

高频涡流阵列探头在 CFRP 缺陷检测中的应用*

程 军^{1,2}, 刘蒙蒙¹, 汪步云^{1,2}, 许德章^{1,2}, 裘进浩³, 季宏丽³

(1. 安徽工程大学安徽省机器人产业共性技术研究中心 芜湖, 241000)

(2. 安徽工程大学人工智能学院 芜湖, 241007)

(3. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了实现高频印制电路板(printed circuit board, 简称 PCB)线圈阵列探头对碳纤维增强树脂(carbon fiber reinforced polymer, 简称 CFRP)复合材料缺陷的涡流检测, 提出一种通过将 PCB 线圈连接不同电缆线以提高深层缺陷检测灵敏度的方法。首先, 分析高频 PCB 阵列线圈的结构参数对磁感应强度和阻抗特性的影响, 并确定线圈的内外径和线径尺寸等参数; 其次, 建立仿真模型, 研究线圈的层数、线径对阻抗谐振频率的影响, 并利用阻抗分析仪测量 PCB 线圈以及线圈连接不同类型同轴电缆接头(bayonet nut connector, 简称 BNC)电缆线时的阻抗。实验表明, 电缆线的寄生电容与谐振频率呈负相关关系, 较长的电缆线可提高对深层缺陷的检测能力; 最后, 建立 CFRP 检测实验平台, 发现当高频 PCB 阵列线圈在连接不同 BNC 电缆线时, 能够有效检测深层缺陷。该研究为通过调整连接 PCB 线圈的电阻-电感-电容分支电路参数来提高深层缺陷检测精度提供了参考。

关键词 涡流阵列检测; 高频印制电路板线圈; 阻抗分析; 碳纤维增强树脂复合材料; 缺陷定量检测

中图分类号 TH865; TM154.2

引 言

碳纤维增强树脂复合材料因其轻质高强、耐腐蚀等优异性能, 被广泛用于航空航天、汽车制造等领域^[1]。然而, 其多相组分和层叠结构导致容易产生气孔、分层、纤维断裂等缺陷, 给质量控制和安全性带来挑战。涡流检测作为一种非接触式电磁无损检测方法, 由于自动化程度高、无需耦合剂等优势, 在 CFRP 缺陷检测中受到广泛关注。涡流阵列(eddy current array, 简称 ECA)技术通过特殊传感器设计, 结合嵌入式系统和数字信号处理技术, 成为涡流检测领域的重要发展方向。

近年来, ECA 技术在 CFRP 缺陷检测方面受到广泛关注。Mizukami 等^[2]运用高频涡流阵列检测技术在 3 MHz 频率下实现了多向 CFRP 层压板中的分层可视化。Sun 等^[3]采用跑道型线圈和霍尔传感器设计了线性涡流阵列, 通过调制霍尔传感器的偏置电流来消除线圈电磁场对霍尔信号的影响。岳明明等^[4]设计了一种由 30 个刚性线圈等间距固定在柔性橡胶垫上组成的阵列线圈, 该线圈可以连接成多种结构形式, 能够快速有效地检测飞机叶片等小曲

率构件的裂纹缺陷。杨洪斌等^[5]对发电机叶片进行检测时, 为了不拆卸叶片设计了柔性阵列涡流探头, 使得两者可靠贴合。虽然 ECA 检测方法具有以上诸多优点, 然而, ECA 检测方法对制备小尺寸高频阵列线圈的工艺要求高, 很难保证每个线圈的尺寸、导线间距和阻抗特性等参数一致, 这会造成线圈电压信号一致性差、校准困难。

笔者提出了一种基于 PCB 的高频线圈涡流阵列探头。阵列线圈采用 PCB 制备, 工艺成熟, 一致性好, 价格低廉, 还可根据被测对象的要求加工成柔性基底, 方便定制成特殊形状^[6-7]。笔者通过理论与仿真分析, 优化了线圈尺寸、匝数和阻抗特性等参数, 并通过连接不同 BNC 电缆调整谐振频率, 以满足不同深度缺陷的检测需求, 提升了涡流检测的灵活性与适用性。

1 阵列线圈工作原理及参数设计

1.1 工作原理

PCB 阵列线圈是一种新型涡流传感器, 适用于

* 国家自然科学基金资助项目(51605229); 安徽省高校自然科学基金资助项目(2023AH050926); 安徽省经信委制造业重点领域揭榜挂帅资助项目(JB22031); 安徽未来技术研究院企业合作资助项目(2023qyhz35)

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-12-16

对零部件的快速大面积检测,提高检测效率。图1为PCB线圈涡流检测原理图。

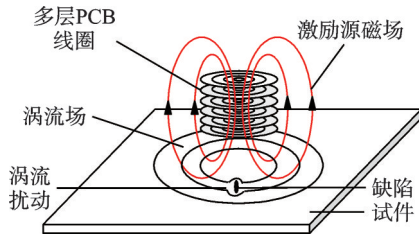


图1 PCB线圈涡流检测原理图

Fig.1 Schematic of PCB eddy current coil inspection

PCB线圈的结构参数直接影响涡流探头的灵敏度和检测性能。

根据毕奥-萨伐尔定律,环形线圈在中心轴上距中心距离 x 处的磁感应强度值 B 的计算公式^[8]为

$$B = \frac{\mu_0 N I r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

其中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空磁导率; N 为天线线圈的匝数; I 为线圈中电流强度; r 为线圈半径。

由式(1)可知,磁感应强度值 B 与距离 x 的三次方成反比,随着距离增加而减弱。在电流固定的情况下,增加匝数或面积可提高磁通量,但也会增加电感^[8]。线圈的磁通量 Φ 的计算公式为

$$\Phi = \int B dS \quad (2)$$

为了得到稳定的高频传输信号,并隔绝低频噪声,线圈需与同轴电缆串联^[9]。线圈电容 C 由匝间电容 C_0 和同轴电缆的寄生电容 C_1 组成,其关系式^[9]为

$$f' = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_1)}} \quad (3)$$

由式(3)可知,线圈的谐振频率 f' 与电感 L 和 C_0 有关,尺寸越大, L 增大,电容减小。

阻抗的计算公式^[10]为

$$Z = \frac{\rho l}{S} + \frac{j\omega\mu_0\mu_r N^2 S}{l} + \frac{d}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r S} \quad (4)$$

其中: S 为有效截面积; ϵ_0 为真空的介电常数; ϵ_r 为

PCB基体的相对介电常数; l 为导线长度; d 为绕组间距; N 为线圈匝数; $\omega = 2\pi f$, 为对应线圈工作频率 f 的角频率; μ_0 为真空的磁导率; μ_r 为PCB线圈的相对磁导率; ρ 为铜的电阻率。

1.2 有限元仿真分析

为了确定线圈层数并分析其对阻抗的影响,根据线圈的实际尺寸采用COMSOL有限元仿真软件绘制如图2所示的二维轴对称线圈模型。该模型被分为3个区域:厚度为1 mm的外层无限元域、长宽高为6 mm×4 mm×4 mm矩形空气域以及PCB线圈区域。

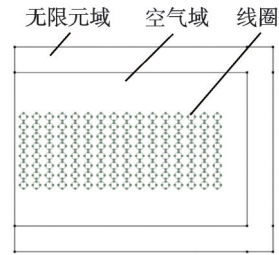


图2 二维轴对称线圈模型

Fig.2 Two-dimensional axisymmetric coil model

线圈采用串联连接,内外径和匝距分别为0.2, 8和0.25 mm。每匝线圈的激励电流为0.01 A,频率扫描范围为1 Hz~100 MHz。设计3组仿真对比实验,每组仿真实验所用的线圈层数分别为4, 8和12,匝数为64, 128和192。通过改变线圈的层数得到线圈阻抗随频率的变化规律。

图3为高频PCB线圈阻抗-匝数特性曲线。由图3(a)可知,线圈的阻抗模 $|Z|$ 随着频率的增大均为先增大后减小,并且随着线圈层数增加,阻抗模到达峰值点的谐振频率值也在降低,分别为67, 37和23 MHz。由图3(b)可知,相位 θ 随着线圈阻抗模值 $|Z|$ 的突变而发生一次相位翻转。由图3(c), 3(d)可知,线圈电阻和电抗随频率的变化趋势与阻抗模的基本一致。因此可知,随着线圈层数的增加,谐振频率逐渐减小。

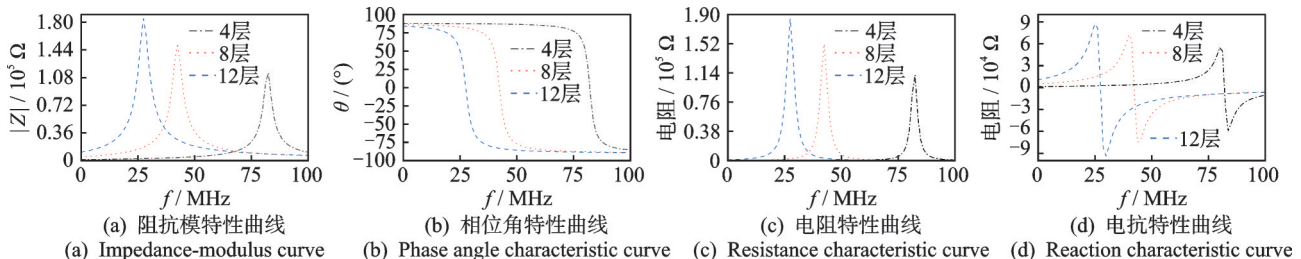


图3 高频PCB线圈阻抗-匝数特性曲线

Fig.3 High-frequency PCB coil impedance curve vs. number of turns

除了匝数,线圈导线横截面的尺寸也需要优化。在保证匝数不变的情况下,将线圈的线径分别设为 0.04, 0.14 和 0.24 mm。图 4 为高频 PCB 线圈线径阻抗特性曲线。由图 4 可知,线圈的阻抗模、电

阻和电抗随着频率的增大,均表现为先增大后减小,且随着线径的增大,阻抗模到达峰值点的谐振频率值也在降低,分别为 28, 37 和 61 MHz。因此,将线圈设计成 8 层线径为 0.14 mm、匝数为 128 的形状。

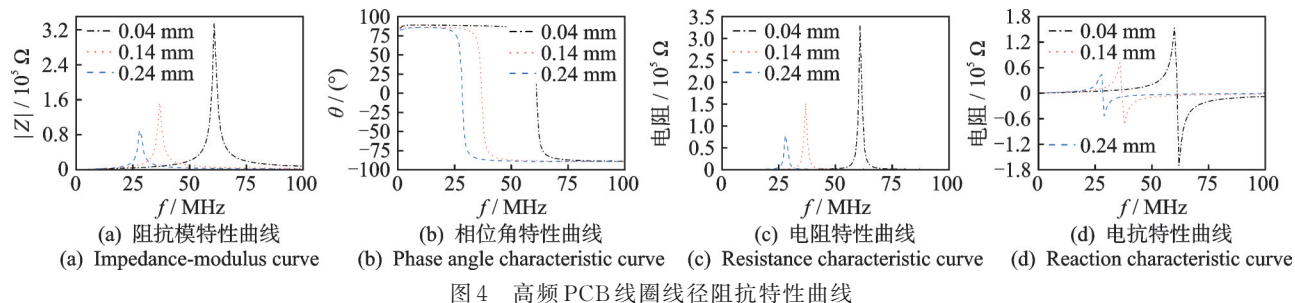


图 4 高频 PCB 线圈线径阻抗特性曲线

2 PCB 阵列线圈制备及实验

2.1 PCB 阵列线圈

制备高频 PCB 线圈阵列探头时,首先,准备多个由导电铜箔和绝缘层构成的覆铜板,在上面绘制线圈形状与布局后,用盲孔将其堆叠;其次,通过热压法将多层覆铜板固定在长为 100 mm,宽为 24 mm,厚度为 1.6 mm 的 PCB 板上,20 个线圈分 2 层排列,每层 10 个,上下层线圈中心距为 9 mm 且偏移量为 5 mm,线圈表面与 PCB 板底面距离分别为 1.5 mm 和 0.4 mm;最后,引出接线。图 5 为高频 PCB 线圈涡流阵列探头。

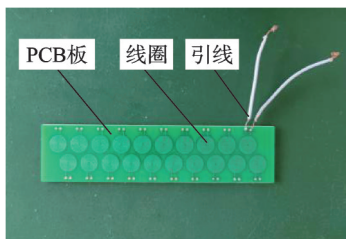


图 5 高频 PCB 线圈涡流阵列探头

Fig.5 High-frequency PCB array coil eddy current probe

2.2 阻抗实验测量

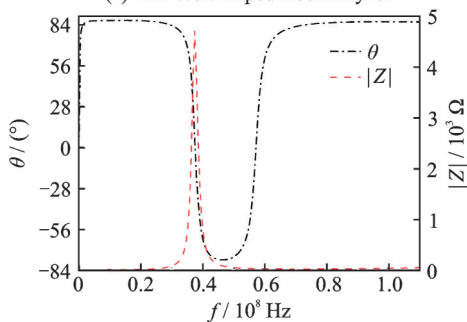
在制备好的高频 PCB 阵列线圈电极上焊接 2 条引线,对单个线圈进行阻抗测量。高频 PCB 线圈阻抗测量如图 6 所示。如图 6(a)所示,测量所用的 ZX-8590 阻抗分析仪频率扫描范围为 10 Hz~110 MHz,通过上位机记录线圈频域内的阻抗响应结果 $|Z|$ 和 θ ,绘制各参数随频率变化的响应曲线。如图 6(b)所示,阻抗随频率增长的变化趋势与有限元仿真结果几乎一致,在 37 MHz 左右达到峰值,随

后下降。从图 6(c)可以看出,随着测试频率的连续变化,线圈电抗值在若干频率点会出现脉冲突变,突变点分别在 10 Hz, 37 MHz 和 60 MHz 处。同时,线圈阻抗的相位 θ 会在线圈电抗值突变处出现一次相位翻转。图 6(d)表明,线圈的电阻与阻抗模的变化



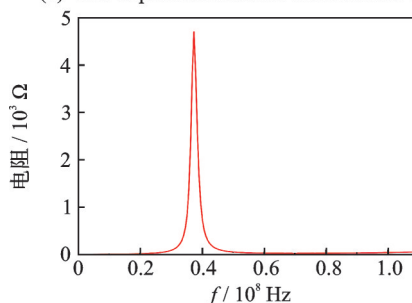
(a) ZX-8590 阻抗分析仪

(a) ZX-8590 impedance analyzer



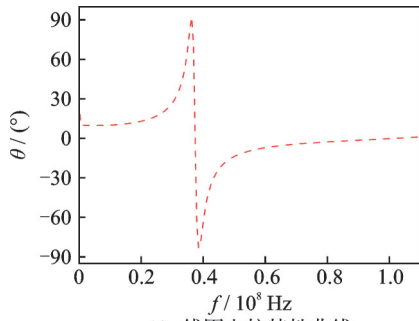
(b) 线圈阻抗模特性曲线

(b) Coil impedance modulus characteristic curve



(c) 线圈电阻特性曲线

(c) Coil resistance characteristic curve



(d) 线圈电抗特性曲线
(d) Coil impedance characteristic curve

图6 高频PCB线圈阻抗测量

Fig.6 High-frequency PCB coil impedance

曲线一致。可见,在此参数下制备出的高频PCB线圈与仿真结果一致,结果可信。

建立如图7所示的线圈-电缆系统电路模型,用来分析线圈阻抗与外接电阻-电容-电感分支电路的关系。

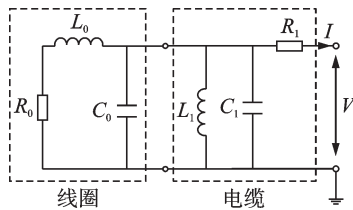


图7 线圈-电缆系统电路模型

Fig.7 Circuit model of coil-cable system

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z_1} = R_1 + \frac{1}{j\omega L_1} + j\omega C_1 \quad (6)$$

$$Z = \frac{Z_0 Z_1}{Z_0 + Z_1} \quad (7)$$

其中: R_0, L_0, C_0 分别为线圈的电阻、电感以及电容; R_1, C_1, L_1 分别为外接电路BNC电缆线的电阻、电容以及电感; Z_0 为线圈阻抗; Z_1 为电缆阻抗; Z 为总阻抗。

表1为在1 kHz频率下,利用阻抗分析仪得到的电感-电容测量数据。根据式(3)计算出3种情况下的谐振频率分别为36.59,10.05和7.47 MHz,且谐振频率计算值与测量值基本相同。可见,线圈在连

表1 电感-电容测量数据

Tab.1 Inductance-capacitance measurement data

实验组	电感/ μH	电容/pF	谐振频率/ MHz
线圈	2.32	8.17	36.56
电缆1+线圈	3.26	76.92	10.05
电缆2+线圈	3.45	131.45	7.47

接不同电缆线后会降低谐振频率,该电路模型可用于定量分析阻抗特性的变化。

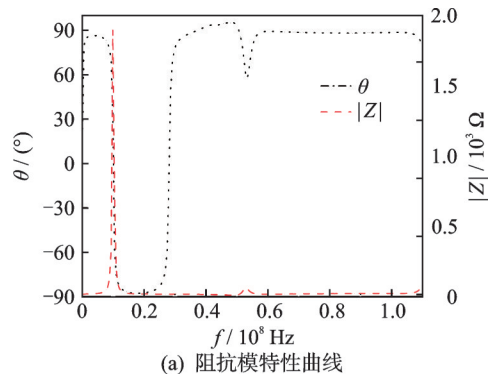
线圈-BNC 电缆线阻抗测量如图8所示。图8(a)中,BNC 电缆线不带三通转接口且电缆线较短;图8(b)中,BNC 电缆线为带三通转接口且电缆线较长。



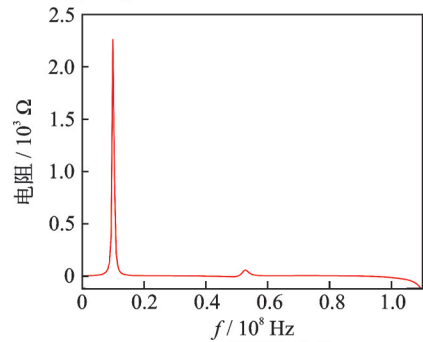
图8 线圈-BNC 电缆线阻抗测量

Fig.8 Impedance measurement of coil-BNC cable system

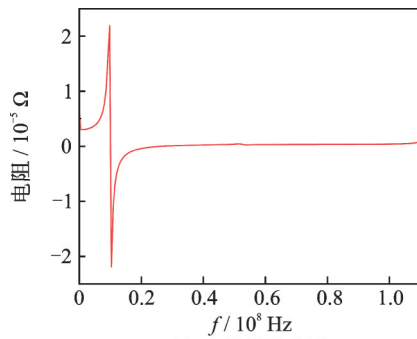
将电缆与高频PCB线圈连接并测量其阻抗。图9为电缆1+线圈阻抗特性曲线。图10为电缆2+线圈阻抗特性曲线。可见,不同的电缆线会在



(a) 阻抗模特性曲线
(a) Impedance modulus characteristic curve



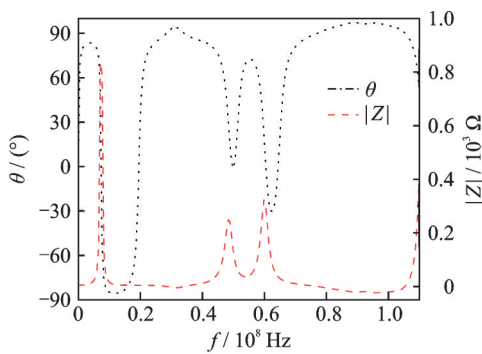
(b) 电阻特性曲线
(b) Resistance characteristic curve



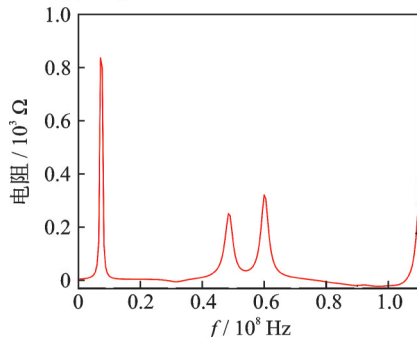
(c) 电抗特性曲线
(c) Reactance characteristic curve

图 9 电缆 1+线圈阻抗特性曲线

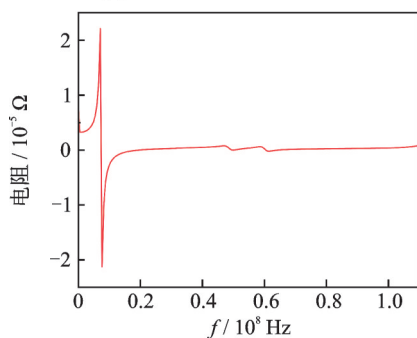
Fig.9 Cable 1+coil impedance curve



(a) Impedance modulus characteristic curve



(b) 电阻特性曲线
(b) Resistance characteristic curve



(c) 电抗特性曲线
(c) Reactance characteristic curve

图 10 电缆 2+线圈阻抗特性曲线

Fig.10 Cable 2+coil impedance curve

频域范围内造成不同的阻抗特性,但电缆+线圈阻抗模值和相角的变化规律具有高度的一致性。电

缆+线圈的电阻和电抗的变化与阻抗随着频率的变化趋势基本一致。在阻抗模值的脉冲突变处,线圈的电抗由感性电抗转为容性电抗,随后再次恢复为感性电抗。随着测试频率的变化,2种BNC电缆线+线圈的谐振频率分别为10和7.7MHz。因此,线圈连接电缆后可以明显降低其谐振频率,这为提出CFRP不同深度缺陷检测灵敏度^[11]提升方法提供了理论及技术支持。

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

为了验证连接不同的BNC电缆线时高频PCB线圈谐振频率的改变,搭建高频PCB阵列涡流检测实验平台,如图11所示。其检测流程为:首先,将高频PCB线圈涡流阵列探头通过探头柔性夹具安装在三坐标位移台上,通过运动控制模块控制三坐标位移台在x,y方向的运动步长、速度以及点位;其次,在位移台运动停止时,继电器轮询通断模块通过RS232串口向继电器发送控制指令,控制每个线圈的通断时长以及通断次数;最后,线圈通电时数据读取与存储模块对阻抗分析仪测量得到的阻抗值信号进行读取和保存。

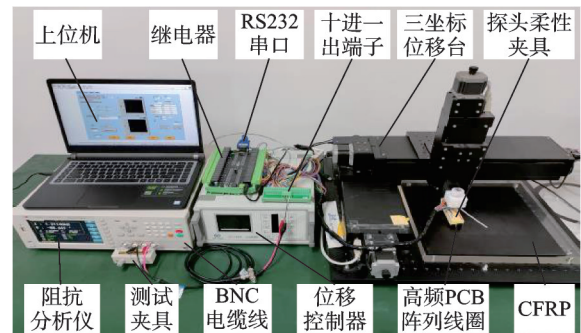


图 11 高频 PCB 阵列涡流检测实验平台

Fig.11 PCB array ECA experimental platform

3.2 缺陷检测

通过改变线圈的谐振频率,对碳纤维复合材料进行实验检测。如图12所示,所用的碳纤维正交板试件为300mm×300mm×5mm。试件由碳纤维预浸料经热压机加热加压固化而成,铺层方式为0°/90°对称重复铺设,一共铺设40层。通过磨削和铣削,在板表面加工出不同深度和形状的凹槽以代表体积型裂纹缺陷。形状分别为扫描区域2中直径为10,8和6mm的正方形,直径为10,8和6mm的圆

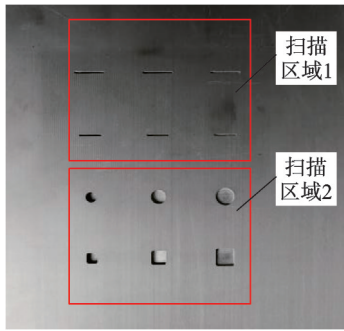


图12 碳纤维正交板试件

Fig.12 Orthogonal CFRP plate specimen

形,扫描区域1中长为12 mm、宽为1 mm和长为16 mm、宽为1 mm的矩形;深度分别为2,3和4 mm。定义缺陷深度为凹槽最深处距板上表面的距离。

高频PCB阵列线圈检测方式如图13所示。线圈按照箭头方向依次接入继电器中,通过继电器轮询控制20个线圈的通断,通断一次为一组线圈检测轮询。

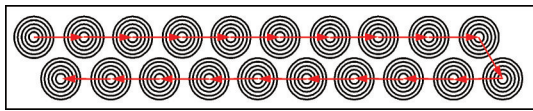


图13 高频PCB阵列线圈检测方式

Fig.13 High-frequency PCB array coil detection method

线圈扫描完待检区域后,对通电线圈的电抗进行处理,即

$$\Delta X_i = X_i - X_1 \quad (8)$$

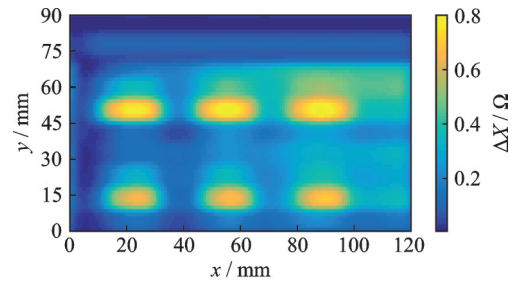
其中: X_i 和 X_1 分别为第 i 组和第1组线圈的扫描电抗值; $i=1,2,\dots,120$; ΔX_i 为两者的差。

线圈扫描步长为1 mm,每个线圈进行6次采样。使用处理后的数据得到如图14所示的正面缺陷检测扫描图,工作频率为2 MHz。图14(a)对应CFRP区域1扫描结果,图中清晰地反映出长条缺陷裂纹,图14(b)对应区域2扫描结果,2个区域的缺陷均能检测出来。由于PCB线圈的直径大于缺陷宽度,矩形缺陷的宽度检测结果大于实际矩形缺陷宽度,故圆形缺陷检测出的伪彩图为方型。但是,对于方型和圆形缺陷检测的尺寸与原缺陷几乎相同,在进行背面隐藏缺陷检测时,用区域2作为隐藏缺陷进行涡流检测。

在涡流检测中,导体中缺陷的检测灵敏度与涡流的趋肤效应有关,趋肤深度 δ 的计算式^[12]为

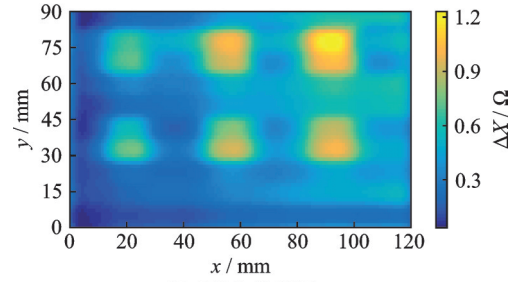
$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (9)$$

其中: δ 值对应涡流衰减到其上表面强度36.8%时的深度; 2δ 值为衰减量为13.5%时的深度。



(a) 区域1伪彩图

(a) Pseudo-color map of area 1



(b) 区域2伪彩图

(b) Pseudo-color map of area 2

图14 正面缺陷检测扫描图

Fig.14 Frontal defect scanning images

对于导体中的缺陷,若要达到较高的检测灵敏度,要求 2δ 值与缺陷深度相当,这样才能够实现有效检测,数值过大或过小都会造成灵敏度显著降低。

在式(9)中,设 $\mu = \mu_0$, σ 的值为 $39\ 000\ \text{s/m}^{[13]}$,对于本研究中换CFRP板试件,最佳的检测频率为1 MHz,此时 2δ 值为5 mm,正好能覆盖试件整个厚度方向。这也给涡流线圈探头提出了要求,线圈-电缆探头系统的谐振频率应与涡流检测的最优频率接近,谐振频率过高会导致低频处阻抗值小且测量效果差。

对未连接BNC电缆线,连接电缆1和电缆2的高频PCB线圈涡流阵列探头做5组从背面扫描试件区域2的实验,每组实验频率分别为0.5,1,1.5,2和3 MHz。CFRP背面检测实验结果如图15所示。图中红色框为线圈受到提高以及扰动出现的异常数据,可以忽略。为定量评估高频PCB线圈连接电缆线可以检测不同深度的缺陷,二维伪彩图的对比度(contrast ratio,简称CR)的计算公式为

$$\text{CR} = \frac{\max |X_d - \text{ave}(X_{nd})|}{\max |X_{nd} - \text{ave}(X_{nd})|} \quad (10)$$

其中: X_d 为缺陷区域信号; X_{nd} 为非缺陷区域信号值。

当激励频率为3 MHz时,3种扫描方式均不能测出最深层缺陷,频率为0.5 MHz时,未连接电缆线的线圈检测不出任何深层缺陷,而连接电线的线圈

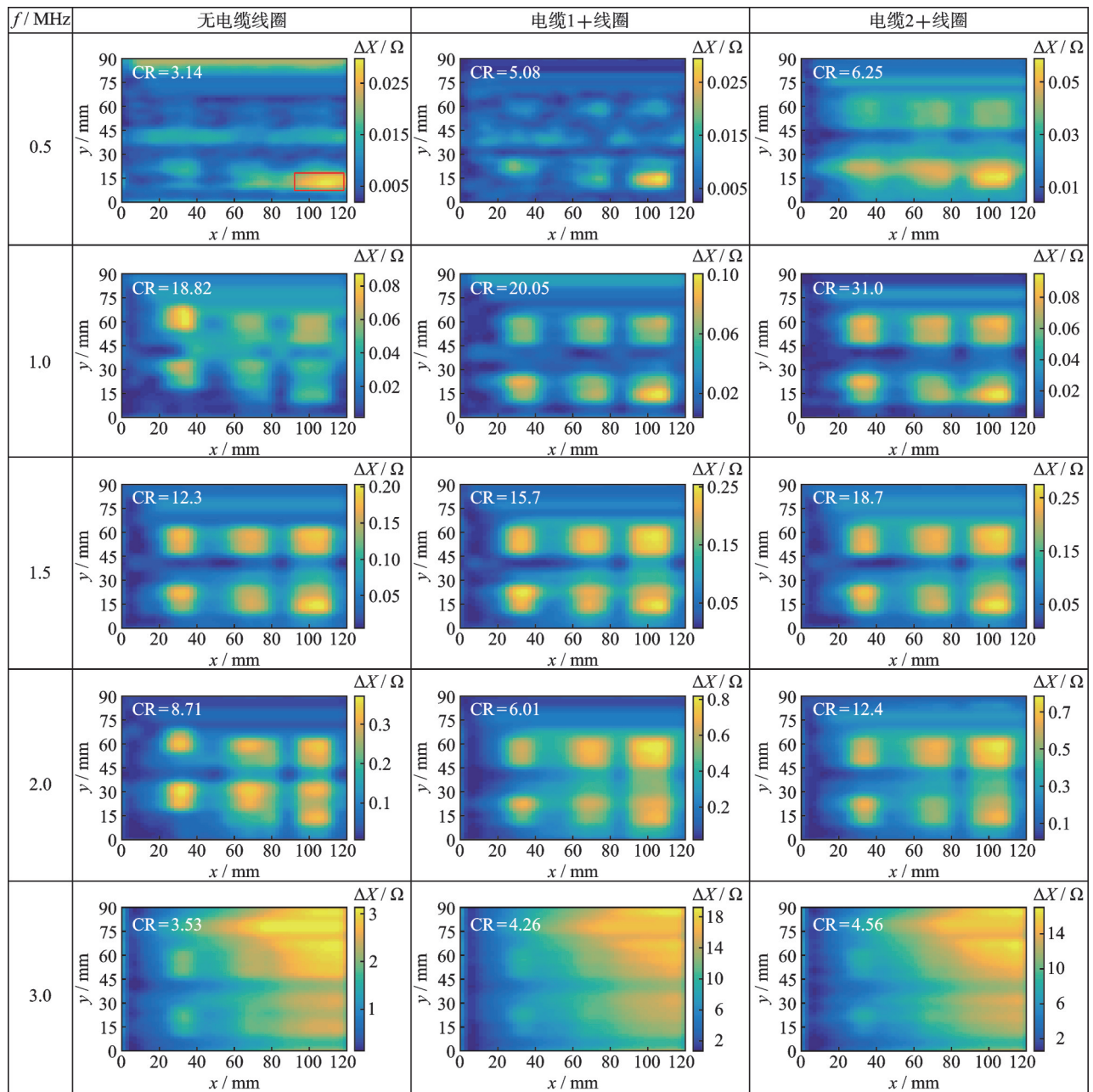


图 15 CFRP 背面检测实验结果

Fig.15 Experimental results of CFRP backside detection

可以检测出缺陷。同样,在相同频率下,未连接电缆线的线圈始终小于连接电缆线的线圈信号对比度。可见,随着线圈激励频率逐渐增加,三者均在激励频率为 1 MHz 时可以最为完整清晰地检测出所有距上表面最深的隐藏缺陷,但无电缆线圈的对比度弱于电缆+线圈的对比度,电缆 2+线圈的对比度始终强于其余两者。

图 16 为 CR-频率关系曲线,显示了线圈在有无电缆时的对比度,三者均是随着频率先增大后减小,但线圈连接电缆 2 时的对比度最大,为较深的隐藏缺陷提供最佳的可视性。

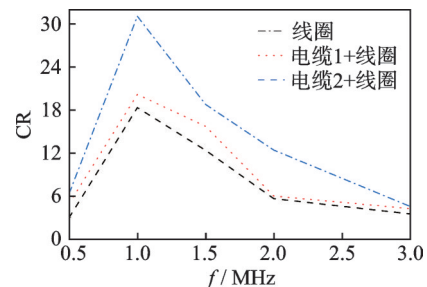


图 16 CR-频率关系曲线

Fig.16 Relation curve of CR vs. frequency

4 结 论

1) 设计了一种高频 PCB 线圈涡流阵列探头对

CFRP 深层缺陷进行检测,通过对线圈连接不同类型的电缆,改变线圈的谐振频率,达到对不同深度的隐藏缺陷检测和获取最大的检测灵敏度。结果表明,随着线圈的层数增加,其谐振频率逐渐减小。为了综合考虑线圈的制造工艺以及使用要求,确定线圈为每层16匝、分8层、共128匝的模型。

2) 利用阻抗分析仪对高频PCB阵列线圈以及高频PCB阵列线圈连接不同类型电缆线时进行阻抗分析,发现电缆线的寄生电容越大,线圈的谐振频率会越小。通过建立实验平台,进一步验证了当高频PCB阵列线圈在连接电缆线时可以很好地提高深层缺陷的检测信号,且电缆线越长,检测信号对比度越好。本研究可为高频PCB阵列线圈在连接不同电阻-电感-电容分支电路时对CFRP深层缺陷检测的应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等.碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J].复合材料学报,2015,32(2):301-316.
CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316. (in Chinese)
- [2] MIZUKAMI K, HIOKI S, MORIYAMA K, et al. Eddy-current array-probe technique for imaging near-surface and deep-lying delaminations in multidirectional carbon fiber composites [J]. Composite Structures, 2021, 276: 114537.
- [3] SUN H Y, ALI R, JOHNSON M, et al. Enhanced flaw detection using an eddy current probe with a linear array of hall sensors[C]//American Institute of Physics Conference Proceedings. [S.l.]: American Institute of Physics, 2005: 516-522.
- [4] 岳明明,张卫民,庞炜涵,等.涡流阵列检测缺陷的理论基础和仿真分析[J].北京理工大学学报,2018,38(2):150-154.
YUE Mingming, ZHANG Weimin, PANG Weihang, et al. Theoretical basis and simulation analysis of eddy current array to cracks deflection [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(2): 150-154. (in Chinese)
- [5] 杨洪斌,仝茂峰,吴晓龙,等.发电机风扇叶片的柔性阵列涡流检测[J].无损检测,2020,42(2):42-47.
YANG Hongbin, TONG Maofeng, WU Xiaolong, et al. Flexible array eddy current testing of generator fan blades[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(2): 42-47. (in Chinese)
- [6] 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,2014,34(11):1101-1105.
ZHANG Weimin, ZENG Weiqin, YANG Xiujiang, et al. Study on aluminum specimen eddy current crack detection with planar coil array sensor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(11): 1101-1105. (in Chinese)
- [7] 丁天怀,陈祥林.电涡流传感器阵列测试技术[J].测试技术学报,2006,20(1):1-5.
DING Tianhuai, CHEN Xianglin. Measurement technology of eddy current sensor array[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 20(1): 1-5. (in Chinese)
- [8] 曹祥玉.微波技术与天线[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008:145-163.
- [9] 雷旭.UHF射频频识别系统中的天线分析与设计[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [10] 付妍,谭超,肖志利,等.基于阻抗特性分析的电磁层析成像传感器优化[J].传感器与微系统,2016,35(3):49-52.
FU Yan, TAN Chao, XIAO Zhili, et al. Magnetic induction tomography sensor optimization based on impedance characteristics analysis[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(3): 49-52. (in Chinese)
- [11] 李焕,董和磊,卫凯龙.微型谐振式天线的阻抗匹配设计与优化[J].中北大学学报(自然科学版),2021,42(4):349-354,360.
LI Huan, DONG Helei, WEI Kailong. Impedance matching design and optimization of miniature resonant antenna[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 349-354, 360. (in Chinese)
- [12] TODOROKI A. Skin effect of alternating electric current on laminated CFRP [J]. Advanced Composite Materials, 2012, 21(5/6): 477-489.
- [13] CHENG J, WANG B, XU D, et al. Resistive loss considerations in the finite element analysis of eddy current attenuation in anisotropic conductive composites[J]. NDT & E International, 2021, 119: 102403.



第一作者简介:程军,男,1986年5月生,博士、副教授。主要研究方向为电磁无损检测与机器视觉。曾发表《各向异性碳纤维复合材料的定向性涡流检测》(《振动、测试与诊断》2019年第39卷第3期)等论文。

E-mail:chengjun@ahpu.edu.cn