# Sheet Metal Defect Detection System Based on PCB Array Sensing

TAN Chao*, ZHU Chengang, LIU Wei, ZHANG Xiaolong, TAN Wenrui, SUN Menghao
(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

**Abstract**: To enhance the efficiency and accuracy of defect detection in metal sheets, a non-destructive testing method utilizing a PCB coil based on a rectangular array is proposed. This method begins with the analysis of the pulse electromagnetic eddy current effect and the principle of secondary field integration detection, grounded in Maxwell's equations. By using the COMSOL software, the characteristic parameters of the rectangular array PCB sensing coils are simulated. A 100 $cm^2$ rectangular PCB is designated as the sensing unit, with the detection signal strength serving as the target parameter. The optimization of the PCB coil design involves varying the excitation frequency, number of turns, and lift-off distance to identify the optimal configuration. Subsequently, the optimized coil parameters are applied to simulate defect specimens, yielding response characteristics for different types of defects. Based on these simulations, a prototype probe and associated signal conditioning circuit are developed. Finally, an experimental platform is established to test samples with various geometric defect characteristics. The results demonstrate that the sensor probe can rapidly and accurately locate defects while effectively identifying different types of flaws within the metal specimens.

**Key words**: non-destructive testing; metal sheet defect detection; pulse eddy current; array PCB sensors; FEM
**EEACC**: 0290T; 7210A **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.004

# 基于阵列 PCB 传感的金属板材缺陷检测系统

谭 超*, 朱成昂, 刘 伟, 张晓龙, 谭文瑞, 孙梦浩
(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要**: 为提高金属板材缺陷检测效率及缺陷定位准确性, 提出一种基于矩形阵列的 PCB 线圈无损缺陷检测方法。首先, 基于麦克斯韦方程组分析了脉冲电磁涡流效应和二次场积分检测原理, 利用 COMSOL 软件模拟了矩形阵列 PCB 传感线圈的特征参数。研究中, 将 100 $cm^2$ 的矩形 PCB 限定为传感单元, 以检测信号强度为目标参数, 调整线圈激励频率、导线匝数以及提离值等设计参数, 确定最优 PCB 线圈参数配置。然后, 选取优化后的 PCB 线圈参数对不同缺陷特征的试件进行仿真, 获取了各种缺陷的响应特性, 并据此制备探头样机和设计信号调理电路。最后, 搭建实验平台并对不同几何特征缺陷的试件进行了检测。实验结果表明, 该探头传感器能够快速定位缺陷位置, 并有效检测金属试件内不同类型特征缺陷。

**关键词**: 无损检测; 金属板材缺陷检测; 脉冲涡流; 阵列 PCB 传感器; 有限元仿真
**中图分类号**: TM932 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-1947-08

金属板材是现代制造业中的重要工业产品和生产原料[1], 在电力建设、矿业冶金、交通船海、石油及化工等行业有着广泛应用[2]。但金属板材的生产过程中会产生各种缺陷, 这些缺陷会严重影响金属板材的性能和使用寿命[3], 进而造成相当大的人身财产损失和不良社会影响[4], 因此对金属板材存在的缺陷进行检测是非常必要的研究。

目前国内外学者对金属板材的缺陷检测已经开展了一些研究, 其中脉冲涡流检测就是一个重要且有效的方法[5]。潘巧生等[6]提出一种利用电涡流效应的测量方法, 该方法用单层多匝线圈构成的测量线圈非接触式测量微孔的直径和深度。陈国龙等[7]运用柔性科赫分形涡流传感器对于近表面及内部裂纹进行研究, 该方法能检测到覆盖铝板最大厚度为 2mm 的裂纹。Zhou 等[8]针对铁磁性和非铁磁性板材缺陷, 对影响涡流检测的线圈尺寸和激励频率等因素进行了研究。Zhang 等[9]设计了一种新型三相激励 AECT 传感器, 由两排三相激励线圈和一排检测线圈组成, 经过扫查可快速成像。

以上研究对金属板材的缺陷检测能力有一定的提高, 但传统的涡流检测采用单个线圈接收信号[10], 仍需要在平面上进行线性扫描检测, 其检测精度不

**收稿日期**: 2024-08-20 **修改日期**: 2024-12-02

够、定位不准、耗时长,且不能有效提供金属板材复杂的缺陷信息[11]。此外,单列线圈组探头检测面积小,单次定点检测并不能快速判断缺陷位置[12]。

基于此,本文将脉冲涡流检测和阵列传感技术相结合,提出一种基于矩形阵列的 PCB 线圈无损缺陷检测方法,并通过线圈参数优化仿真和实验验证了该阵列传感的可行性,实现了金属板材缺陷的种类识别及快速定位。

## 1 脉冲涡流缺陷检测原理

### 1.1 脉冲电磁涡流效应

金属板材缺陷脉冲电磁涡流效应如图 1 所示。激励线圈脉冲电流信号 $I_a$ 产生的磁力线垂直通过表面 $S$,由麦克斯韦方程可知:

$$I_a = \oint_S \boldsymbol{H}_I \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{1}$$

$\boldsymbol{H}_I$ 为在空间上形成一次脉冲磁场 $B_1$ 的磁场强度。一次场在金属板材表面 $P$ 上产生的磁通量为:

$$\phi_P = \oint_P B_1 \mathrm{d}A \tag{2}$$

$$B_1 = \mu H_I \tag{3}$$

$\phi_P$ 为金属板材表面 $P$ 上的磁通量;$B_1$ 为磁感应强度;$\mu$ 为相对磁导率。由法拉第电磁感应,该磁通量产生的电动势为:

$$e_1 = -\frac{\mathrm{d}\phi_P}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

$e_1$ 为感应电动势。

激励线圈的脉冲电流关断后,一次场 $B_1$ 立即消失,在该电动势作用下金属板材导体内产生了感应涡流 $I_b$,由于趋肤效应,感应涡流不会立即消失,而是随着时间缓慢减弱,同时激发出呈指数衰减的二次场 $\boldsymbol{B}_2$,且与一次场 $\boldsymbol{B}_1$ 相互叠加合成了总磁场 $\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_1 + \boldsymbol{B}_2 \tag{5}$$

$\boldsymbol{B}_2$ 为感应涡流产生的磁感应强度;$\boldsymbol{B}$ 为总磁场的磁感应强度。

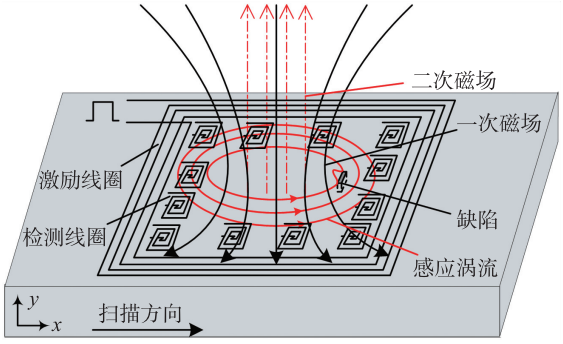



图 1 脉冲电磁涡流效应

金属板材中的缺陷引起涡流变化进而引起 $\boldsymbol{B}_2$ 的扰动,最终使得总磁场 $\boldsymbol{B}$ 变化,检测线圈中的感应电动势为:

$$e_C = \sum_{i=1}^{N} -\frac{\mathrm{d}\phi_{P_i}}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中:$N$ 为线圈匝数;$\phi_{P_i}$ 为第 $i$ 匝线圈的磁通。此外,接收线圈连接高输入阻抗的放大电路输入端,通过接收线圈的电流就非常小,接收线圈组之间的电磁耦合非常微弱,其产生的磁场强度数量级远小于铝板试件感生出的磁场强度,因此线圈的电磁耦合对检测结果影响不大,几乎可以忽略不计。

图 2 所示为脉冲电磁涡流工件缺陷检测系统,该系统由 MCU 主机、线圈驱动电路、信号调理采集模块和探头线圈组成。当金属板材中无缺陷时,$\boldsymbol{B}_1$ 和 $\boldsymbol{B}_2$ 均对称分布,探头 AB 线圈感应电动势相同;当金属板材中有缺陷时,缺陷一侧的 $\boldsymbol{B}_2$ 变小,导致探头 B 线圈感应电动势变大,其感应电压衰减过程也会发生变化。

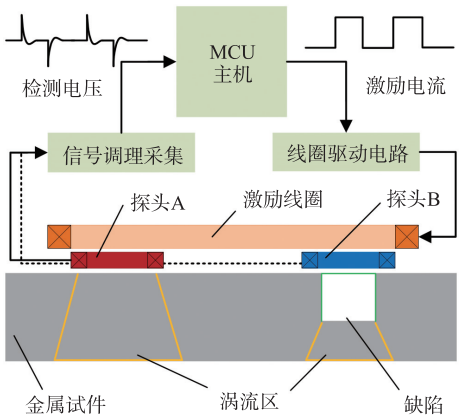



图 2 脉冲电磁涡流工件缺陷检测系统

图 3 为单对数坐标系下 AB 两处检测点的感应电压衰减信号曲线。检测线圈感应电压衰减信号包含丰富的金属板材缺陷特征信息,相较于无缺陷检测点的探头 A,有缺陷检测点探头 B 感应电压响应信号衰减更快。

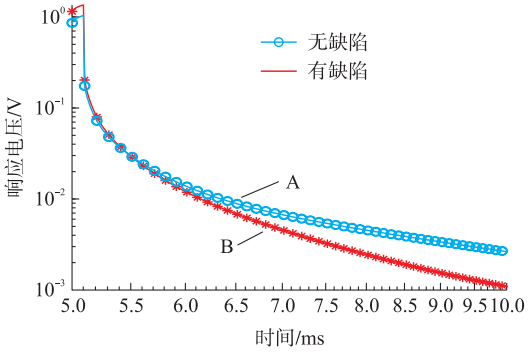



图 3 AB 两处检测点的感应电压衰减信号曲线

### 1.2　二次场积分检测

检测线圈信号衰减过程的早期受一次场 $\boldsymbol{B}_1$ 的影响,中晚期受二次场 $\boldsymbol{B}_2$ 的影响。为避开一次场在检测线圈内产生过电压的影响,关断激励线圈脉冲电流时刻经过一段短延时,二次场才在检测线圈中产生感应电流,取此时刻 $t_p$ 至响应电压归零时刻 $t_d$ 对检测线圈响应电压的积分 $S_p$(Integral Falling Part,INTfp)作为最终的检测信号,用于评估缺陷尺寸特征,其公式为:

$$S_p=\int_{t_d}^{t_P} e_C(t)\,\mathrm{d}t \tag{7}$$

$e_c(t)$ 为检测线圈响应电压衰减信号。积分后的 $S_p$ 更有利于表述整个感应电压衰减过程的特征,且减少采样点利于 MCU 处理数据。

激励线圈脉冲信号经过 0.4 ms 短延时后开始积分,图 4 为在 5.4 ms 时刻开始,检测线圈 AB 两处检测点的感应电压积分曲线模拟结果。在一个关断周期内,B 检测线圈的二次场感应电压衰减更为严重,其最终的感应电压积分值更小。

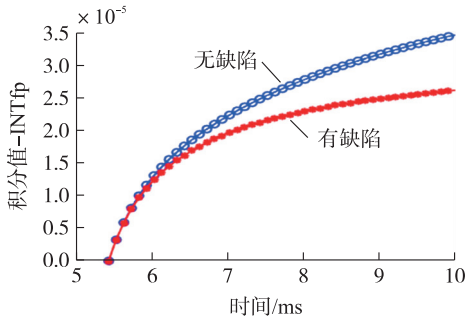



**图 4　检测线圈感应电压积分值**

## 2　阵列脉冲涡流缺陷检测仿真分析

### 2.1　阵列脉冲涡流检测传感建模

使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立阵列脉冲涡流检测传感器仿真模型,如图 5 所示。激励线圈、金属板材试件及空气均为实体,缺陷设置为长 10 mm×宽 1 mm×深 2 mm。激励信号为频率 100 Hz、占空比 50%、幅值 5 V 的脉冲电流。组件材料的电磁参数如表 1 所示,定义初始边界条件,剖分边界层网格以捕获趋肤效应,选择 GMRES 求解器进行迭代,得到金属板材涡流场和磁场的分布结果。

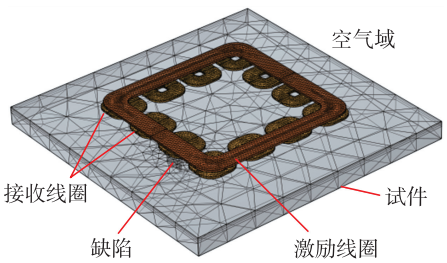



**图 5　脉冲涡流检测传感器仿真模型**

**表 1　仿真模型中各项材料电磁参数**

| 组件 | 材料 | 电导率/(S/m) | 相对磁导率 |
|---|---|---|---|
| 金属试件 | 铝 | $3.77\times10^7$ | 1.0 |
| 线圈 | 铜 | $5.99\times10^7$ | 1.0 |
| 其他区域 | 空气 | 1.0 | 1.0 |

由于金属电磁感应趋肤效应,导体内部涡流所能到达的深度与趋肤深度有关,涡流的趋肤深度公式为:

$$\delta=\frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \tag{8}$$

式中:$f$ 为脉冲电流的激励频率,$\mu$ 为金属板材的磁导率,$\sigma$ 为金属板材的电导率。由式(8)可知,对于该铝板试件,100 Hz 电磁波的渗透深度约为 8 mm,想要实现对埋深大于 8 mm 的铝板缺陷检测,激励线圈脉冲信号频率须低于 100 Hz。

如图 6 所示为阵列传感线圈在 PCB 上的安装位置,在限定边长为 100 mm 的 PCB 电路板上绘制阵列线圈,PCB 板材 M3 螺栓安装距离 $d_1$ 为 5 mm,留出阵列线圈安装间隙 $d_2$ 为 3 mm,如此便确定好了传感器的安装空间位置。为了使线圈内圈横截面积 $A$ 更大,在限定平面 $L\times L$(20 mm×20 mm)的传感空间内需选择方形线圈还是圆形线圈。本文提出内径 $D$ 均为 15 mm 的方形线圈传感器结构和圆形线圈传感器结构。

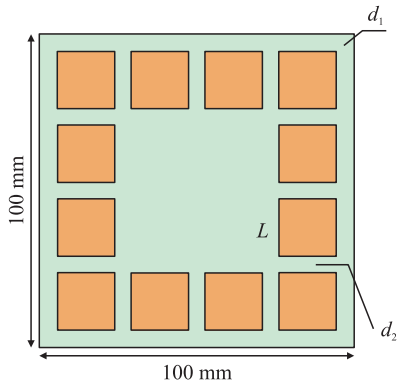



**图 6　阵列传感线圈平面安装位置示意图**

取阵列传感线圈中某一传感单元,两种线圈传感器结构的位置重叠对比如图 7 所示,方形部分为方形线圈,圆形部分为圆形线圈,阴影部分为两线圈磁通面积之差。显然,在有限的传感空间内,

$$\phi_A=BS \tag{9}$$

$$V=-N\frac{\mathrm{d}\phi_A}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

式中:$B$ 为磁通密度,$S$ 是穿过磁场的面积,$\phi$ 为线

圈磁通量，$N$ 为线圈匝数，$\mathrm{d}\phi_A/\mathrm{d}t$ 为磁通密度变化率，$V$ 为线圈感应电压。由式(9)可知通过线圈的磁通量与其磁通面积成正比，由式(10)可知线圈的感应电动势与其磁通面积成正比。

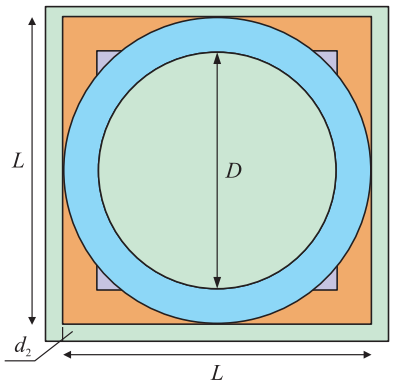



**图 7　方形线圈和圆形线圈平面重叠对比示意图**

方形线圈与圆形线圈的匝数是一样的，其传感线圈的磁通密度和磁通密度变化率都是相同的。

$$V_1=-N\frac{\mathrm{d}\phi_1}{\mathrm{d}t}=-N\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}S_1=-N\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}D^2 \tag{11}$$

$$V_2=-N\frac{\mathrm{d}\phi_2}{\mathrm{d}t}=-N\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}S_2=-N\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\left(\frac{D}{2}\right)^2\pi \tag{12}$$

$$k=\frac{V_1}{V_2}=\frac{4}{\pi}\approx 1.273 \tag{13}$$

通过式(11)、式(12)计算线圈的感应电动势，由式(13)可知方形线圈的感应电动势 $V_1$ 与圆形线圈的感应电动势 $V_2$ 之比为 1.273。而感应电动势大的方形线圈检测信号强度更大，因此，对线圈进行优化和实验测试时，均采用加工制备的方形线圈。

图 8 所示为金属工件内部 8 mm 深度平面的不同时刻涡流分布情况。激励线圈的脉冲信号在 5.00 ms 关断后，对工件内部 8 mm 深度平面以 100 μs 步长做时间切片。在 5.01 ms 时间早期，脉冲信号并未渗透到 8 mm 深度平面，金属板材产生的涡流场很微弱，缺陷局部感生的二次场信号特征也就不明显；在 5.19 ms 时，经过 0.18 ms 的短延时，基于分形理论所调理的相邻小局部分形区域发生融合，涡流分布的集中性增大，由于缺陷阻碍了电磁波的传导，使得在缺陷处的电流密度较小，局部缺陷产生的二次场耦合影响开始显现出来；随着时间的增加，涡流分布形状与激励线圈形状的差异性减小，激励线圈在金属板材表面的投影上涡流密度存在最大值，分布最集中且向线圈中心和外围扩散，涡流中心点处几乎没有偏移电流产生。

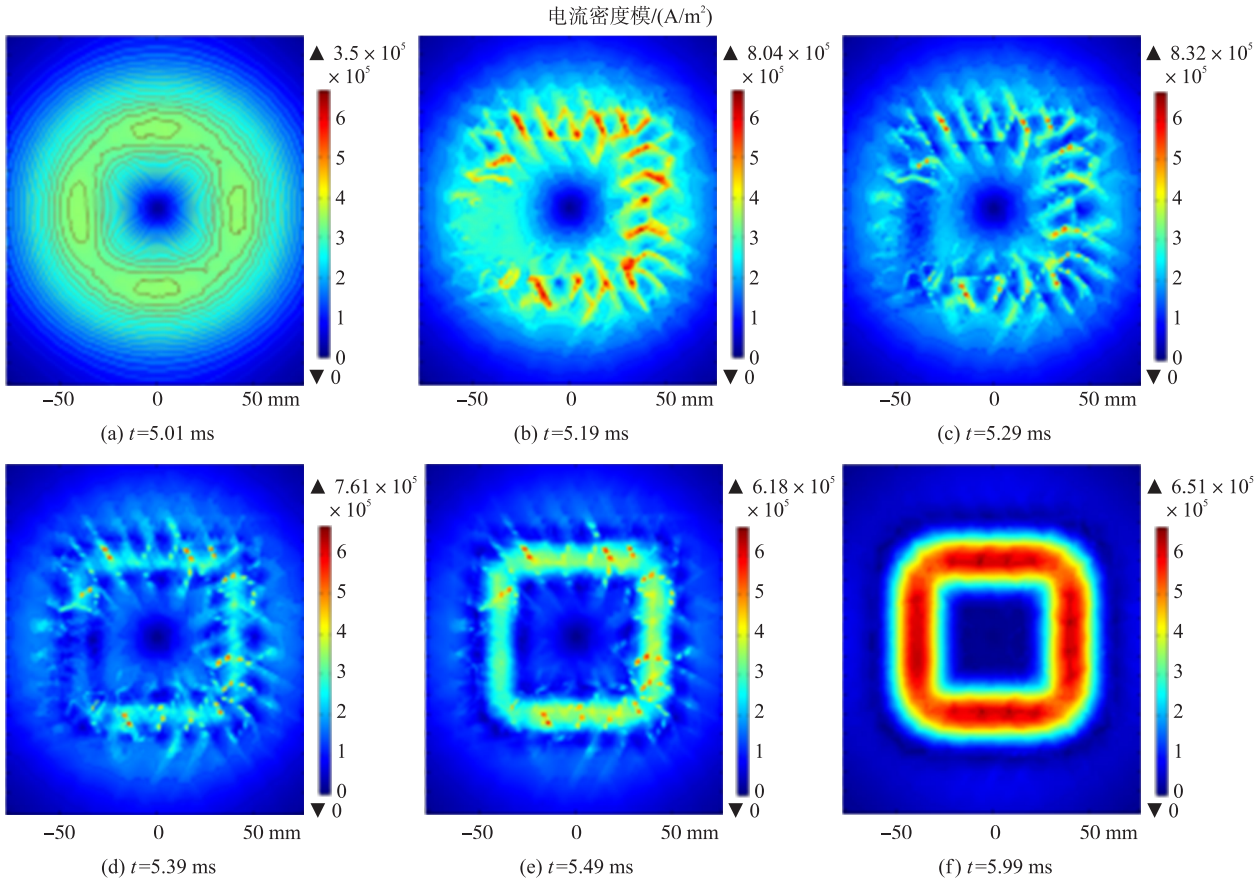
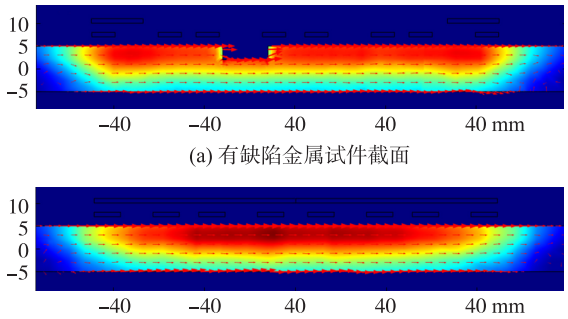



**图 8　8 mm 深度切面的不同时刻涡流分布**

图 9 所示为有无缺陷的金属试件截面的涡流场分布,如图 9(b)所示金属试件无缺陷时,脉冲涡流场在金属试件表面和内部对称均匀分布,位移电流的各向异性一致,涡流产生的二次场在阵列检测线圈空间上对称分布。如图 9(a)所示检测线圈下方试件出现缺陷时,电场位移电流绕过缺陷且从其下方的浅表面流过,缺陷引起的扰动使二次场分布不对称。



(a) 有缺陷金属试件截面



(b) 无缺陷金属试件截面

**图 9　金属试件截面涡流场分布**

图 10 所示为金属试件表面磁通密度分布,左侧为有缺陷的金属试件磁通密度模,右侧为无缺陷的金属试件磁通密度模。无缺陷的试件表面磁通密度模分布形制与矩形线圈保持一致,磁通密度模值越靠近线圈越大,在矩形四角处取到极大值且分布对称。在被放大的局部图中,由于缺陷附近的涡流分布不均匀,其二次场磁场强度有明显减弱,最终体现在检测线圈响应电压信号中。

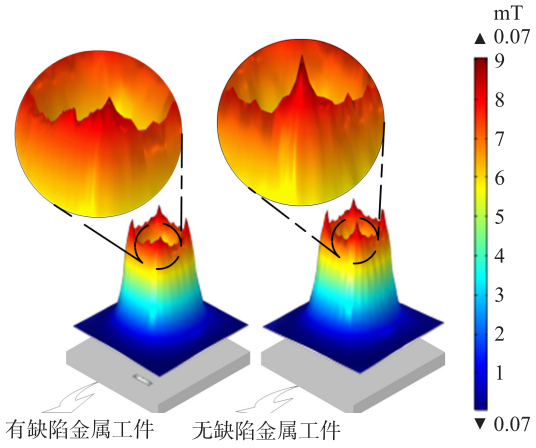



**图 10　金属试件表面磁通密度分布**

## 2.2　传感器优化设计

以限定边长为 10 cm 的正方形 PCB 电路板为传感单元,以检测线圈感应电压信号强度为目标参数,以线圈激励频率、导线匝数以及传感器提离值为设计参数,通过控制变量进行仿真,以便获取最优 PCB 线圈参数。

检测线圈电压信号强度与激励脉冲电流频率的关系如图 11 所示。仅改变激励信号频率,从 10 Hz 以倍频步长递增到 10 kHz,对深 2.0 mm,宽 1.0 mm,长 10.0 mm 的缺陷进行检测,检测线圈感应电压幅值与二次场衰减变化相关,因此在双对数坐标系下,检测线圈电压信号与激励脉冲电流频率呈线性关系。

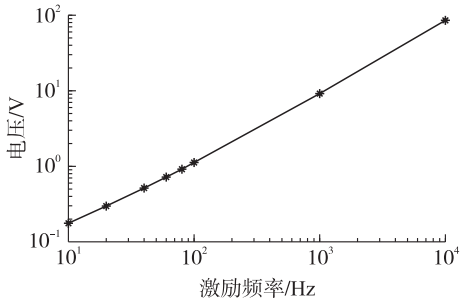



**图 11　频率响应特性**

同理,仅改变线圈匝数,从 6 mm 以 2 mm 为步长增加到 20 mm,对深 2.0 mm,宽 1.0 mm,长 10.0 mm 的缺陷进行检测,检测线圈电压信号如图 12 所示。随着匝数的增加,感应电动势增大,检测线圈电压信号强度增大。

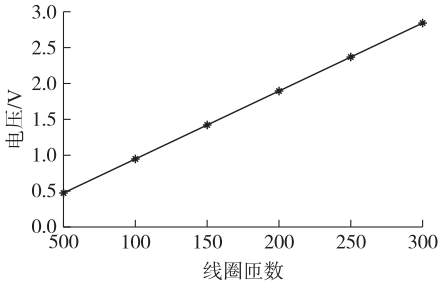



**图 12　线圈匝数影响特性**

为了研究检测线圈电压信号强度与传感器提离值的关系,通过调节被测铝板与传感器检测线圈之间的距离进行仿真。结果如图 13 所示,随着提离值的增大,检测线圈响应电压幅值增大。由于扫查过程有轻微抖动,且阵列线圈外壳有一定的厚度,提离值不宜设计过小。若传感器提离值过大,检测线圈与二次场耦合效果较差[13],故设计实验的提离值取 3 mm 以内是合适的。

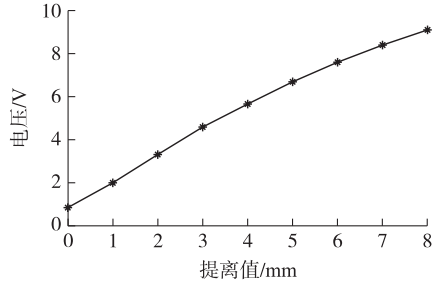



**图 13　提离特性**

### 2.3 不同缺陷二次场特性

为探究不同深度的缺陷对二次场的影响,设置PCB 阵列探头提离值为 3 mm,金属试件表面缺陷为宽 1 mm×长 10 mm,仅通过改变缺陷的深度来仿真计算检测线圈响应电压,所得不同缺陷深度的响应曲线如图 14 所示。随着金属板材缺陷深度的依次递增,检测线圈的响应电压衰减变快。

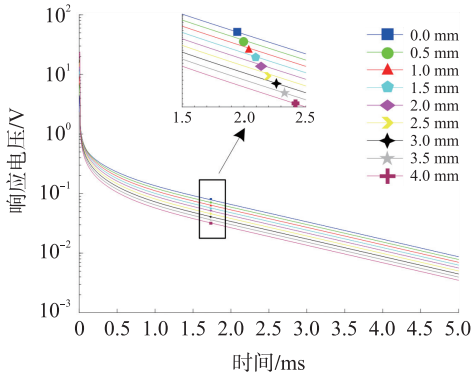



图 14 不同深度缺陷下检测线圈的响应电压

为探究不同截面积的缺陷对二次场的影响,设置金属试件表面方形缺陷深度为 3 mm,仅通过改变缺陷的截面边长来仿真计算检测线圈响应电压,所得不同缺陷横截面面积的响应曲线如图 15 所示。随着缺陷横截面积的增大,检测线圈的响应电压信号衰减变快。

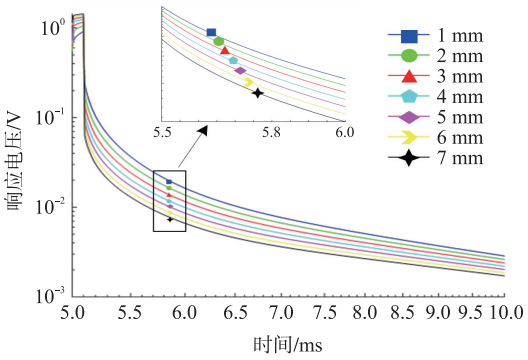



图 15 不同方形缺陷下检测线圈的响应电压

## 3 实验与分析

### 3.1 实验平台搭建

根据仿真优化的结果制备线圈,PCB 传感线圈及其驱动电路、信号调理电路和数据采集卡如图 16 所示。阵列 PCB 传感探头由激励线圈和检测线圈组成,激励线圈为 100 匝的矩形 PCB 平面线圈,绘制于电路板的底层;沿激励线圈的内边界,绘制了 12 个矩形 PCB 检测线圈,制备在电路板的顶层。

为检验探头的有效性,本实验设计了金属板材缺陷检测系统装置,实验平台硬件结构框架如图 17

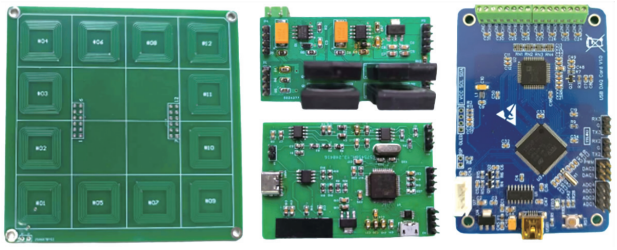


图 16 阵列探头电路板(左)信号调理电路(中下)线圈驱动电路(中上)和数据采集卡(右)

所示。直流电源为线圈驱动电路及 STM32 芯片供电。阵列 PCB 传感探头中,激励线圈的两端连接到 H 桥驱动电路的输出端,检测线圈的两端连接到信号放大器与滤波调理电路的输入端。本实验使用的多通道 ADC 数据采集卡采样率为 200 kHz,取脉冲激励电流信号关断后延时 100 μs 时刻为采样起始点,对检测线圈感应电压进行采样,通过 UART 通信传送至后端的上位机显示。

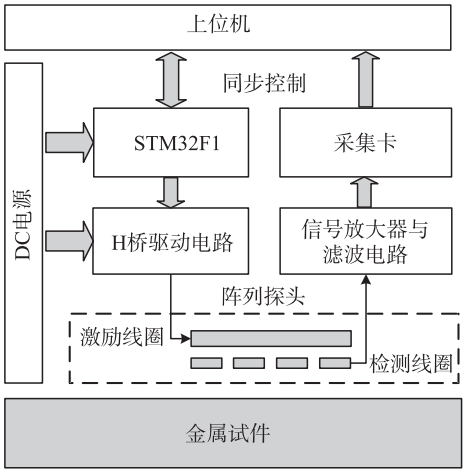



图 17 实验平台硬件结构框图

图 18 所示为金属试件缺陷检测实验平台,使用传感器、金属试件、滑台及其夹具搭建该实验平台,为保证传感器扫查过程中的稳定性,使用夹具将传感器固定在滑轨上。通过滑台控制传感器与金属试件产生相对运动,来模拟扫查金属板材的运动过程。

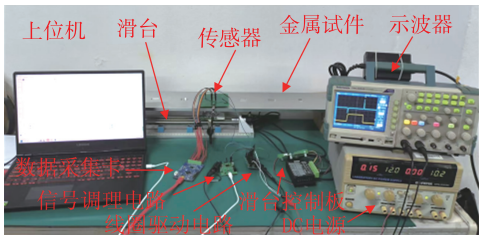



图 18 金属试件缺陷检测实验平台

### 3.2 实验结果与分析

实验设置的激励信号与仿真设置保持一致,单极性脉冲信号频率为 100 Hz,占空比为 50%,过渡

时间为 10 μs。在厚度为 10mm 的金属板材试件 1 和试件 2 上进行实验,其加工出的缺陷凹槽几何参数示意与实物如图 19 所示。试件 1 为角磨机切割的非标准缺陷工件,沿 X 轴坐标正方向,裂缝缺陷深度依次减小。试件 2 为机加工的标准缺陷工件,该组形状各异的缺陷凹槽具有相同的深度和不同的横截面。

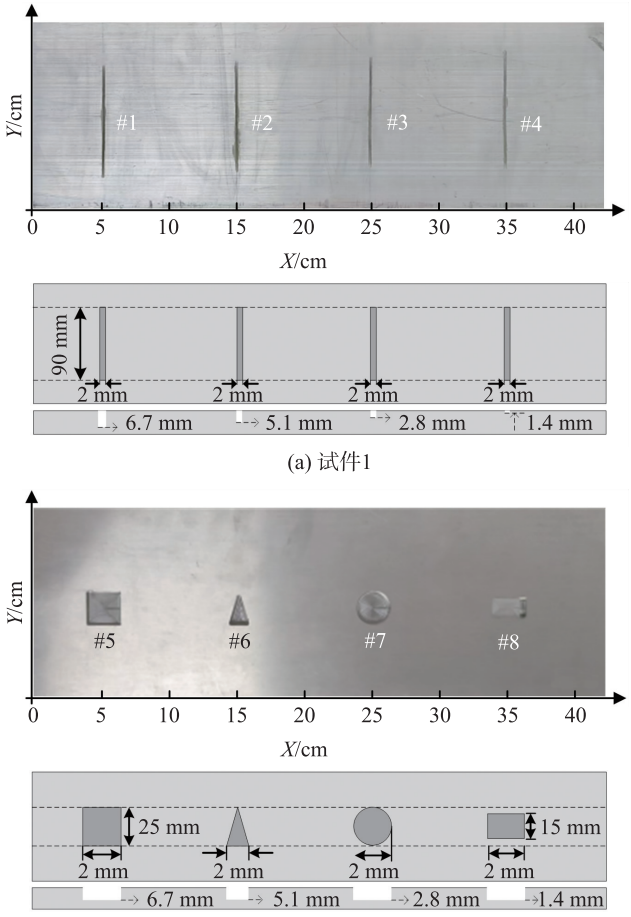



**图 19　金属试件几何参数示意图与实物**

图 20 为试件 1 不同缺陷深度的检测线圈响应电压信号。图 20(a)为检测线圈响应电压衰减信号,随着金属板材缺陷深度的依次递增,检测线圈响应电压衰减越快。图 20(b)为检测线圈响应电压信号积分曲线,试件缺陷深度越大,检测线圈响应电压积分值越小。

图 21 为试件 2 不同缺陷横截面积的检测线圈响应电压信号。该组缺陷凹槽的横截面面积由大到小排序为#5 号缺陷 625 $mm^2$、#7 号缺陷 490.6 $mm^2$、#8 号缺陷 375 $mm^2$ 及#6 号缺陷 187.5 $mm^2$。实验结果表明,随着缺陷横截面积越大,检测线圈的响应电压信号衰减越快,其对应的电压积分值越小。

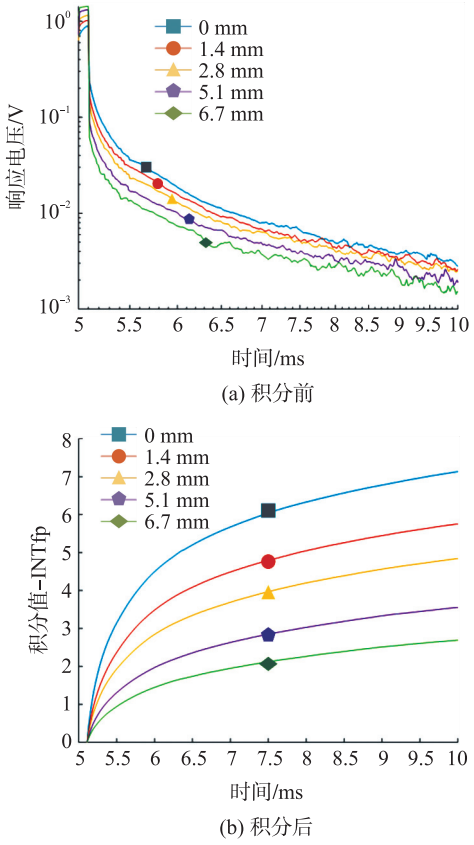



**图 20　试件 1 不同缺陷深度的检测线圈响应电压**

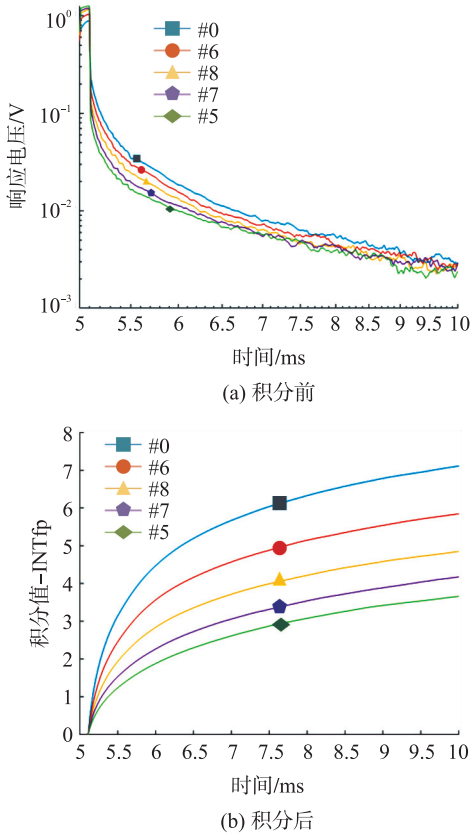



**图 21　试件 2 不同缺陷截面积的检测线圈响应电压**

## 4 结论

本文设计了一种基于矩形阵列 PCB 线圈传感探头,进行金属板材缺陷检测的阵列脉冲涡流检测传感器仿真模型,对脉冲涡流检测原理以及检测线圈的电压响应特性进行了分析研究,通过仿真优化得到线圈的最佳参数,并由此制备了一个阵列 PCB 传感的线圈探头。通过检测不同缺陷特征的金属板材,验证了传感探头的缺陷检测性能。实验结果表明:①阵列 PCB 线圈传感探头可快速定位金属板材缺陷;②检测线圈的响应电压信号强度与线圈匝数及激励频率呈线性关系;③金属板材缺陷深度与截面积越大,检测线圈的响应电压衰减越快,衰减电压的积分值则越小;④由于检测过程中存在抖动等不稳定因素,因此对缺陷的量化评估还需要进一步的研究。

**参考文献:**


[1] 杨冉,翟国富,徐博,等. 基于脉冲涡流技术的柔性平面差分探头设计[J]. 仪表技术与传感器,2022(10):1-5.

[2] Lahrech A C,Naidjate M,Helifa B,et al. Development of an Axial Rotating Magnetic Field Multi-Coil Eddy Current Sensor for Electromagnetic Characterization of Stratified CFRP Materials [J]. NDT & E International, 2022, 126:102589.

[3] 田贵云,高斌,高运来,等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1763-1780.

[4] Li C,Fan M B,Cao B H,et al. Accurate Thickness Measurement Using Eddy Current System Based on Novel Transformer Model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2022,71:6007712.

[5] Fan M,Cao B,Yang P,et al. Elimination of Liftoff Effect Using a Model-Based Method for Eddy Current Characterization of a Plate[J]. NDT & E International,2015,74:66-71.

[6] 牛国钰,潘巧生,万澳德,等. 一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(10):123-133.

[7] 陈国龙,曹政,张帅帅,等. 基于科赫差测量平面涡流传感器的裂纹检测性能研究[J]. 机械工程学报,2023,59(10):17-29.

[8] Zhou D,Chang X,He Y,et al. Influence of Key Factors on Eddy Current Testing Sensitivity and Monotonicity on Subsurface Depth for Ferromagnetic and Non-Ferromagnetic Materials[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2018,278:98-110.

[9] 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.

[10] 唐波,郭必奔,陈伟,等. 径向磁化电磁传感器设计和实验研究[J]. 计量学报,2023,44(10):1557-1563.

[11] Ma Q,Tian G,Gao B,et al. Novel Common-Differential Inductance Coils with Dual Signal Conditionings for Separation of Lift-off and Defects[J]. IEEE Sensors Journal, 2023,24(2):2055-2065.

[12] Xie S,Duan Z,Li J,et al. A Novel Magnetic Force Transmission Eddy Current Array Probe and Its Application for Nondestructive Testing of Defects in Pipeline Structures [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 309:112030.

[13] Chen H,Liao L,Zhou J,et al. Magnetic Resonance Eddy Penetrating Imaging for Detecting Reinforcement Corrosion in Concrete[J]. Automation in Construction, 2024,165:105512.


**谭 超**(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为磁场传感器、微弱信号检测、无损检测技术等,ctgutc@ctgu.edu.cn;

**朱成昂**(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为金属板材无损检测技术等,202208540021054@ctgu.edu.cn。