

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105009

基于 TMR 传感器的脉冲涡流 C 扫描成像技术研究

李兴邦¹ 叶志浩¹ 罗宁昭¹ 李绍利¹ 张 尧²

(1. 海军工程大学电气工程学院 武汉 430033; 2. 合肥京东方卓印科技有限公司 合肥 230011)

摘 要:针对直线结构的阵列探针存在探针越远离线圈内径位置,存在相同位置缺陷的差分信号峰值越小的问题,提出了基于 TMR 传感器在同一激励线圈内半圆弧“等横向间距”布置的方法,并设计了一款新型脉冲涡流 C 扫描成像装置。研究结果表明,对于铜板不同形状的缺陷,通过 C 扫描并对扫描结果进行折算和阈值分割后绘制的等高线图能够很好地复现缺陷的形状,成功实现了铜板不同形状缺陷的二维成像,进而验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: TMR 传感器;脉冲涡流;铜板;缺陷检测;C 扫描成像

中图分类号: TM937. 2;TH862 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470. 4017

Research on pulsed eddy current C-scan imaging technology based on TMR sensor

Li Xingbang¹ Ye Zhihao¹ Luo Ningzhao¹ Li Shaoli¹ Zhang Yao²

(1College of Electrical Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Hefei Boe Zhuoyin Technology Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: There's an existing problem on linear structure that, the farther the array probe is located on coil's inner diameter, the smaller is the peak of differential signal of the same position defect. Aiming at solving this problem, this paper put forward an approach of placing the TMR sensor in the shape of semicircle with same horizontal spacing within the same excitation coil, and designed a new type of pulse vortex C-scanning imaging device. The findings suggest that, contour maps drawn after C-scanning and the conversion and threshold segmentation of scanning results could well reshape different forms of cavities on copper plate and successfully gained the 2D images of them, thus proving the effectiveness and feasibility of this approach.

Keywords: TMR sensor; pulsed eddy current; defect detection; C-scan imaging; copper plate

0 引 言

近十多年来,脉冲涡流检测(pulsed eddy current testing, PECT)在电磁无损检测方面做出了大量的贡献。涡流阵列成像、扫描成像技术作为 PECT 评估缺陷尺寸的有效工具,得到了广泛应用。

探针作为 PECT 中提高缺陷检测灵敏度的关键因素之一,得到了专家学者广泛的研究。传统的涡流探头多以线圈阵列来测量感应磁场变化,张娜等^[1]提出了一种基于 TMR 传感器阵列和双排圆形三相激励线圈磁场成像的新型涡流检测探头,能有效检出不同方向的缺陷和微小缺陷;董宇光等^[2]通过仿真和实验探究了探头阵元

的宽度、厚度以及阵列间距等参数对探头激励效果的影响,并根据工作频率范围设计了对应参数的阵列探头。结果表明,阵列探头可增强信号幅值,提高测量灵敏度;殷晓康等^[3]对双模式探头检测性能影响因素进行了分析与试验研究,为双模式检测系统性能提升与双模式探头优化设计提供了借鉴;Ye 等^[4]介绍了一种应用于 ENDE 的高密度、大尺寸隧道磁电阻(TMR)MFI 传感器阵列。能够获取具有高空间分辨率的图像,能够在一次扫描中对宽度为 90 mm 的矩形区域进行成像,从而提高了对大表面积结构评估的检查速度;Zhang 等^[5]介绍了一种具有两排励磁线圈和一排拾取线圈的新型三相激励 AECT 传感器,实验结果证明了该传感器用于导电材料快速成像的可行性,具有成本低、噪声小和检测速度快的优点;

Huang 等^[6]提出了一种应用于核电站蒸汽发生器换热管检测和缺陷量化的阵列探头,实验结果表明,该阵列传感器不仅具有良好的检测能力,而且具有良好的浅裂纹重构能力;孙海龙^[7]采用 16 组激励线圈-Hall 传感器作为检测单元设计了 4×4 阵列探头,并添加屏蔽环以减弱阵列式线圈间的互感,一定程度上减小了噪声干扰,成功实现了对十字槽缺陷的 B 扫描二维成像;Abrantes 等^[8]根据 PCB 技术研制了 8×8 的单层平面螺旋线圈,这种设计具有沿两个方向的多个驱动轨迹和传感线圈矩阵,可实现多种测量,以适应不同的应用测量要求;薛珂^[9]采用四通道的激励线圈-Hall 传感器作为检测单元,实现了对贯通型矩形缺陷和圆形腐蚀缺陷的 B 扫描成像;张卫民等^[10]采用 PCB 工艺设计研制了一种平面阵列线圈探头,用以检测铝板裂纹,成本低且效果良好;李超月等^[11]探究了 PECT 测厚检测中激励参数与传感器参数对检测信号的影响,建立了 PECT 测厚试验系统,制作了不同参数的 PECT 传感器。在不同厚度 Q235 铁磁性试件中,分析了激励线圈匝数、线圈内径对的不同对检测信号影响规律。

另外,国内外学者在传感器选择^[12-13]、TMR 电磁传感器在裂纹检测与方向的判别^[14]、缺陷深度的定量检测方法^[15]、预测不同方向和尺寸缺陷的输出图像^[16-17]、成像系统^[18-20]等多方面进行了深入研究。

可以看出,在脉冲涡流检测方面,研究者大多采用了直线结构的阵列探针,实现了不同结构缺陷的 B 扫描成像。根据仿真分析,这种结构存在两方面的问题:1) 探针越远离线圈内径位置,其对相同位置缺陷检测到的差分信号峰值越小,即检测灵敏度越低;2) 缺陷面积较大时,需进行多次 B 扫描才能实现完整的缺陷检测成像,费力且耗时。

鉴于此,本文提出了一种基于 TMR 传感器在同一激励线圈内半圆弧“等横向间距”布置的方法,并设计了一款新型脉冲涡流 C 扫描成像装置,成功实现了铜板不同形状缺陷的二维成像。

1 脉冲涡流检测理论

1.1 基本原理

脉冲涡流检测的基本原理如图 1 所示。将脉冲激励电流通入激励线圈时,线圈会感生出一个激励磁场。当线圈置于被测导电试件表面时,其激励磁场会通过电磁耦合的方式在试件表面激发出涡流并向试件内部传播,同时会产生涡流磁场,影响原激励磁场的变化。若试件中存在缺陷,将会影响涡流的大小、相位以及流动方向等信息,涡流磁场也会随之发生变化。涡流检测就是通过检测分析线圈和涡流的叠加磁场的变化情况来反映被测

试件结构的变化。

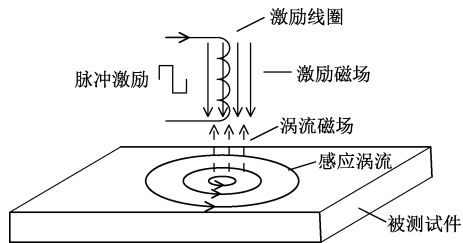


图 1 涡流检测基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of eddy current testing principle

1.2 脉冲涡流检测的等效电路模型

脉冲涡流检测的等效电路模型是将线圈和被测试件等效为理想的电阻、电感以及电容等电路元件,并运用电路理论对电磁现象进行分析。1976 年,Loos 提出涡流环理论,即将试件等效为假想线圈,将激励线圈与试件的电磁耦合关系等效为线圈间的互感,如图 2 所示。

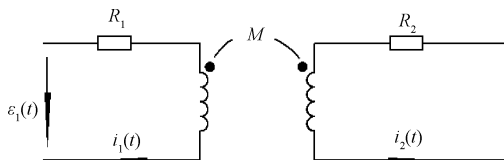


图 2 脉冲涡流检测的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit model of PECT

图 2 中, $\varepsilon_1(t)$ 为激励线圈加载的方波电压; $i_1(t)$ 为激励线圈中产生的电流; $i_2(t)$ 为被测试件中的感应电流; R_1 为激励线圈的电阻; L_1 为激励线圈的电感; R_2 为被测试件的电阻; L_2 为被测试件的电感; M 为线圈之间的互感。

由基尔霍夫电压定律有:

$$\begin{cases} i_1(t)R_1 + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} = \varepsilon_1(t) \\ i_2(t)R_2 + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

若只考虑上升沿的变化情况,则可将激励方波电压 $\varepsilon_1(t)$ 简化为阶跃信号:

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} U & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: U 为激励电压幅值。

对式(1)进行拉氏变换有:

$$\begin{cases} I_1(s)R_1 + L_1 s I_1(s) - M s I_2(s) = \frac{U}{s} \\ I_2(s)R_2 + L_2 s I_2(s) - M s I_1(s) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

解方程可得:

$$\begin{cases} I_1(s) = \frac{U(R_2 + L_2s)}{[(R_1 + L_1s)(R_2 + L_2s) - M^2s^2]s} \\ I_2(s) = \frac{UM}{(R_1 + L_1s)(R_2 + L_2s) - M^2s^2} \end{cases} \quad (4)$$

拉氏反变换可得：

$$\begin{cases} i_1(t) = f(U, M, R_1, L_1, R_2, L_2, t) \\ i_2(t) = f(U, M, R_1, L_1, R_2, L_2, t) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表明激励电流和感应电流与激励电压幅值 U 、线圈电阻 R_1 、 R_2 、自感 L_1 、 L_2 及线圈互感 M 等参数有关,即脉冲涡流检测结果与激励线圈和被测试件的阻抗、结构及相对距离等因素有关。该电路模型优点在于简单直接易推导,但仅适用于定性分析,实际情况要复杂很多,而且将被测试件直接等效为线圈缺乏足够的理论支撑。故后文将使用有限元方法计算脉冲涡流检测的数值解。

2 有限元仿真与探头设计

2.1 激励线圈磁场分析

激励线圈中的探针按图 5 结构布置,使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立脉冲涡流检测所需的激励线圈、被测金属试件及空气域的三维模型如图 3 所示。

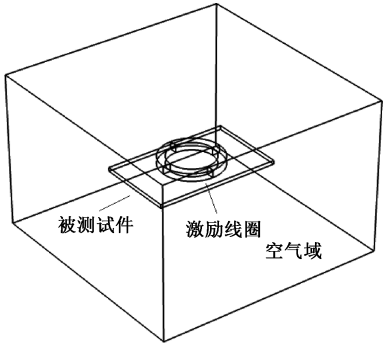


图 3 脉冲涡流检测 C 扫描仿真建模

Fig. 3 C-scan simulation modeling of PECT

被测金属试件长宽高为 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,电导率为 $5.2 \times 10^7\text{ (S/m)}$,相对磁导率和相对介电常数均为 1。激励线圈和激励信号参数如表 1 所示。

进行瞬态仿真计算和数据后处理,提离距离 1 mm 处, 0.01 ms 时刻试件表面磁通密度 z 分量如图 4(a) 所示。可以看出,越靠近线圈内径处的磁通密度 z 分量越大。

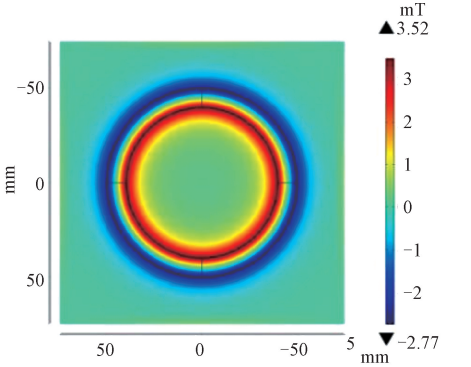
图 4(b) 所示是保持提离距离 1 mm 不变,在激励信号作用下,不同时刻过线圈圆心的截线磁通密度 z 分量分布情况。可以看出,在被测试件表面磁通密度 z 分量

表 1 激励线圈和激励信号仿真参数

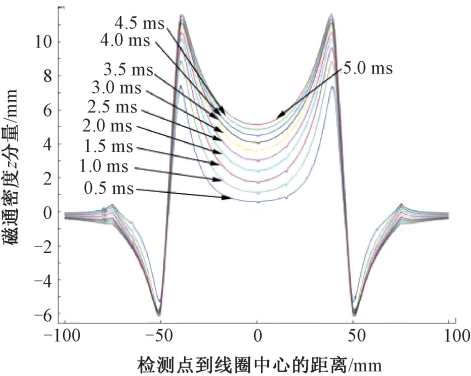
Table 1 Excitation coil and excitation signal simulation parameters

线圈参数		激励参数	
内径	40 mm	电压幅值	5 V
高度	15 mm	占空比	50%
匝数	200	频率	100 Hz
线径	1 mm	上升时间	4 ns
提离距离	1 mm		

- 的分布有如下特点：
- 1) 不同频率的激励信号在被测试件表面产生的磁通密度 z 分量的分布规律相同；
 - 2) 激励信号的频率越大,在被测试件表面产生的磁通密度 z 分量值越小；
 - 3) 与激励线圈中心距离相同的检测点处的磁场强度相同；
 - 4) 当检测点与激励线圈中心的距离 x 接近或等于线圈内径时,被测试件表面磁通密度 z 分量达到最大值；
 - 5) 当 x 大于线圈内径时, z 分量值将减小至反向,当检测点距离激励线圈很远时,磁场强度 z 分量值逐渐趋于 0。



(a) 0.01 ms 时刻试件表面磁通密度 z 分量分布
(a) z component of magnetic flux density on the surface of the specimen at 0.01 ms



(b) 不同时刻过线圈圆心的截线磁通密度 z 分量
(b) z -component of sectional flux density passing through the center of the coil at different times

图 4 提离距离 1 mm 处磁通密度 z 分量分布
Fig. 4 Distribution of z component of magnetic flux density at the lifting distance of 1 mm

以上特点表明,当探针位置距离激励线圈内径越近时,被测试件表面磁通密度 z 分量越大,其检测灵敏度越高。这为探针的优化设计(特别是探针的布置方式和布置位置)提供了理论依据。

提取图 4(b)中截线磁通密度 z 分量的最大值及其对应位置,结果如表 2 所示。

表 2 不同时刻截线磁通密度 z 分量最大值及其位置

Table 2 The maximum value and position of z -component of flux density at different time

t/ms	$B_{Z\text{max}}/\text{mT}$	x/mm	$B_{Z\text{max}}/\text{mT}$	x/mm
0.5	7.4	-39.5	7.3	40.0
1.0	8.9	-39.5	8.8	39.5
1.5	9.7	-39.5	9.6	39.4
2.0	10.2	-39.5	10.2	39.6
2.5	10.5	-39.5	10.5	39.9
3.0	10.8	-39.5	10.8	40.2
3.5	11.1	-39.5	11.1	40.4
4.0	11.3	-39.3	11.3	40.1
4.5	11.5	-39.5	11.5	40.2
5.0	11.6	-39.6	11.6	39.9

从表 2 数据可以看出,不同时刻磁通密度 z 分量的最大值均出现在线圈内径约 40 mm 位置处,且与线圈中心距离相同的检测点处磁场强度相同。

2.2 仿真分析及验证

在图 3 所示被测导体试件表面设置一个深度 2 mm、边长为 5 mm 的正方形缺陷,激励线圈位置不变,改变缺陷中心点和磁场域点探针位置分别为距离线圈中心 10、20、30 和 40 mm,如图 5 所示,并分别进行仿真计算。采集各点的磁场信号并与该点无缺陷时信号进行差分,提取差分峰值如图 6 所示。

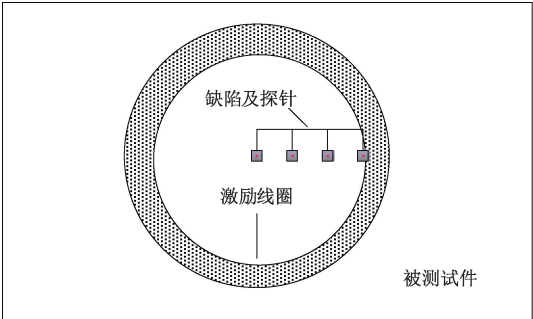


图 5 沿线圈半径设置缺陷和探针示意图

Fig. 5 Schematic diagram of defect and domain point probes along the circle radius

仿真结果表明,采用直线结构的探针布置方式,探针越远离线圈内径位置,其对相同位置缺陷的差分信号峰值越小,即检测灵敏度越低。进一步验证了探针位置距

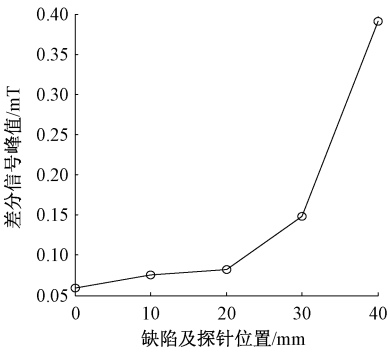


图 6 探针沿半径布置位置对检测的影响

Fig. 6 The influence of the position of the probe along the radius on the detection

离线圈内径越近,其检测灵敏度越高的结论。

因此,探针布置方式和布置位置是提高缺陷检测灵敏度的关键因素之一。本文提出的基于 TMR 传感器在同一激励线圈内半圆弧“等横向间距”的布置方法能够很好地解决直线结构探针布置在缺陷检测中所存在的问题。

2.3 基于 TMR 传感器的半圆弧“等横向间距”布置方式

由图 4 可知,线圈激励磁场沿半径方向不均匀,若随意布置磁场传感器,则会导致不同传感器对相同缺陷的检测结果有所差异,需要复杂的算法校正。若将传感器布置在激励线圈磁场强度相同的位置,则可以规避这一问题,即将 TMR 传感器布置在线圈内某一半径的圆弧上,任意传感器至线圈中心点距离均相等,且在横轴(垂直于扫描轴)上的投影间距相等。因传感器越接近线圈内径,检测灵敏度越高,故传感器尽量布置在靠近线圈内径位置,且因为是扫描成像,传感器只需布置在半圆弧上,如图 7 所示。

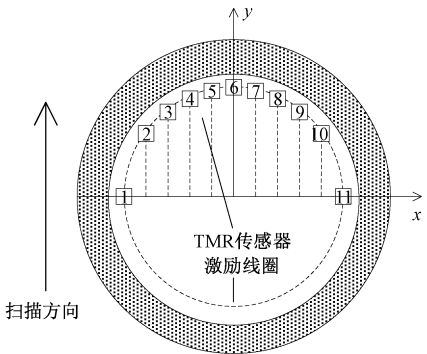


图 7 TMR“等横向间距”布置

Fig. 7 TMR equal horizontal spacing arrangement

TMR 传感器选用 TMR2503 系列的 SOT23-5 封装形式,其尺寸为 2.90 mm×2.92 mm,考虑到焊盘大小以及焊接误差,将其所占面积按边长 $a=5\text{ mm}$ 的正方形计算。

激励线圈内径为 $d = 80\text{ mm}$, 将内径两端各预留传感器边长 a 的 $1/2$, 即 2.5 mm , 线圈内径按 75 mm 计算, 则线圈内径处最大可布置传感器的数量为:

$$N_{\max} = \frac{d - \frac{a}{2} \times 2}{a} = \frac{50 - 5}{5} = 15$$

本次仿真设置传感器实际数量为 $N_s = 11$, 各传感器位置的横纵坐标按式(6)计算。

$$\begin{cases} x_i = -r_s + (i - 1)2r_s / (N_s - 1) \\ y_i = r_s \sin(\arccos x_i / r_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $r_s = \frac{d - \frac{a}{2} \times 2 \times 2}{2} = 35(\text{mm})$ 。

表 3 给出了 TMR 传感器半圆弧“等横向间距”位置折算前后的横纵坐标。

表 3 TMR“等横向间距”布置坐标

Table 3 The coordinate of TMR equal horizontal spacing arrangement

TMR 序号	横坐标/mm	纵坐标/mm (折算前)	纵坐标/mm (折算后)
1	-35	0	0
2	-28	21	-21
3	-21	28	-28
4	-14	32.078	-32.078
5	-7	34.293	-34.293
6	0	35	-35
7	7	34.293	-34.293
8	14	32.078	-32.078
9	21	28	-28
10	28	21	-21
11	35	0	-0

2.4 TMR 弧形传感器的建模与仿真

在图 3 的被测试件模型表面设置一个长宽为 $5\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的长方形缺陷, 俯视图如图 8 所示, 长方形缺陷中心点设置为坐标原点。激励线圈参数和激励信号参数如表 1 所示, 设置域点探针模拟 TMR 弧形布置方式, 探针坐标如表 2 所示, 可测量该坐标点的磁通密度 z 分量。

在图 8 中, 线圈中心起始位置坐标为 $(-100, 0)$, 沿扫描方向对横坐标 x 进行参数化扫描, 步长为 0.1 mm , 直至 100 mm 位置处, 对缺陷进行完整扫描。仿真计算后将各扫描点的探针检测信号与无缺陷参考信号差分, 提取差分信号峰值, 如图 9 所示是检测装置在某一位置时 1~6 号 TMR 提取的差分信号峰值曲线, 对比图 6 和 9 可以看出, TMR 传感器采用图 7 的布置方式, 各探针针对相同位置缺陷的差分信号峰值明显提高。

图 10 是进行横坐标折算前的扫描图像, 缺陷形态成弧形。然后根据 TMR 传感器弧形布置方式在扫描方向

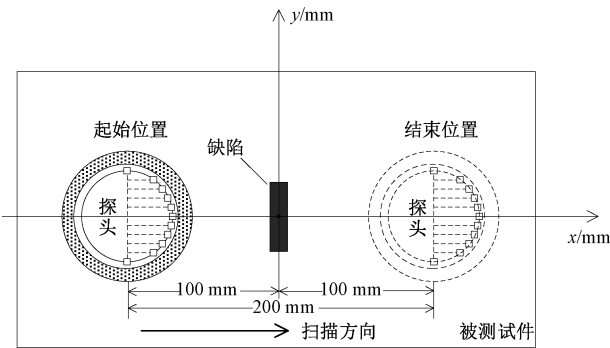


图 8 探头 C 扫描示意图

Fig. 8 Probe C-scan schematic diagram

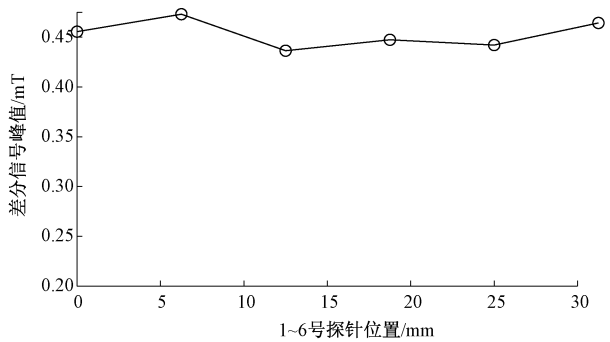


图 9 探针沿半圆弧“等横向间距”布置对检测的影响

Fig. 9 Influence of probe placement along semi-arc “equal transverse spacing” on detection

上的间距对检测点进行坐标折算。折算方法即根据表 2 中每个 TMR 传感器布置的纵坐标进行坐标平移, 将其全部折算到检测探头中心轴位置(即 1 号和 11 号 TMR 所布置的轴线), 由于参数化扫描步长为 0.1 mm , 故坐标平移精度为 0.1 mm 。如 4 号 TMR 传感器布置坐标为 $(-14, 32.078)$, 将其扫描方向上所经过的位置全部右移 32.1 mm , 结果如表 3 所示。坐标折算后的图像如图 11 所示。

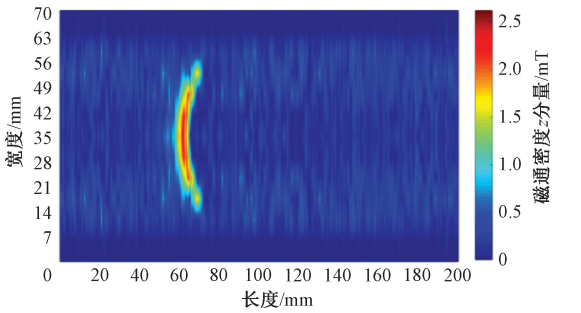


图 10 坐标折算前 C 扫描成像

Fig. 10 C-scan imaging before the coordinate convert

从图 11 的结果看, 被测试件上所设置的缺陷形状和

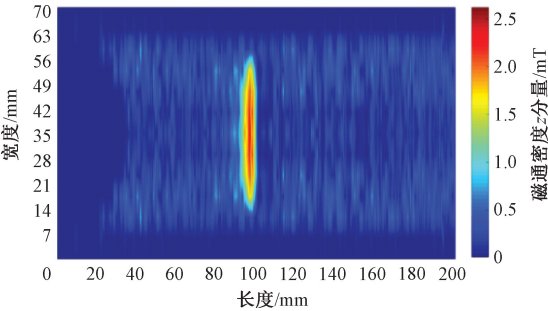


图 11 折算后 C 扫描成像图

Fig. 11 C-scan imaging after the coordinate convert

大小与 C 扫描成像的结果基本吻合,较好地复现了被测试件上的缺陷形状和大小。

3 C 扫描成像实验研究

3.1 检测系统的搭建

脉冲涡流 C 扫描成像系统由激励信号发生模块、信号检测装置以及数据采集模块组成。其中,除信号检测装置外的其他模块均与脉冲涡流 B 扫描相同,C 扫描成像系统研制的关键在于其检测探头的设计。信号检测装置主要由激励线圈、信号检测器件(TMR 传感器)以及信号调理电路组成。根据被测试件的尺寸,确定激励线圈内径为 40 mm,外径 55 mm,所绕漆包线线径 1 mm,匝数为 200 匝,该线圈电感值为 2.308 mH,电阻值为 2.674 Ω (正弦交流测试电压频率为 1 kHz,峰峰值为 1 V);激励脉冲方波电压幅值为 40 V,频率 100 Hz,占空比 50%,上升沿和下降沿均为 4 ns,线圈串接电阻 10 Ω ;信号检测装置为 11 个 TMR 传感器在线圈内半径 35 mm 的半圆弧上按“等横向间距”方式排列布置,单个 TMR 传感器的电路原理如图 12 所示,每一个 TMR 传感器均对应一个信号调理电路,将 TMR 传感器的检测信号输出到信号调理电路进行调理,然后利用 PCI-6255 采集卡采集调理后的信号。

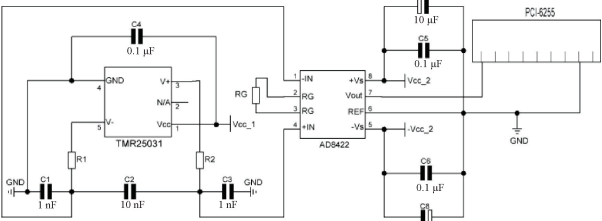


图 12 信号检测装置电路原理图

Fig. 12 Circuit schematic diagram of signal detection device

3.2 铜板表面缺陷 C 扫描成像实验研究

图 13 为脉冲涡流 C 扫描探头布置及信号采集装置实物图。在厚度 4 mm 的铜板表面中心设置长宽为 10 mm×50 mm 的矩形缺陷,如图 14 所示。用图 13 所示检测装置对该铜板表面进行 C 扫描,探头中心位置起始为 0,终点位置为 70 mm,缺陷中心所在位置为 50 mm,对扫描结果进行阈值分割后绘制折算前等高线图如图 15 所示,折算后等高线图如图 16 所示。

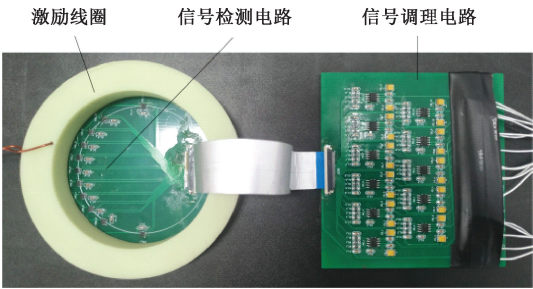


图 13 脉冲涡流 C 扫描探头实物图

Fig. 13 Physical picture of PEC C-scan probe

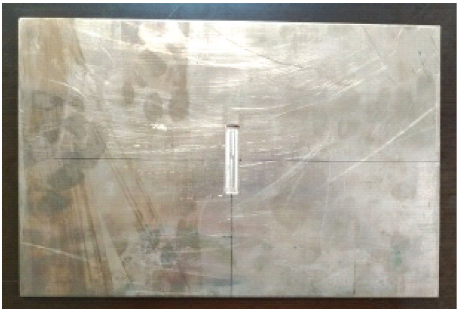


图 14 矩形缺陷实物图

Fig. 14 Rectangle defect

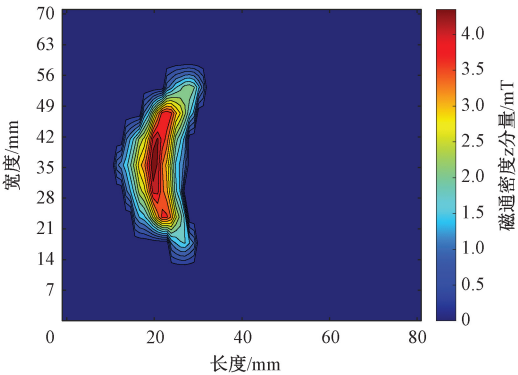


图 15 折算前矩形缺陷 C 扫描成像图

Fig. 15 C-scan imaging of rectangle defect before the coordinate convert

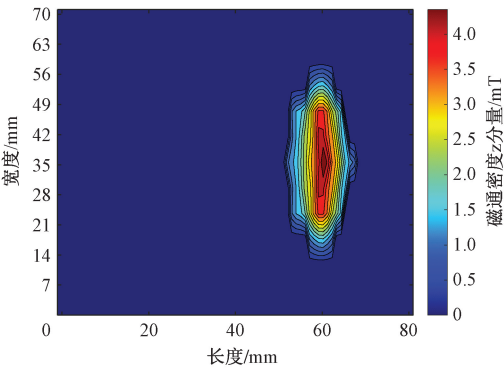


图 16 折算后矩形缺陷 C 扫描成像图

Fig. 16 C-scan imaging of rectangle defect before the coordinate convert after the coordinate convert

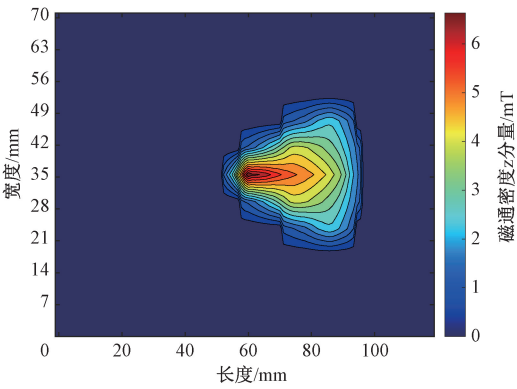


图 19 三角形缺陷 C 扫描成像

Fig. 19 C-scan imaging of triangle defect

在两块铜板表面中心分别设置长宽为 10 mm×50 mm 的矩形缺陷垂直组成的十字形缺陷和边长为 50 mm 的等边三角形缺陷,如图 17(a)和(b)所示,用图 13 所示检测探头分别对两块铜板设置的缺陷进行 C 扫描,对扫描结果进行折算和阈值分割后绘制等高线如图 18 和 19 所示。

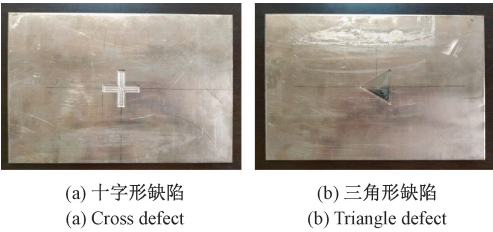


图 17 两种不同形状缺陷实物图

Fig. 17 Two kinds of defect pictures with different shapes

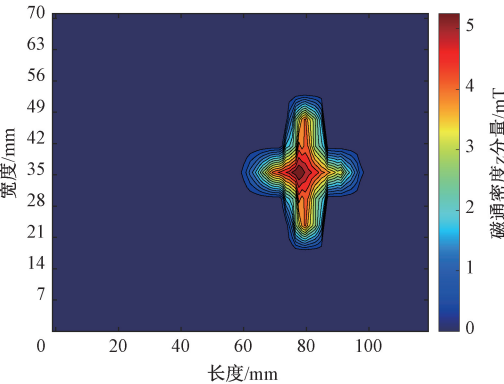


图 18 十字形缺陷 C 扫描成像

Fig. 18 C-scan imaging of cross defect

从实验结果来看,3 种不同形状的缺陷均被较为清晰地检出,形状和尺寸与实物较为吻合。但也存在两个问题:1)扫描成像中缺陷周围呈锯齿状且轮廓模糊;2)

扫描成像中缺陷各部位的颜色不同。造成第 1 种现象的原因如下:(1)探头在扫描过程中的不稳定运行(如:振动、往复循环检测等)造成图像的错位;(2)在检测过程中产生的噪声信号对缺陷检测有用信号的影响,甚至是缺陷检测信号微弱而被噪声信号淹没导致的图像轮廓模糊;(3)TMR 传感器的布置位置和安装误差导致的图像错位。造成第 2 种现象的原因是缺陷设置时各处的深度不同。因为 C 扫描图像中缺陷的颜色信息表征了缺陷的深度,随着缺陷深度的增加,缺陷区域的颜色将加深。

总体来看,基于 TMR 传感器在同一激励线圈内半圆弧“等横向间距”布置的检测装置很好地实现了不同形状缺陷的 C 扫描二维成像。

4 结 论

本文首先对线圈磁场分布情况进行了仿真分析,得到了探针越远离线圈内径位置,其检测灵敏度越低的结论。为了提高所有探针的检测灵敏度,提出了一种将 TMR 传感器布置在激励线圈内半圆弧“等横向间距”位置的 C 扫描成像技术。在此基础上,设计了一款新型脉冲涡流 C 扫描成像装置,并对铜板不同形状的缺陷进行了 C 扫描成像,仿真结果和实验结果相吻合,验证了这种方法的有效性和可行性,为无损检测提供了一个有效的检测方法。相对于 A 扫描和 B 扫描,C 扫描能够获取一个被测区域内多个被测点的信号响应,并将提取的特征量与各点的平面坐标联系起来,不仅能实现缺陷的定位,还能表征缺陷的形状、大小和深度,在较大面积的缺陷检测中优于 B 扫描。本文将在以后的工作中就 C 扫描成像系统的关键部件-检测探头做进一步的优化设计,在此基础上将在探头的稳定运行、图像的边缘识别和噪声去除等方面进行进一步的研究。

参考文献

[1] 张娜,彭磊,吴瑶,等. 高分辨率 TMR 传感器阵列磁场

- 成像涡流检测探头[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 45-53.
- ZHANG N, PENG L, WU Y, et al. ECT probe based on magnetic field imaging with a high resolution TMR sensor array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 45-53.
- [2] 董宇光, 萧旭峰, 曹丽. 基于阵列探头的 PFA 管超声导波流量测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(47): 105-111.
- DONG Y G, XIAO X F, CAO L. Ultrasonic guided wave flow measurement of PFA tube based on array probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(47): 105-111.
- [3] 殷晓康, 符嘉明, 谷悦, 等. 电容-涡流双模式一体化探头检测性能影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 197-207.
- YIN X K, FU J M, GU Y, et al. Investigations into the influential factors for the inspection performance of capacitive eddy current dual modality integrated probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 197-207.
- [4] YE C, WANG Y, TAO Y. High-density large-scale TMR sensor array for magnetic field imaging [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(7): 2594-2601.
- [5] ZHANG N, YE C, PENG L, et al. Novel array eddy current sensor with three-phase excitation [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 7896-7905.
- [6] HUANG H, SAKURAI N, TAKAGI T, et al. Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes[J]. Ndt & E International, 2003, 36(7): 515-522.
- [7] 孙海龙. 脉冲涡流阵列成像技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- SUN H L. Research on pulsed eddy current array imaging detection technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [8] ABRANTES R F, ROSADO L S, PIEDADE M, et al. Pulsed eddy currents testing using a planar matrix probe [J]. Measurement, 2016, 77: 351-361.
- [9] 薛珂. 阵列式无损检测系统中探头设计与缺陷定量检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- XUE K. Research on probe design of array PEC System and quantitative detection approach for detect in metals [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [10] 张卫民, 曾卫琴, 杨秀江, 等. 基于平面线圈阵列传感器的铝板材料裂纹电涡流检测[J]. 北京理工大学学报, 2014(11): 1101-1105.
- ZHANG W M, ZENG W Q, YANG X J, et al. Study on aluminum specimen eddy current crack detection with planar coil array sensor [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014(11): 1101-1105.
- [11] 李超月, 高鹏, 贺柏达, 等. PECT 在铁磁性材料测厚中传感器参数分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 6-10.
- LI CH Y, GAO P, HE B D, et al. Experimental analysis of sensor parameters of ferromagnetic materials [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 6-10.
- [12] 杨敏, 王凤森, 黄险峰. GMR 传感器和 TMR 传感器的性能对比[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1): 127-131.
- YANG M, WANG F S, HUANG X F. Compare of the performance between GMR sensor and TMR sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(1): 127-131.
- [13] LIU Y, LIU S, LIU H, et al. Pulsed eddy current data analysis for the characterization of the second-layer discontinuities[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, DOI: 10.1007/s10921-018-0545-6.
- [14] 闫梁, 万本例, 胡斌, 等. 基于双轴 TMR 电磁传感器的裂纹检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 106-114.
- YAN L, WAN B L, HU B, et al. Research on crack detection method based-on double axis TMR electromagnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 106-114.
- [15] 徐志远, 林章鹏, 袁湘民, 等. 管道弯头缺陷检测外置式远场涡流探头设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1119-1125.
- XU ZH Y, LIN ZH P, YUAN X M, et al. External remote field eddy current probe for defect detection at pipe elbows [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1119-1125.
- [16] YE C, HUANG Y, UDPA L, et al. Novel rotating current probe with GMR array sensors for steam generate tube inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12): 4995-5002.
- [17] SALAS A J R, LU M, HUANG R, et al. Accurate measurements of plate thickness with variable lift-off using a combined inductive and capacitive sensor [J]. NDT & E International, 2020, 110: 102202.
- [18] YIN X K, FU J M, LI W, et al. A capacitive-inductive dual modality imaging system for non-destructive evaluation applications [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106403.

[19] GUI Y T, SOPHIAN A, TAYLOR D, et al. Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment[J]. IEEE Sensor Journal, 2005,5(1):90-96.

[20] RAWASHDEH M R, ANDERS R, LALITA U, et al. Optimized solutions for defect characterization in 2-D inverse eddy current testing problems using subregion finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018:1-15.

作者简介



李兴邦,2020 年于青海大学获得学士学位,现为海军工程大学硕士研究生。主要研究方向为无损检测。

E-mail: 593501806@qq.com

Li Xingbang received his B. Sc. degree from Qinghai University in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Naval University of Engineering. His main research interest includes nondestructive testing.



叶志浩,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统。

E-mail: yxyx928@126.com

Ye Zhihao, Ph. D. professor, doctoral supervisor, his main research interest includes power system.



罗宁昭(通信作者),2012 年毕业于中国武汉海军工程大学电气工程专业,获博士学位。从 2013 年到 2016 年,从事博士后研究工作,主要研究方向为船舶电力系统的安全运行和电力系统的监测。

E-mail: ningzhaoluo@gmail.com

Luo Ningzhao (Corresponding author) received his Ph. D. degree in Electrical Engineering from Naval University of Engineering, Wuhan, China in 2012. From 2013 to 2016 he worked as a postdoctoral researcher. His main research interests include the safe operation of Marine power system and the monitoring of power system.