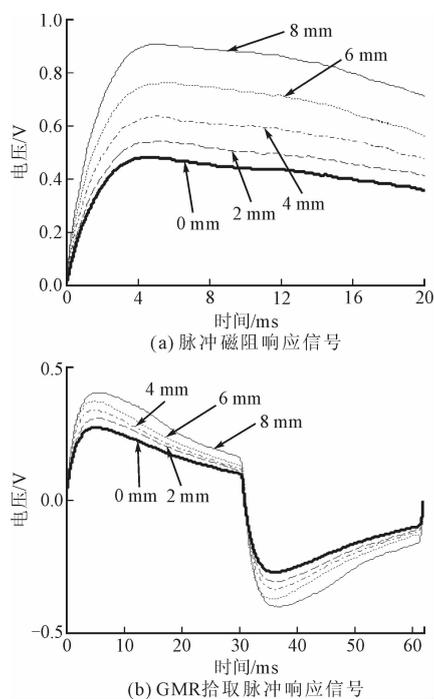


图 10 下表面缺陷响应信号

Fig. 10 The sub-surface defect detect signal

与表面缺陷的检测结果对比可见,随着缺陷深度的增加,双侧检测线圈拾取的脉冲磁阻响应信号幅度较大。GMR 传感器拾取的脉冲响应信号增长幅度较小。

对 2 种检测方式的脉冲响应信号进行差分处理,提取差分响应信号的幅值作为特征值,与缺陷深度之间的对应关系输出结果见图 11。对于双侧线

圈检测方式,拾取下表面缺陷响应信号特征值变化曲线呈近似线性增长关系,且不同深度下的响应信号特征值有着明显的区分;对于 GMR 检测方式,响应信号特征值与下表面缺陷深度之间的关系呈线性增长,但双侧检测线圈线性增长的趋势更明显,不同的检测深度下响应信号的区分度更大,因此检测下表面缺陷深度效果更好。

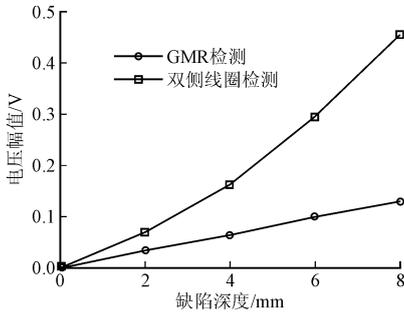


图 11 下表面缺陷两种检测方式对比

Fig. 11 The comparison of sub-surface defect testing

## 4 结论

通过有限元仿真分析铁磁性构件表面缺陷和下表面缺陷的磁感线分布,得出铁磁性构件表面缺陷存在漏磁,而下表面缺陷主要体现在脉冲磁阻的变化。实验对比了不同的检测方式下响应信号与检测深度之间的变化规律,得出如下结论:

1)对于铁磁性构件表面缺陷,GMR 传感器拾取的脉冲漏磁响应信号的检测结果线性度更好,灵敏度更高;

2)对于铁磁性构件下表面缺陷,双侧检测线圈拾取的脉冲磁阻响应特征值与缺陷深度的变化关系呈近似线性增长关系,区分度较大,检测性能更好。

## 参考文献(References):

[1] WILSON J, TIAN G. Pulsed Electromagnetic Methods for Defect Detection and Characterization [J]. NDT&E International, 2007, 40: 275-283.

[2] WANG P, XIONG L H, SUN Y C, et al. Features Extraction of Sensor Array Based Pmfl Technology for Detection of Rail Cracks [J]. Measurement, 2014, 47(1): 613-626.

[3] ANTIPOV A G, MARKOV A A. Evaluation of Transverse Cracks Detection Depth in MFL Rail NDT [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50(8): 481-490.

[4] WILSON J, TIAN G Y, MUKRIZ I, et al. PEC Thermography for Imaging Multiple Cracks From Rolling Contact Fatigue [J]. NDT&E International, 2011, 44: 505-512.

[5] GOTOH Y J, TAKAHASHI N. Proposal of Detecting Method of Outside Crack by Alternating Flux Leakage Testing Using 3-D Nonlinear FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1415-1415.

[6] SUN Y H, KANG Y H. High-Speed Magnetic Flux Leakage Technique and Apparatus Based on Orthogonal Magnetization for Steel Pipe [J]. Mater Eval, 2010, 68(4): 452-458.

[7] DU Z Y, RUAN J J, PENG Y, et al. 3-D FEM Simulation of Velocity Effects on Magnetic Flux Leakage Testing Signals [J]. IEEE Trans Magn, 2008, 44(6): 1642-1645.

[8] FERRÉ J, METAXAS P J, M A, et al. Universal Magnetic Domain Wall Dynamics in the Presence of Weak Disorder [J]. Comptes Rendus Phys, 2013, 14(8): 651-666.

[9] MA Y L, HE R Y, CHEN J Z. A Method for Improving SNR of Drill Pipe Leakage Flux Testing Signals by Means of Magnetic Concentrating Effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015: 105-112.

[10] Wilson John, TIAN G Y, Licciardi S. Feature Extraction and Integration for the Quantification of Pmfl Data [J]. Nondestruct Test Eval, 2010, 25(2): 101-109.

[11] ANDERS R. Efficient Finite Element Modelling of Eddy Current Probability of Detection with Transmitter-Receiver Sensors [J]. NDT&E International, 2015, 75: 48-56.

[12] KANG Y H, LI J Z, et al. A Dynamics Study of a Magnetic Flux Leakage (MFL) Signal and Its Application to Defect Location Discrimination in Steel Pipes MFL Testing Equipment [J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2009, 2: 70-77.

[13] DESJARDINS D, KRAUSE T W, CLAPHAM L. Transient Response of a Driver-Pickup Coil Probe in Transient Eddy Current Testing [J]. NDT&E International, 2015, 75: 8-14.

[14] HOUSSEM Haddar, JIANG Z X, Armin Lechleiter. Artificial Boundary Conditions for Axisymmetric Eddy Current Probe Problems [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2014 (68): 1844-1870.

[15] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 2: 327-336.

WU D H, YOU D H, LIU Z L, et al. Mechanism and Experimental Research on Skin Depth in Ac Magnetic Flux Leakage Testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 2: 327-336. (in Chinese)

[16] GOTOH Y, TAKAHASHI N. Study on Problems in Detecting Plural Cracks by Alternating Flux Leakage Testing Using 3-D Nonlinear Eddy Current Analysis [J]. IEEE Transactions on magnetics, 2003, 39(3): 1527-1530.