

铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测模式研究*

周德强, 潘 萌, 常 祥, 王 华, 曹丕宇

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

摘要:针对铁磁性材料的脉冲涡流检测信号比较复杂的问题,建立脉冲涡流矩形传感器检测模型,提出了矩形探头中同时存在脉冲涡流与脉冲漏磁检测区域,并进行脉冲电磁检测的仿真分析,研究了缺陷和矩形探头轴线所呈角度的最佳检测位置。仿真和实验结果表明了矩形探头的脉冲涡流有效检测区域为探头正下方的边框区域,而脉冲漏磁有效检测区域为矩形线圈中心的正下方区域。脉冲涡流最佳检测点为矩形探头轴线与缺陷呈 10° 附近位置,而脉冲漏磁最佳检测点为矩形探头轴线与缺陷呈 70° 位置。

关键词: 脉冲涡流;矩形探头;铁磁性金属;检测点

中图分类号: TG115.28 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.40

Research on detection modes of ferromagnetic component defects using pulsed eddy current

Zhou Deqiang, Pan Meng, Chang Xiang, Wang Hua, Cao Piyu

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, The Key Laboratory for Advanced Food Manufacturing Equipment Technology of Jiangsu Province, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the complex signals of pulsed eddy current sensor for ferromagnetic materials, a detection model of pulsed eddy current rectangular sensor based on finite element is established. This paper proposes that there are pulsed eddy current detection area and pulsed magnetic flux leakage detection area in pulsed eddy current rectangular sensor. The simulation analysis of pulsed electromagnetic detection is carried out. The best detection position of the angles between the defect and the axis of the rectangular probe is studied. Both simulation and experiment results show that the effective detection area of the pulsed eddy current of the rectangular probe is the border area under the probe, and the effective detection area of the pulsed magnetic flux leakage detection is the area under the center of the rectangular coil. The best detecting point of pulsed eddy current is the position at the angle of 10° between the defect and the axis of the rectangular probe, and the best detecting point of pulse magnetic flux leakage is the position at the angle of 70° between the defect and the axis of the rectangular probe.

Keywords: pulsed eddy current; rectangular probe; ferromagnetic metal; detecting point

1 引 言

脉冲涡流(pulsed eddy current, PEC)检测技术作为涡流检测中的一个分支,具有频谱丰富、响应速度快、无需耦合剂等优点,在对工件表面和近表面的检测和评估中优势明显^[1-6]。

针对铁磁性材料的脉冲涡流检测探头的研究,国内外一些学者进行了深入的分析。Abrantes R. F. 等人^[7]设计了一种平面正交差分式涡流线圈,仿真和实验表明这种结构能够改善探头空间分辨率,且能够有效提高检测速度;Arjun V 等人^[8]针对不锈钢亚表面缺陷检测问题,提出了PEC探头结构优化设计方法,该结构主要是由铁氧体磁芯激励和接收线圈的组合为一体;唐莺等人^[9]研

究了矩形传感器三维磁场分量以及对缺陷几何尺寸的定量分析问题;何赉泽等人^[10]在矩形探头上绕制了3个不同方向的检测线圈,分别拾取磁场在 B_x 、 B_y 、 B_z 3个方向上的检测分量,提出了“二维蝶形图”和“三维蝶形图”的研究方法,实现对缺陷长度和深度的定量分析。以上研究内容均是研究矩形传感器中的涡流效应问题,未对铁磁性材料脉冲涡流检测中存在的漏磁效应做出研究,而脉冲漏磁研究大多采用U型传感器为研究对象。因此,为进一步明晰矩形传感器在铁磁性材料中检测效果的问题,有必要对矩形传感器中涡流与漏磁成分与缺陷的位置关系进行研究,并找出最佳检测点。

2 脉冲涡流检测原理

脉冲涡流的检测原理为:将脉冲电流加载到激励线圈上,激励线圈自身会感生出一个衰减的脉冲激励磁场,该变化的激励磁场会在导体产生瞬态的涡流,而同时该涡流将铁磁性材料进行磁化^[11]。导体中的涡流又会产生一个迅速衰减的磁场,由磁传感器来获取这两个叠加的磁场,被测导体上的缺陷会引起涡流密度的变化^[12],进而引起周围磁场的变化,通过磁传感器捕获的信号来反映缺陷的信息^[13]。

金属导体分为铁磁性材料与非铁磁性材料,对于非铁磁性材料,检测信号仅存在脉冲涡流信号,而对于铁磁性材料,由于产生的涡流对铁磁性材料的具有磁化作用,检测信号中既有涡流信号又有漏磁信号^[14-16],因此,研究铁磁性构件作用点最佳位置需分别对涡流效应和漏磁效应进行分析,以提高脉冲涡流传感器的检测性能。

3 矩形探头在铁磁性构件中的涡流和漏磁效应分析

3.1 仿真模型的建立

选用 Comsol 有限元分析软件对矩形传感器在铁磁性材料的脉冲涡流检测进行仿真研究。在 AC/DC 模块下的电磁场环境对所建模型进行求解和分析,所建三维矩形传感器脉冲涡流检测模型如图1所示。在模型中,试件的长宽高设为 $300\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,矩形探头的长和宽度为 30 mm ,线圈内径为 0.3 mm ,厚度为 10 mm ,提离为 0.5 mm ,空气域为半径为 500 mm 的圆球。定义边界条件为磁感线平行于模型的边界,对模型进行网格划分,采用计算线圈电流密度的方法向矩形线圈导入幅值为 0.1 A ,频率为 100 Hz 的脉冲电流在瞬态的环境下进行求解。

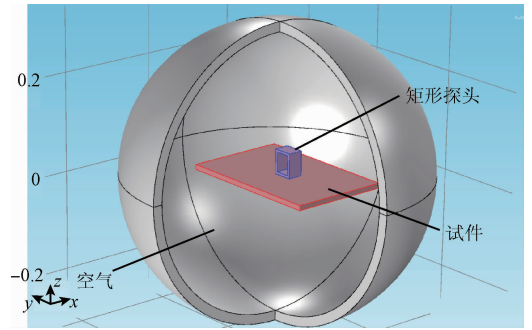
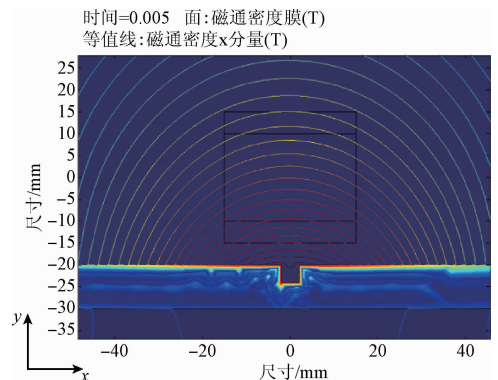


图1 矩形探头脉冲涡流三维检测模型

Fig. 1 The 3-D FEM simulation model of rectangular sensor

3.2 矩形探头的漏磁效应机理分析

研究矩形探头在脉冲涡流检测方式下的检测效果,其检测对象为铁磁性试件和非铁磁性试件,提取缺陷部位截面的磁感线分布进行对比分析,对铁磁性被测试件和非铁磁性被测试件的材料设置分别选择常用的铁和铝,两种材料的相对磁导率的参数设为 $4\ 000$ 和 1 ,电导率设为 $1.12 \times 10^7\text{ S/m}$ 和 $3.77 \times 10^7\text{ S/m}$,相对介电系数都设为 1 。对被试试件进行仿真时需要设置矩形线圈轴垂直于缺陷,尽量保证感应磁场与缺陷相垂直,从而实现漏磁场在缺陷部位的磁感应强度最大化,其中截面的选取为矩形线圈中心部位 XZ 截面。铁磁性被测试件即铁板在矩形线圈激励下漏磁场的分布如图2(a)所示,从图2(a)中可以看出缺陷部位的磁感线较为密集,且在缺陷的开口部位磁感线呈上凸状,这是由于当感应磁场的走势遇到与之相垂直的缺陷时,试件与缺陷部位的空气相对磁导率相差较大从而引起磁感线发生偏转,进而形成了空间漏磁场;非铁磁性试件即铝板的脉冲涡流磁感线分布如图2(b)所示,与图2(a)对比可以看出,铝板缺陷部位的磁感线走势平滑,且磁感线的分布主要集中在矩形线圈的四周。因此,对比发现铁磁性材料缺陷处存在漏磁场,脉冲激励下的铁磁性材料检测方法具有脉冲漏磁检测的特性。



(a) 铁磁性材料缺陷脉冲涡流检测磁感线剖视图
(a) The sectional diagram of the magnetic field lines of pulsed eddy current sensor for ferromagnetic plate

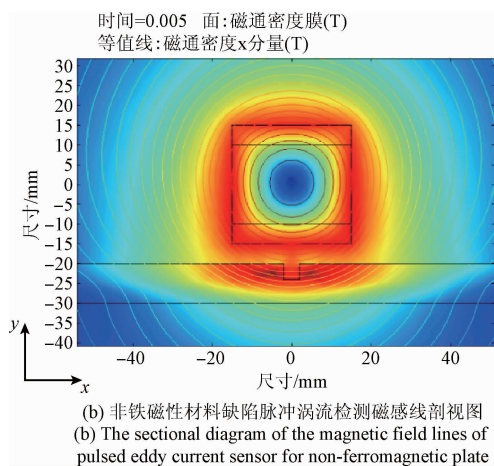


图2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

图3所示为铁磁性材料脉冲涡流检测的总体涡流分布图,其涡流区域分布近似为一块矩形区域,而中间的涡流几乎为0。结合图2(a)和(b)的分析结果可知,矩形探头的脉冲漏磁效应主要集中在涡流的中心位置,这样就构成了漏磁检测的工作位置。综合以上两种不同金属材料的脉冲电磁检测结果可知,脉冲涡流检测区域为矩形探头正下方的矩形区域,脉冲漏磁检测区域为矩形探头正下方中心圆形区域。

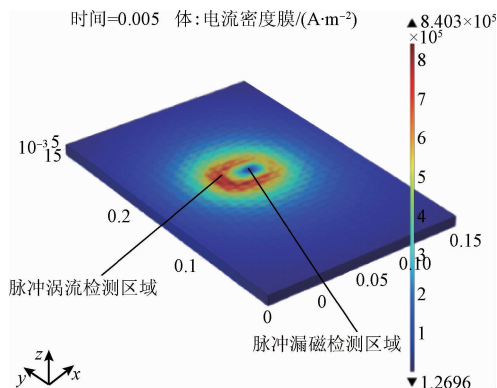


图3 矩形探头仿真总的涡流分布

Fig. 3 The simulated global eddy current distribution of rectangular probe

4 矩形探头在铁磁性构件中检测模式分析

4.1 矩形探头脉冲涡流检测工作模式下的缺陷检测点研究

以上讨论了两种工作模式所在的区域,有必要通过进一步的分析得出更为精确的检测位置。图4所示为矩形探头仿真电流密度模的分布,模值表示电流密度大小,

不具有方向性。提取感应电流密度 X 分量和 Y 分量的仿真结果,如图4所示。

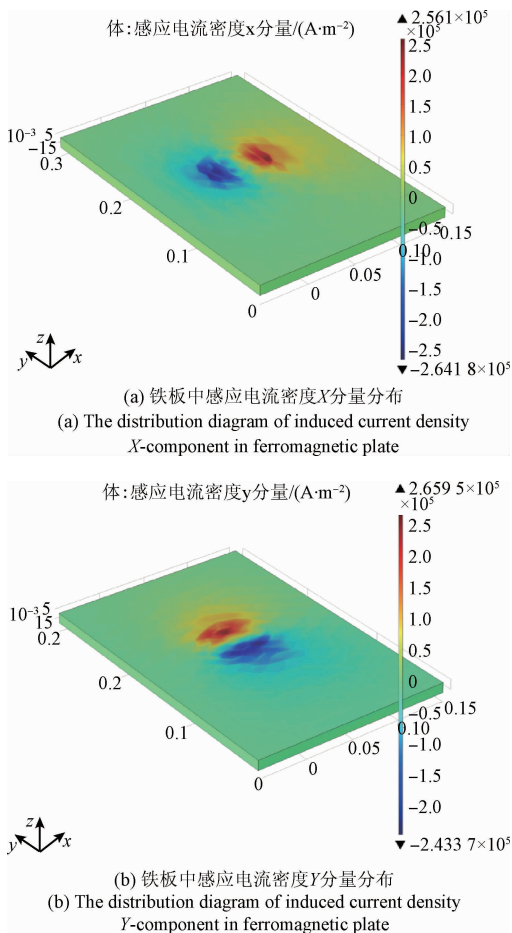


图4 试件电流密度分布

Fig. 4 The current density distribution of the specimen

从图4(a)中可以看出,感应电流 X 方向分量在矩形探头开口方向下方呈对称分布,且两端的电流密度数值相反;不同于 X 方向分量的分布,图4(b)中感应电流 Y 方向分量在矩形探头非开口方向下方呈对称分布,相同的是两端的电流密度数值同样相反,这是由于两端的电流密度方向相反,提取磁通密度 X 分量作为铁磁性材料的脉冲涡流检测的特征量进行分析。

矩形探头脉冲涡流检测区域在矩形线圈正下方的矩形区域,该区域为中心对称图形,选取 $1/4$ 的区域进行检测分析,即对矩形探头中心轴线与缺陷夹角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围进行分析。选取固定探头转动缺陷的方式,设缺陷与探头轴线垂直时为 0° ,每隔 10° 拾取一次响应结果,直到旋转至 90° 。为了更有效地对比不同检测角度下的结果,将每个旋转角度下缺陷部位的响应与相对矩形检测中心对称的无缺陷部位的响应进行差分,图5所示为矩形探头脉冲涡流检测模式。

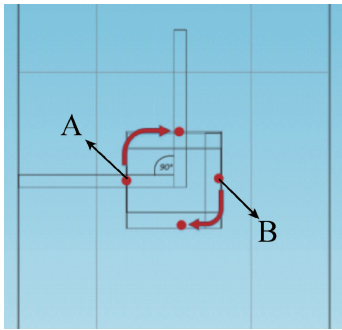


图5 矩形探头脉冲涡流检测模式

Fig. 5 The PEC test mode of the rectangular sensor

选取其中90°时的检测信号结果如图6所示,根据缺陷部位(检测点A)和无缺陷部位(检测点B)的涡流方向和矩形线圈的对称性,可以得出响应信号的数值具有不同的正负性。提取不同检测角度下脉冲响应差分信号的峰值作为特征值进行分析,差分信号峰值是指缺陷信号峰值与无缺陷时输出信号峰值之差值。

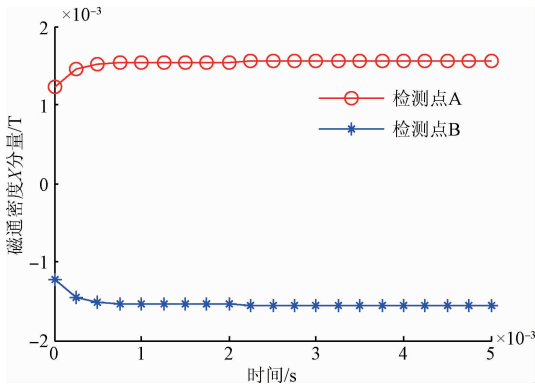


图6 缺陷和探头轴线呈90°时检测信号

Fig. 6 The detecting signal in the position at the angle of 90° between the defect and the probe axis

为了方便进一步的对比分析,对于响应信号峰值为负数的结果取绝对值,图7所示为脉冲涡流差分响应在缺陷与矩形线圈轴线不同检测角度下的峰值结果,可以看出随着缺陷与矩形线圈轴线之间的夹角的增大,响应信号峰值呈现先增大后减小的变化走势,当夹角为10°时,响应信号峰值最大,可以得出在脉冲涡流检测模式下,矩形探头应布置在缺陷与矩形线圈轴线夹角为10°左右的位置。

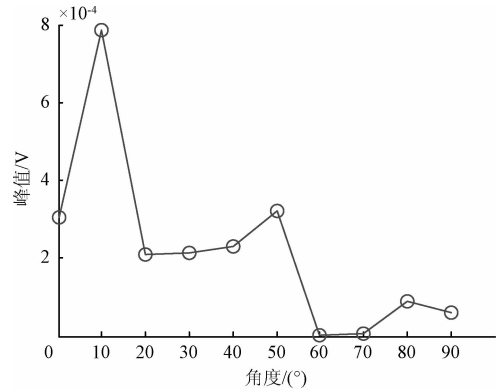


图7 缺陷与矩形探头轴线呈不同角度时脉冲涡流差分信号峰值

Fig. 7 The relationship between the peak value of the pulsed eddy differential signal and the angle between the defect and rectangular probe axis

4.2 矩形探头脉冲漏磁检测工作模式下的缺陷检测点研究

基于上述仿真结果可知,在脉冲漏磁检测模式下矩形探头的检测部位主要集中在探头中心正下方的范围,同样选取该矩形检测区域1/4的范围(0°~90°)进行研究。矩形探头在脉冲漏磁检测模式下的方式如图8所示,选取矩形检测范围中心部位作为响应信号的取样点,同样选取固定探头转动缺陷的方式,设缺陷与探头轴线垂直时为0°,每隔10°拾取一次响应结果,直到旋转至90°。将不同检测角度下的响应信号减去无缺陷部位的响应信号,所得结果作为特征信号进行对比分析,选取缺陷部位与矩形线圈轴线夹角为0°和90°时的时域响应进行对比分析,结果如图9所示。从图9中可以看出,0°时的响应结果为负值,90°时的响应结果为正值,这是由于电流密度的方向不同而导致的响应结果呈现不同的正负性。为了进行有效的对比分析,对磁通密度呈负值的响应结果取绝对值,提取处理后的不同检测角度下响应信号峰值结果如图10所示。可以看出随着检测角度的增大,响应信号峰值呈现波浪式的变化走势,峰值响应在检测角度为10°时的数值最小,在检测角度为70°时的数值最大,由此可以得出,矩形探头在脉冲漏磁检测模式下,应布置在缺陷与矩形线圈轴线夹角为70°左右的位置。

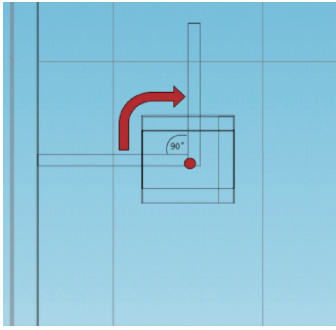


图8 矩形探头脉冲漏磁检测模式

Fig. 8 The PMFL test mode of the rectangular sensor

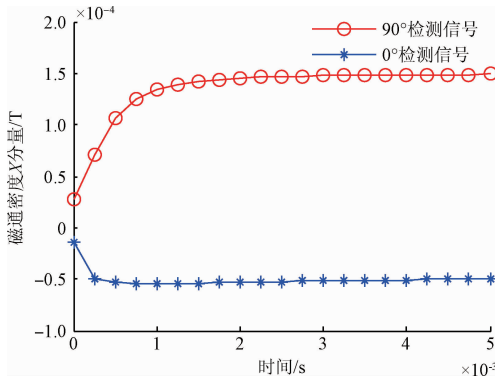


图9 缺陷和矩形探头轴线呈0°和90°时的检测结果

Fig. 9 The detecting results for the positions at the angles of 0° and 90° between the defect and the probe axis

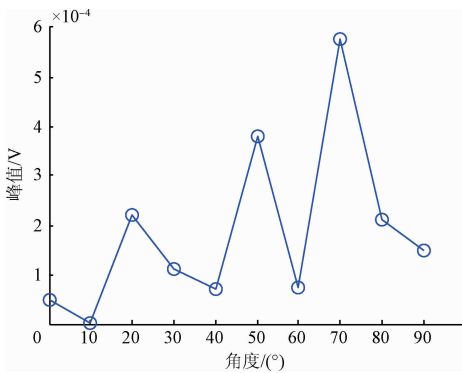


图10 缺陷与矩形探头轴线呈不同角度时脉冲漏磁信号峰值

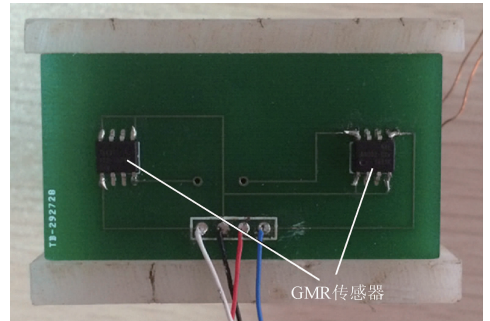
Fig. 10 The relationship between the peak value of the PMFL signal and the angle between the defect and rectangular probe axis

5 实验结果分析

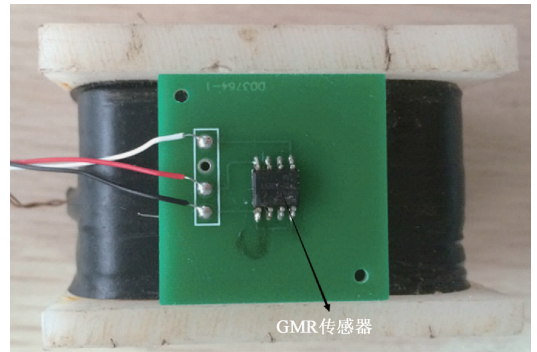
5.1 实验系统建立

实验装置主要有脉冲信号发生器、带巨磁阻(giant

magnetic resistance, GMR)传感器的矩形线圈、功率放大器、信号处理电路、数据采集卡以及被测试件铁板,其中GMR传感器用来获取X方向的磁场分量。图11(a)所示为差分式GMR传感器用于脉冲涡流检测区域,其中一个GMR传感器放置于无缺陷区域,另一个GMR传感器放置在缺陷区域。图11(b)所示的GMR传感器用于脉冲漏磁检区域,GMR传感器放置在矩形激励线圈的下方中心位置。传感器与缺陷之间的提高高度为0.5 mm。被测试件上设置有宽度为2 mm,深度为2 mm的检测缺陷。检测系统的实物如图12所示。



(a) 脉冲涡流检测区域GMR传感器实物
(a) Photo of the placement of the two GMR sensors



(b) 脉冲漏磁检测区域GMR传感器实物
(b) Photo of the placement of the one GMR sensor

图11 传感器实物

Fig. 11 Photos of the sensors

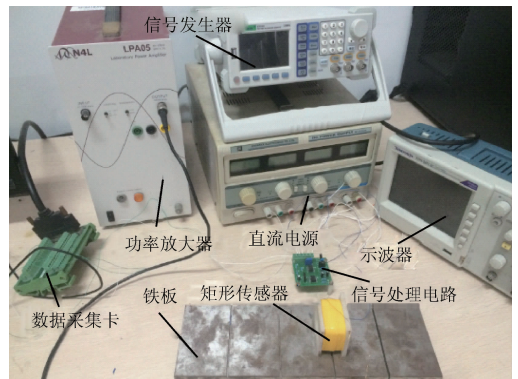


图12 实验系统实物

Fig. 12 Photo of the experiment device

5.2 脉冲涡流检测区域铁磁性材料实验结果分析

基于上述仿真结果的分析,脉冲涡流检测区域位于矩形线圈正下方的矩形区域,采用差分式 GMR 传感器检测铁板上的缺陷。脉冲涡流检测方式检测不同的旋转角度所获得初始信号如图 13 所示,从图中可以看出,不同的检测角度响应信号具有不同的响应波形。

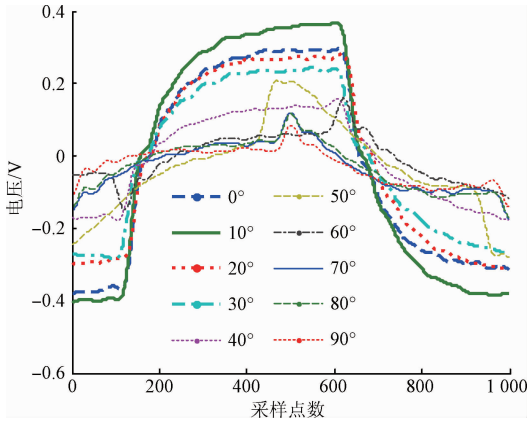


图 13 脉冲涡流检测区域铁磁性材料实验结果
Fig. 13 The original acquisition signal of the detection of the iron plate in PEC test area

为了进一步分析检测结果,提取不同检测角度下的响应信号峰值,结果如图 14 所示,从图中可以明显看出当旋转角度为 10°时,响应信号达到最大值,说明当矩形线圈的轴线与缺陷走向的夹角为 10°时,矩形线圈对缺陷处的脉冲涡流响应信号检测效果最佳。

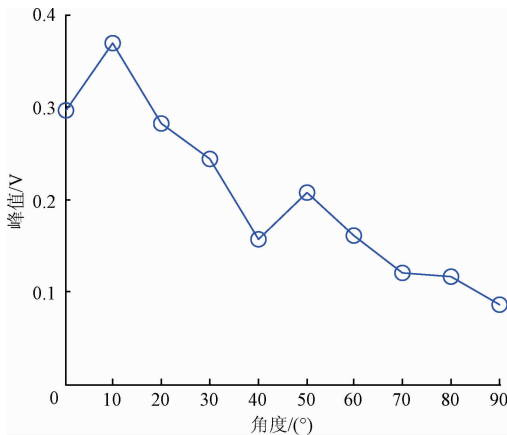


图 14 缺陷与矩形探头呈不同角度时响应信号峰值
Fig. 14 The relationship between the peak value of the response signal and the angle between the defect and rectangular probe axis

5.3 脉冲漏磁检测区域铁磁性材料实验结果分析

通过上述仿真结果结果的分析,脉冲漏磁检测区域是矩形线圈中心正下方的圆形区域,改变矩形线圈的轴

线与缺陷之间的夹角,磁传感器所获得的响应信号波形如图 15 所示。为了进一步分析不同的检测角度对输出响应信号的影响,提取不同检测角度下响应信号的峰值,结果如图 16 所示,从图中可以明显看出,当旋转角度为 70°时,输出响应信号出现极大值,说明当矩形线圈轴线与缺陷之间的夹角成 70°时,脉冲漏磁信号的检测效果最佳。

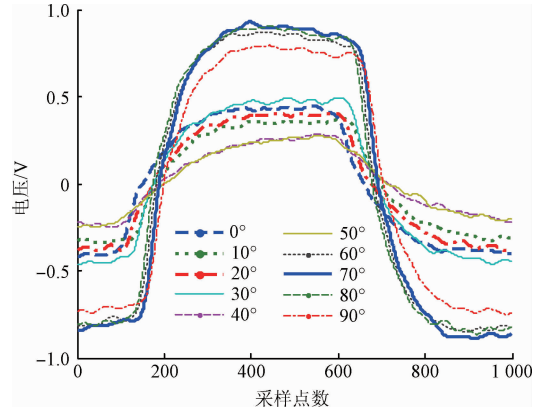


图 15 脉冲漏磁检测系统铁磁性实验结果
Fig. 15 The original acquisition signal of the detection of the iron plate in PMFL test area

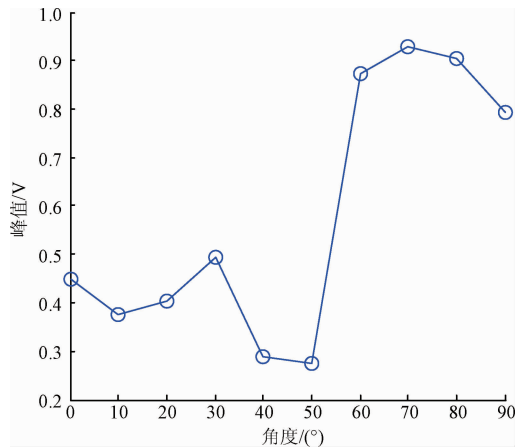


图 16 缺陷与矩形探头呈不同角度时响应信号峰值
Fig. 16 The relationship between the peak value of the response signal and the angle between the defect and rectangular probe axis

以上分别针对脉冲涡流检测方式和脉冲漏磁检测方式下的铁磁性材料的最佳检测角度进行讨论,为后续关于铁磁性材料的缺陷检测提供技术支持。另外,通过两种模式的区分,可以有效提取铁磁性构件缺陷的漏磁信号,由于漏磁信号与缺陷线性相关,更好地实现对缺陷的定量分析。

6 结 论

通过对矩形探头在脉冲电磁检测下进行仿真分析,并通过对非铁磁性材料的仿真证明了矩形探头在铁磁性材料的脉冲电磁检测具有脉冲涡流与脉冲漏磁检测的性质,并选用了磁通密度 X 分量对矩形探头脉冲涡流和脉冲漏磁两种工作模式进行了分析,找出了两种工作模式下的检测区域和最佳检测点的位置,并通过实验加以验证,得出了以下结论:

1) 矩形探头的脉冲涡流有效检测区域为探头正下方的边框区域,而脉冲漏磁有效检测区域为矩形线圈中心的正下方区域。通过两种模式的区分,可以有效提取铁磁性构件缺陷的漏磁信号,更好地实现对缺陷的定量分析。

2) 在矩形探头的脉冲涡流工作模式中,缺陷和探头轴线呈 10° 时检测效果最佳。

3) 在矩形探头的脉冲漏磁工作模式中,缺陷和探头轴线呈 70° 时检测效果最佳,最佳的检测点探头正下方的中心处。

参考文献

- [1] 周海婷, 厚康, 潘红良, 等. 基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 15-19.
ZHOU H T, HOU K, PAN H L, et al. Structure optimization of eddy current sensor based on the finite element simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 15-19.
- [2] 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(10): 8-14.
- [3] ANDERS R. Efficient finite element modelling of eddy current probability of detection with transmitter-receiver sensors [J]. NDT&E International, 2015, 75(10): 48-56.
- [4] 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 X J, ZHANG Q, SHEN G T. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [5] 赵友全, 刘潇, 陈玉榜, 等. 微型涡流电导率测量传感器的优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 598-603.
ZHAO Y Q, LIU X, CHEN Y B, et al. Optimizing

design for miniature eddy current conductivity measurement sensor [J]. Journal of electronic measurement instrumentation, 2015, 29(4): 598-603.

- [6] 吕春峰, 朱建平, 匡兴红, 等. 变面积式电涡流传感器线圈阻抗理论计算模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1907-1914.
LV CH F, ZHU J P, KUANG X H, et al. Calculation model for coil impedance of area-variable eddy current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1907-1914.
- [7] ABRANTES R F, ROSADO L S, PIEDADE M, et al. Pulsed eddy current testing using a planar matrix probe [J]. Measurement, 2016, 77(1): 351-361.
- [8] ARJUN V, SASI B, RAO B P C, et al. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates [J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2015, 226(5): 69-75.
- [9] 唐莺, 潘孟春, 罗飞路, 等. 基于三维场测量的脉冲漏磁检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2297-2302.
TANG Y, PAN M CH, LUO F L, et al. Pulsed magnetic flux leakage field testing technology based on 3D magnetic field analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2297-2302.
- [10] 何赞泽, 罗飞路, 胡祥超, 等. 矩形脉冲涡流传感器的三维磁场量与缺陷定量评估[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 347-351.
HE Y Z, LUO F L, H X CH, et al. Quantitative defect detection based on 3D magnetic field measurement of rectangular pulsed eddy current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 347-351.
- [11] 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 D Q, ZHANG B Q, WANG H T, et al. Optimization design of pulsed eddy current circular probe [J]. NDT, 2012, 34(9): 7-11.
- [12] 王俊. 铁磁性构件的脉冲涡流无损检测研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
WANG J. Research of ferromagnetic components using pulsed eddy current nondestructive testing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [13] 郭太平, 裘进浩, 程军, 等. 高频电磁涡流检测系统及实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 4-9, 13.
GUO T P, QIU J H, CHENG J, et al. High-frequency electromagnetic eddy current testing system and experimental research [J]. Foreign Electronic

Measurement Technology, 2015, 34(11): 4-9,13.

- [14] 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.

WU D H, YOU D H, LIU ZH L, et al. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 327-336.

- [15] 吴德会,刘志天,王晓红,等. 利用复合激励的无盲点管道裂纹漏磁检测新方法[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(10): 2259-2266.

WU D H, LIU Z T, WANG X H, et al. Novel MFL method for pipeline crack no blind spot detection using composite excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2259-2266.

- [16] 周德强,王俊,张秋菊,等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 989-995.

ZHOU D Q, WANG J, ZHANG Q J, et al. Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 989-995.

作者简介



周德强 (通讯作者),2001 年于长江大学获得学士学位,2005 年于华中农业大学获得硕士学位,2010 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为江南大学机械工程学院副教授,主要研究方向为电磁无损检测与评估。

E-mail:zhoudeqiang@jiangnan.edu.cn

Zhou Deqiang (Corresponding author) obtained his B. Sc. from Yangtze University in 2001, M. Sc. degree from Huazhong Agricultural University in 2005 and Ph.D. from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010. Now he is an associate professor in School of Mechanical Engineering, Jiangnan University. His main research interest is electromagnetic nondestructive testing & evaluation.



潘萌,2014 年于无锡太湖学院获得学士学位,现为江南大学硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测与评估。

E-mail:1638781747@qq.com

Pan Meng received her B. Sc. degree in 2014 from Taihu University of Wuxi. Now she is a master student in Jiangnan University. Her main research direction is electromagnetic nondestructive testing & evaluation.