

# 宽带激励下的低频电磁检测技术

焦敬品, 梁文圆, 李光海, 吴斌, 何存富

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:** 针对铁磁性构件损伤检测的需求, 进行了宽带激励下的低频电磁检测技术研究。通过有限元仿真, 研究了励磁信号频带对低频电磁场分布的影响; 对宽带激励下低频电磁检测信号进行了相似度分析, 提出了一种基于宽频响应欧式距离的缺陷表征方法。在以上研究基础上, 进行了铁磁性结构缺陷检测试验, 结果表明, 与传统单频励磁的低频电磁检测技术相比, 宽频激励检测技术能够大幅提高低频电磁场的穿透能力, 基于宽频响应的欧式距离的表征方法对内部埋藏缺陷的检测能力和空间分辨能力更强。该研究工作为铁磁性构件大范围损伤检测提供了可行的技术方案。

**关键词:** 低频电磁; 铁磁材料; 宽带激励; 相似度分析; 无损检测

中图分类号: O441.5; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)06-0006-06

## Low-frequency electromagnetic detection technology under broadband excitation

JIAO Jingpin, LIANG Wenyuan, LI Guanghai, WU Bin, HE Cunfu

(School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China)

**Abstract:** In view of the defect detection in ferromagnetic structure, research is focused on low frequency electromagnetic technique under broadband excitation. Finite element analysis is conducted to investigate the effect of excitation bandwidth on electromagnetic field distribution in structure. The detection signals were analyzed by similarity method, and Euclidean distance was proposed for defect characterization. Low frequency electromagnetic experiments were conducted for defect detection in ferromagnetic structure. The results show that the electromagnetic field penetrability can be improved by broadband excitation, and the spatial resolution and the ability for interior defect detection by low frequency electromagnetic technique are more powerful if using the Euclidean distance of response under broadband excitation. The research provides a potential scheme for a wide range defect detection in ferromagnetic structure.

**Key words:** low frequency electromagnetic; ferromagnetic material; broadband excitation; similarity analysis; nondestructive testing

低频电磁检测技术是一种基于交流漏磁与涡流检测原理的快速电磁无损检测技术<sup>[1-4]</sup>。低频电磁检测技术因具有检测频率低、受趋肤效应影响较小、检测设备体积小、扫查灵活以及检测信号丰富等优点而被广泛使用<sup>[5-6]</sup>。SINGH 等<sup>[7-8]</sup>利用

低频电磁检测信号的幅值特征参量, 实现了铁磁性管道中轴向和径向人工刻槽与磨损缺陷的定量表征。JINGPIN 等<sup>[9]</sup>研究了在交流正弦励磁场条件下, 电磁检测信号的幅值和相位两种特征参量对不同深度上、下表面缺陷的检测能力。结果表明, 相位特征参量对下表面的缺陷更为敏感。HOSSEINI 等<sup>[10]</sup>利用检测信号中的阻抗实现了多层板结构中埋藏缺陷的有效检测及分类。综上所述, 国内外研究学者就低频电磁检测技术开展了卓有成效的研究, 但上述检测方法对被测试件表面及近表面缺陷较为敏感<sup>[11]</sup>, 对构件中埋藏缺陷

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972053)

作者简介: 焦敬品(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事新型无损检测方法的研究工作

通信作者: 焦敬品, jaojp@bjut.edu.cn

的检测能力有限。

针对铁磁性构件内部埋藏缺陷检测的问题, 笔者开展了宽频激励下的低频电磁检测试验。通过数值仿真, 研究了励磁信号频带对低频电磁场分布的影响。在此基础上, 提出了一种基于宽带励磁响应对应欧式距离的低频电磁缺陷表征方法, 并将其应用于铁磁性构件的内部埋藏缺陷检测。

## 1 宽带激励下低频电磁检测技术

### 1.1 低频电磁场数值仿真

在 COMSOL 有限元仿真软件中, 选用 AC/DC(交流/直流)模块中的电磁场, 建立低频电磁检测三维简化模型(见图 1)。该三维模型由低频电磁检测传感器和待测铁磁试件两部分组成。其中, 传感器的励磁部分为电磁铁, 主要由 U型磁芯和在其上缠绕的激励线圈组成, 磁芯的材料为锰锌铁氧体。

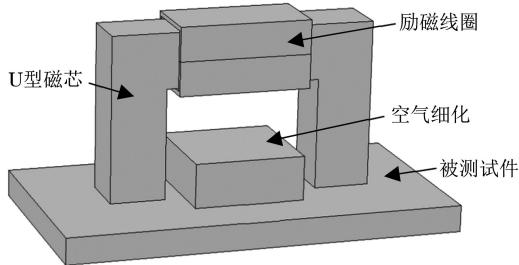


图 1 低频电磁检测三维仿真模型

为得到平滑的仿真结果, 在进行网格划分时, 应使被测试件和磁芯中的网格尺寸小于周围空气区域的。此外, 笔者对处于监测区的空气域的网格进行了局部细化, 网格划分结果如图 2 所示。

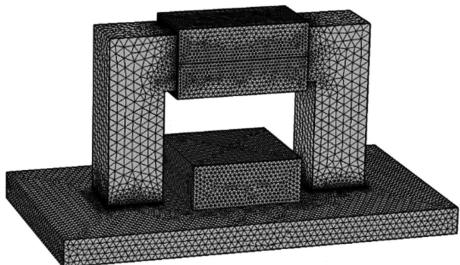


图 2 模型网格划分结果

仿真模型中被测试件为厚度为 12 mm 的 20 号钢板, 仿真模型参数设置如表 1 所示。基于上述模型, 分别以不同单一频率的交变简谐波和不同带宽的 Chirp 信号作为交流励磁信号, 对待测试件进行低频电磁检测数值仿真研究。

通过对不同带宽和激励频率下板状结构的低频电磁检测数值进行仿真可以看出, 被测试件中磁通

表 1 仿真模型参数设置

参数名称	参数设置
仿真模块	AC/DC 模块
物理场	磁场
磁芯相对磁导率	2 000
磁芯电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	100
磁芯相对介电常数	1
被测试件相对磁导率	150
被测试件电导率/(×10 <sup>6</sup> S·m <sup>-1</sup> )	8.4
励磁线圈匝数/匝	500
被测试件相对介电常数	1
励磁线圈直径/mm	0.6
最小网格尺寸/mm	0.205
网格数量/(总单元数)	145 6106
求解方式	线圈几何分析, 频域求解

密度分布具有明显的趋肤效应, 磁通密度在试件上表面最大, 沿深度逐渐减小, 在试件下表面最小, 试件中  $x$  方向典型磁通密度分布如图 3(单频激励)和图 4 所示(激励 Chirp 的带宽为 0~150 Hz)。此外, 励磁的频率和带宽对磁通密度的大小也有很大影响。图 5 为不同激励条件下, 被测试件中心位置处  $x$  方向的磁通密度沿试件深度的变化关系曲线。可以看出, 两种励磁方式下, 磁通密度均具有趋肤效应, 其数值均随深度的增加而减小; 宽频励磁下, 被测试件中的磁通密度明显大于单频励磁下的磁通密度, 且其数值在较深处仍较大。由此可见, 趋肤效应对宽带励磁下磁场的影响较小, 即宽带励磁下的磁场穿透能力较大, 更适合检测试件中的埋藏缺陷。

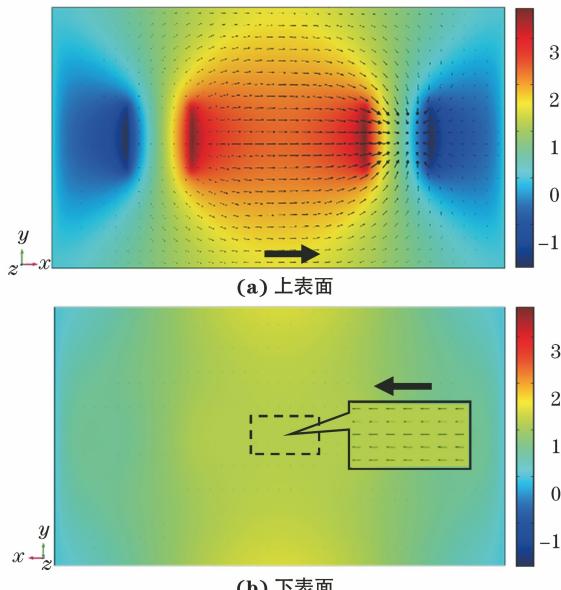


图 3 单频交变激励下被测试件  $x$  方向典型的磁通密度分布

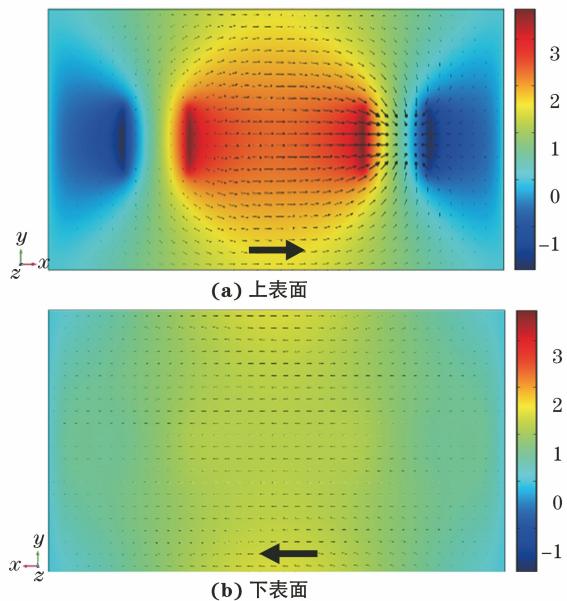


图 4 宽频激励下被测试件  $x$  方向典型的磁通密度分布

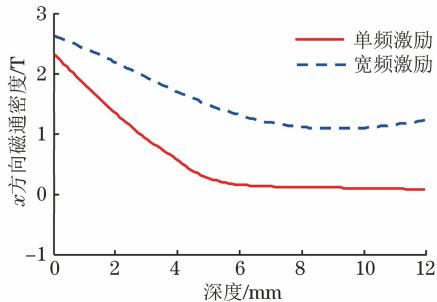


图 5 单频和宽频激励下磁通密度随深度变化的关系曲线

## 1.2 宽带励磁下低频电磁表征方法

在宽带励磁下,由待测试件得到的低频检测信号也属于宽带信号,其蕴含有更丰富的结构特征信息。相较而言,单频低频电磁检测得到的信号幅值和相位等常规参数难以充分反映检测信号所包含的信息。因此,笔者借鉴声学领域中检测信号的处理方法,以参考区域的宽带励磁响应作为参考信号,对宽带励磁下的低频检测信号进行相似度分析。通过对几种相似度算法进行比较,提出利用宽带励磁响应的欧式距离作为特征参数,用于表征铁磁性构件低频电磁检测信号的信息。其表达式为

$$E(H_d, H_n) = \sqrt{\left[ \sum (H_{di} - H_{ni})^2 \right]} \quad (1)$$

式中:  $E$  为欧式距离表征参量;  $H_d$  为待检测区域磁场强度;  $H_n$  为参考区域基准磁场强度;  $H_{di}$  为在频率  $f_i$  下待检测区域的磁场强度;  $H_{ni}$  为在频率  $f_i$  下参考区域的基准磁场强度。

为说明宽带励磁下低频电磁检测方法对埋藏缺陷的检测能力,对厚板的表面缺陷和内部埋藏缺陷

进行了数值仿真检测,待检板仿真模型如图 6 所示。两模型尺寸均为  $620 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ (长  $\times$  宽  $\times$  高),材料为 20 号钢,两模型的上下表面分别布置了 4 个槽型缺陷,其深度分别为 4.8, 6.0, 7.2, 9.6 mm。以宽带 chirp 信号作为励磁信号,进行不同带宽励磁下低频电磁检测数值仿真。提取两模型中各缺陷上方 1 mm 提离处  $x$  方向的宽频激励响应,同时,也提取两模型中相同提离距离下无缺陷处的宽频激励响应。以无缺陷处提取的信号作为参考,对缺陷上方提取的宽频响应进行相似度分析。

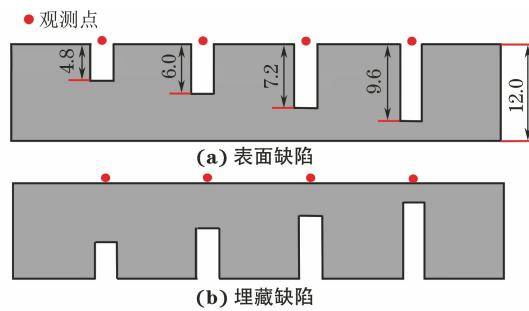


图 6 待检板仿真模型

宽频激励下低频电磁检测信号的欧式距离随带宽的变化规律如图 7 所示。由图 7 可以看出,不同缺陷处提取检测信号的欧式距离随激励带宽的增加呈递增趋势,但对于两种模型,欧式距离随缺陷尺寸的变化规律明显不同。

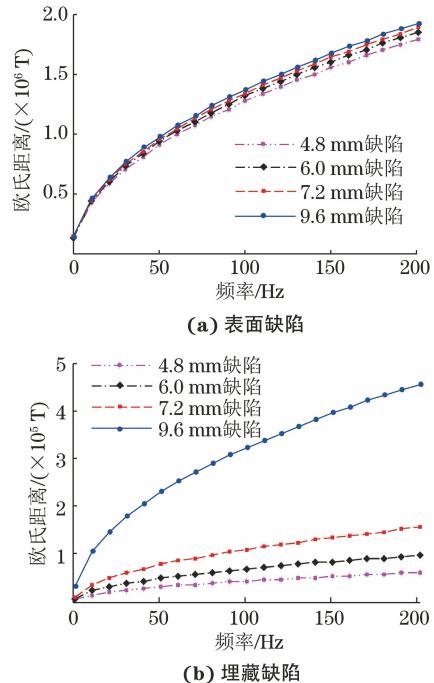


图 7 不同缺陷宽频激励下低频电磁检测信号的  
欧式距离随带宽的变化关系曲线

当缺陷位于板状结构的表面时[见图 7(a)],随

缺陷深度的增加,不同缺陷处提取信号的欧式距离虽略有增加,但其增加量相对于其数值分布范围很小;当试件中缺陷为埋藏缺陷时[见图 7(b)],不同缺陷处提取信号的欧式距离随缺陷深度的增加而增加,特别是当缺陷深度较大时,其增加幅度更明显。分析其原因,笔者认为两种模型缺陷深度增加涉及区域的磁场强度不同是造成这种结果的主要因素。当缺陷为埋藏缺陷时,缺陷深度增加的区域更靠近构件的上表面,其磁场强度更大;而当缺陷位于上表面时,缺陷尺寸增加的区域更远离试件上表面,受趋肤效应的影响,其磁场强度较小。因此,宽频励磁响应的欧式距离对埋藏缺陷深度的变化更敏感。

为说明提出的宽带激励低频电磁检测技术对埋藏缺陷的检测能力,对图 6 所示的不同缺陷位置和两模型进行单频 50 Hz 激励低频电磁检测仿真,不同激励下得到仿真检测结果(见图 8)。由图 8 可以看出,对于同一缺陷的检测,宽频励磁响应的欧式距离特征参数比单频励磁响应的幅值大两个数量级,且对缺陷深度变化更敏感。

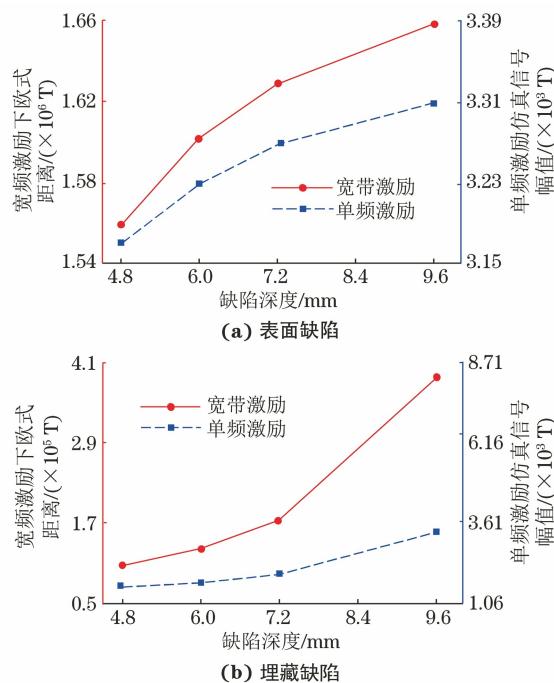


图 8 单频和宽频激励下不同位置缺陷的低频电磁仿真检测结果

需要指出的是,作为一种典型的相似度分析方法,欧式距离本质上是一种统计指标,因此宽频激励下欧式距离对缺陷的深度较敏感。由式(1)可知,欧式距离必定随带宽的增加而增大,宽频激励下的欧式距离必定比单频激励下的欧式距离大,但宽频下欧式距离与单频下欧式距离相差的具体数量级与多

种因素有关,如带宽范围、待检测材料的性能及缺陷尺寸及位置等。

## 2 低频电磁检测试验

### 2.1 试验系统

低频电磁检测试验系统主要由函数发生器、功率放大器、数字示波器、稳压电源、低频电磁传感器和待测试件等组成(见图 9)。其中,低频电磁传感器主要由 U 型锰锌铁氧体、励磁线圈、磁敏元件及屏蔽层等组成。试验过程中,传感器的提离距离为 1 mm。被测试件为 620 mm × 400 mm × 12 mm(长 × 宽 × 高)的 20 号钢试件,其上加工 4 个宽为 4 mm,长为 25 mm 的槽型缺陷,4 个缺陷深度分别为板厚的 40%(4.8 mm),50%(6 mm),60%(7.2 mm) 和 80%(9.6 mm),待检试件实物如图 10 所示。

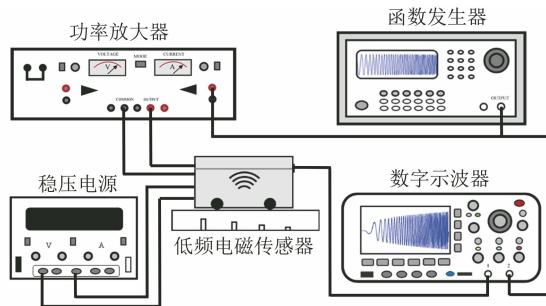


图 9 低频电磁检测系统组成

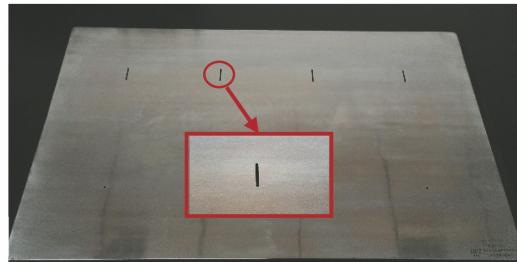


图 10 待检 20 号钢试件实物

为模拟表面缺陷和内部埋藏缺陷两种工况,将待检试件分别按图 11 所示的两种方式放置,进行单频励磁和宽频励磁两种模式的低频电磁检测试验。检测时,在各缺陷中心 ±15 mm 的范围内,以 1 mm 为步长进行扫查试验,同时记录各空间位置的低频检测信号。试验中,单频正弦激励信号的频率为 50 Hz,幅值为 3 V,宽带 Chirp 激励信号的幅值为 3 V,带宽为 0~150 Hz。放大器的放大倍数为 10 倍。对于单频励磁下的低频电磁检测信号,提取信号的幅值和相位用于表征试件不同空间位置的损伤状态;对于宽频励磁下的低频电磁检测信号,以无缺陷位置的检测信号为参考,计算空间不同位置检测信号相对

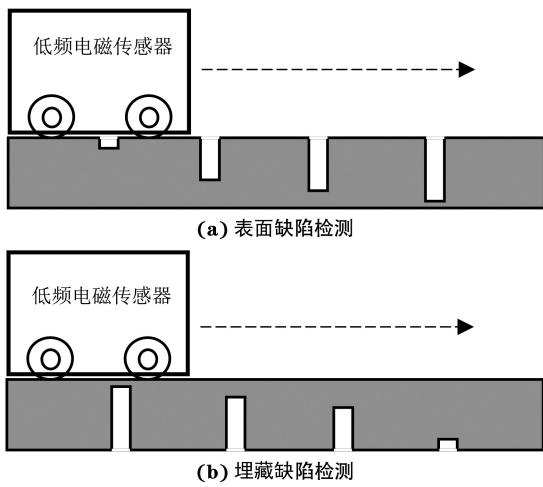


图 11 扫查方式示意

于参考信号的欧式距离,再用欧式距离表征试件不同位置的损伤状态。

## 2.2 试验结果分析

不同位置缺陷低频电磁检测模式下得到检测信号的幅值、相位差和欧式距离的空间分布分别如图 12,13 所示。由图 12 可以看出,当缺陷位于试件表面时,3 种特征参量的空间分布极为相似,即在缺陷处呈单峰凸起,且随深度增加表征参量峰值也呈递增趋势。因此,3 种参数均可以用于缺陷位置的表征,两种检测方法均可以实现不同深度的表面缺陷检测;但相对于幅值和相位差两种参数,欧式距离空间分布的指向性更强,因此,宽频励磁下低频电磁检测的空间分辨力更强。

由图 13 可以看出,含有埋藏缺陷试件的 3 种特征参量的空间分布与含有表面缺陷试件的对应参数的分布规律类似,即在缺陷处呈单峰突起,但对于有埋藏缺陷的情形,3 种特征参量随缺陷深度的变化规律有明显不同,能够检测出最小缺陷的深度也不同。当缺陷深度为 6.0 mm 和 4.8 mm 时,单频励磁响应对应幅值的空间分布在缺陷附近并未呈现明显的指向性。因此,单频励磁响应的幅值仅能实现尺寸为 9.6 mm 和 7.2 mm 的缺陷检测,即仅能实现埋藏深度为 2.4 mm 和 4.8 mm 的缺陷检测;当缺陷深度为 4.8 mm 时,单频励磁响应对应相位差的空间分布在缺陷附近并未呈现明显的指向性。因此,单频励磁响应的相位差不能实现埋藏深度为 7.2 mm 的缺陷检测;对于 4 种深度的缺陷,宽频励磁响应的欧式距离的空间分布在缺陷处均呈现明显的指向性。因此,宽频励磁响应的欧式距离能够实现 4 种深度下埋藏缺陷的检测,同时,与缺陷位于试件

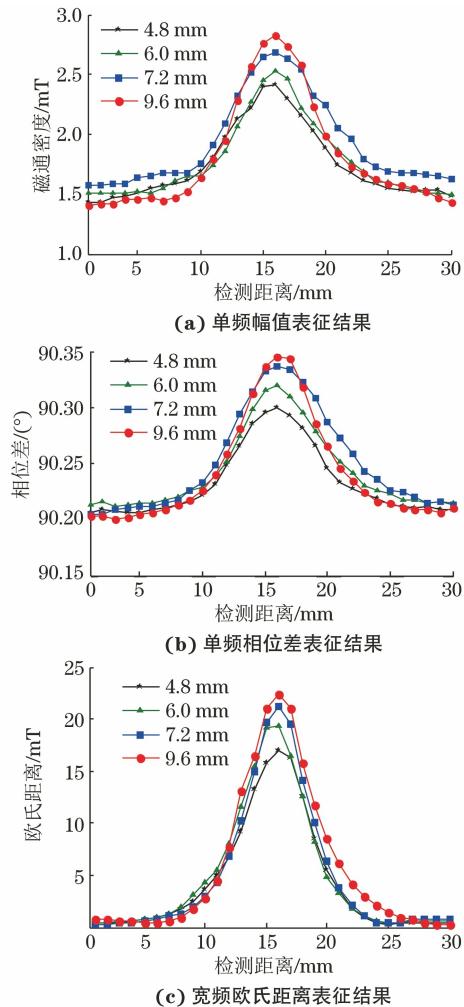


图 12 含表面缺陷试件的低频电磁检测结果

上表面的情形类似,宽频励磁响应对应欧式距离的空间分布的指向性也更强,对缺陷的空间分辨力也更强。

检测结果表明,两种检测模式对试件中埋藏缺陷的检测结果有很大的不同。对于宽频激励模式,虽然其埋藏缺陷检测结果的幅值略小,但可以实现所有深度埋藏缺陷的检测,且其变化规律与上表面缺陷的相似;对于单频检测模式,则不能实现深度较大的埋藏缺陷的检测。分析原因,笔者认为单频激励下(50 Hz),检测结果受趋肤效应的影响较严重,难以实现埋藏深度较大缺陷的检测;而宽频激励下(0~150 Hz),激励信号含有更多的频率成分,受趋肤效应影响很小,可以实现文中所有埋藏深度缺陷的检测。

## 3 结语

(1) 对无缺陷铁磁性构件进行了不同激励带宽下低频电磁检测数值仿真。结果表明,宽频励磁下

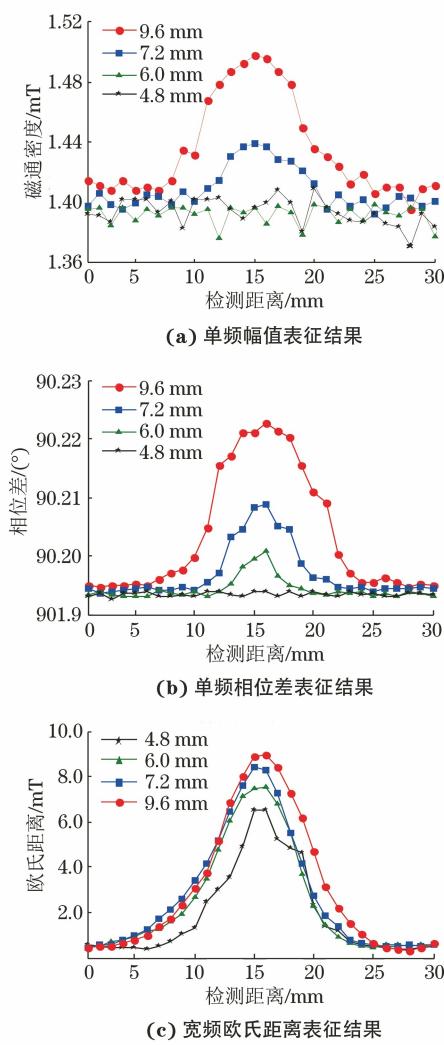


图 13 含埋藏缺陷试件的低频电磁检测结果

被测试件中磁通密度明显大于单频励磁下的磁通密度,且其磁场穿透能力更强。

(2) 提出了一种基于宽频响应欧式距离的低频电磁缺陷表征方法。数值仿真结果表明,宽频励磁响应的欧式距离比单频励磁响应的幅值大两个数量级,且对缺陷尺寸变化更敏感。

(3) 在单频励磁和宽频励磁两种条件下,对铁磁性构件的表面缺陷和埋藏缺陷进行了低频电磁检测试验。结果表明,宽频激励检测技术能够大幅提高低频电磁场的穿透能力,宽频励磁响应的欧式距离对内部埋藏缺陷有较强的检测能力和空间分辨能力。

## 参考文献:

- [1] VASIĆ D, BILAS V, SNAJDER B. Analytical modelling in low-frequency electromagnetic measurements of steel casing properties[J]. NDT & E International, 2007, 40(2): 103-111.
- [2] GOTOH Y, TAKAHASHI N. Three-dimensional FEM analysis of electromagnetic inspection of outer side defects on steel tube using inner coil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4):1733-1736.
- [3] GOTOH Y, TAKAHASHI N. Proposal of detecting method of plural cracks and their depth by alternating flux leakage testing: 3-D nonlinear eddy current analysis and experiment[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 655-658.
- [4] GOTOH Y, TAKAHASHI N. Study on problems in detecting plural cracks by alternating flux leakage testing using 3D nonlinear eddy current analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (3): 1527-1530.
- [5] 杨理践, 赵明, 高松巍. 金属板缺陷的低频电磁检测[J]. 无损检测, 2015, 37(8):8-11.
- [6] 姜斌, 王方, 萧艳彤. 电站锅炉无损检测新技术[J]. 无损检测, 2011, 33(3):40-43.
- [7] SINGH W S, RAO B P C, THIRUNAVUKKARASU S, et al. Flexible GMR sensor array for magnetic flux leakage testing of steel track ropes[J]. Journal of Sensors, 2012, 2012:1-6.
- [8] SINGH W S, RAO B P C, JAYAKUMAR T, et al. Simultaneous measurement of tangential and normal component of leakage magnetic flux using GMR sensors[J]. Journal of Non-destructive Testing & Evaluation, 2009, 8(2): 23-28.
- [9] JINGPIN J, YU C, GUANGHAI L, et al. Study on low frequency AC magnetic flux leakage detection for internal and external cracks of ferromagnetic structures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1808-1818.
- [10] HOSSEINI S, LAKIS A A. Application of time-frequency analysis for automatic hidden corrosion detection in a multilayer aluminum structure using pulsed eddy current[J]. NDT & E International, 2012, 47(2):70-79.
- [11] 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, 35(2):327-336.