

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311342

柔性差测量科赫分形涡流传感器内部裂纹检测*

陈国龙,张帅帅,樊乐,陈依琳,靳伍银
(兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

摘要:柔性涡流传感器由于其可变形性有望被用于复杂形貌结构的无损检测。柔性科赫分形涡流传感器由于其局部微结构对涡流的调理效果,对各方面短裂纹检测性能的一致性较高,但该传感器对于近表面及内部裂纹的检测还未展开研究。构建了差测量传感器的等效电路模型;通过仿真方法研究了涡流分布随深度的演化规律;通过试验方法,研究了传感器对覆盖不同厚度铝板预制裂纹试块的检测效果。有限元结果表明,随着深度的增加,涡流密度减小,集中性降低,分布的形态与其在表面差异越来越大,形态由雪花状向圆形演化。试验结果表明,传感器输出信号随着覆盖层厚度的增加而减弱;当激励频率为10 kHz时,传感器可检测到裂纹时覆盖铝板最大厚度为2.0 mm。

关键词:无损检测;涡流传感器;二端网络;趋肤效应;裂纹检测

中图分类号: TH878 TM154 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Flexible differential pick-up Koch fractal eddy current sensor for internal crack detection

Chen Guolong, Zhang Shuaishuai, Fan Le, Chen Yilin, Jin Wuyin
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Due to deformability, flexible eddy current sensors are used in nondestructive testing for complex structures. The flexible Koch fractal eddy current sensor consistently detects short cracks in all directions due to the eddy current conditioning effect of its local microstructure. However, the detection of near-surface and internal cracks has not been studied. This article formulates the equivalent circuit model of the difference pick-up sensor. The evolution of eddy current distribution with depth is studied by simulation method. Through the experimental method, the detection effect of the sensor on the prefabricated crack specimen covered with different thicknesses of aluminum plate is studied. The finite element results show that, with the increase of depth, the eddy current density decreases, the concentration decreases, and the distribution pattern is more and more different from that on the surface. The eddy current shape changes from snowflake to circular. The experimental results show that the output signal of the sensor decreases with the increase of the thickness of the covering layer. When the excitation frequency is 10 kHz, the sensor can detect the maximum thickness of the covered aluminum plate when the crack is 2.0 mm.

Keywords: nondestructive testing; eddy current sensor; two-terminal network; skin effect; crack detection

0 引言

制造和服役过程中,由于制造误差、极端服役条件、磨损、腐蚀等因素,零件表面、近表面甚至内部均不可避免产生缺陷,因此,对关键零部件的无损检测,是保证其结构完整性和避免发生重大事故的重要途径^[1]。涡流检

测作为无损检测技术之一,以快速、高效、非接触、无需耦合剂等优点被广泛应用于金属零件表面及近表面裂纹检测^[2]。对于表面裂纹的检测,Zeng等^[3]优化了远场涡流探头激励线圈和信号拾取线圈之间的距离以及激励频率,验证了用该技术检测单向碳纤维增强复合材料中纤维断裂的可能性。Chen等^[4]提出的经拓扑变换得到的平面差激励科赫探头,激励线圈和信号拾取线圈加工在

硬质电路板上,对 3 和 5 mm 长的裂纹有检测优势。Yin 等^[5]提出一种平面线圈探头的双模式检测技术,利用电感模式检测导电材料的缺陷,电容模式检测绝缘材料的缺陷,弥补了单一方法的检测局限性,实现了“绝缘-导电”混合结构的缺陷检测。为了提高传感器对不同检测条件以及复杂检测对象的适应程度,提高传感器对复杂形貌零部件的检测灵敏度,可将线圈布置到柔性电路板上。Ye 等^[6]提出的一种面内差分多通道柔性阵列探头,该探头印刷在柔性电路板上,可用于检测汽轮机叶片等复杂结构的微裂纹。Chen 等^[7]基于分形理论,提出一种识别表面裂纹的新型环状分形曲线差激励柔性涡流探头,该探头可以检测到 3 mm 长的短裂纹。

由于各种力的综合作用,如热应力与机械应力的叠加,会在构件内部、近表面产生缺陷,并逐步扩大至表层^[8],因此及时掌握构件内部及近表面的初始缺陷,是其损伤监测的关键。对于内部缺陷的检测,Tian 等^[9]提出一种单线圈激励,三霍尔元件检测的新型探头,利用主成分分析的特征提取方法,可检测到 8 mm 深的缺陷。Park 等^[10]设计一种双线圈激励,双霍尔元件检测的涡流探头,将两个霍尔元件分别放置有、无缺陷试件上方,实现差分检测,利用脉冲涡流检测技术,可检测到 2.5 mm 深的内部缺陷。Ricci 等^[11]研究了提高距离的变化对涡流检测信号振幅和相位的影响,所使用探头由激励线圈和 GMR 传感器组成,通过多频激励,可检测到 1 mm 深的内部裂纹。Ye 等^[12]通过调频信号激励 TMR 阵列传感器,结合脉冲压缩算法,对输出信号分别进行时域和频域分析,可实现 3 mm 厚覆盖层下的裂纹检测,且时域分析得到的信噪比更高。Karpenko 等^[13]提出的 EC-GMR 探头可检测到不同尺寸和方向的底层缺陷。Zhang 等^[14]提出的用于弯曲结构检测的 TMR 阵列柔性探头,可检测到弯曲结构表面以下 3 mm 处的缺陷。

以上检测内部缺陷的涡流探头均用到高灵敏度的磁敏元件,制作成本高。Xie 等^[15]提出一种新型弱耦合脉冲涡流传感器,通过调整直接耦合能量和间接耦合能量的比率,提高传感器对深层缺陷的检测灵敏度,实现了对 8 mm 深缺陷的检测。He 等^[16]基于矩形激励线圈的探头,利用脉冲涡流成像,通过 C 扫描实现了对内部缺陷的识别,并利用频谱分析实现了对缺陷的分类。Abidin 等^[17]通过脉冲涡流检测的方法,利用不同的脉冲宽度,检测出不同的缺陷深度信息。Kang 等^[18]提出一种低频涡流检测铁磁性材料内部缺陷的方法,根据等效阻抗变化的差异,识别缺陷的存在及形状。Ye 等^[19]利用信号在空间和频域中的特性实现了对内部缺陷的检测和量化。殷晓康等^[20]研究了集中绕组式旋转场涡流传感器对管状构件周向与轴向裂纹的检测。

对于内部裂纹的检测,国内外学者多使用脉冲涡流技术或多频激励方式,利用其丰富的频谱信息,克服了传统的单频激励模式对更深层裂纹不敏感的缺点;或采用磁敏元件代替检测线圈,通过阵列化设计,实现快速检测的同时,克服检测线圈在低频检测时信噪比低的缺点。然而,国内外学者进行内部裂纹检测的传感器多为三维刚性或柔性激励单元和刚性拾取单元组合的探头,在复杂曲面检测时存在诸多限制;另外,对于科赫分形涡流传感器,由于其局部微结构将涡流在空间中调理到更多方向,对各方向短裂纹检测性能的一致性较高^[7,21-22],但该传感器对于近表面及内部裂纹的检测还未展开研究。发射与接收元件均为线圈的平面涡流传感器检测内部裂纹困难的原因。由于趋肤效应,涡流传感器检测内部裂纹需要降低激励频率,在相同激励电流强度时,由于电磁感应原理,涡流场的强度将大幅下降,且向试块内部以指数级衰减;另外,信号拾取线圈拾取裂纹扰动引起的磁场变化由于激励频率降低导致灵敏度降低。因此,本文基于柔性差测量科赫分形涡流传感器,利用有限元分析,研究试块表面及表面以下不同深度所在平面的涡流演化规律;通过试验,采用正弦激励方式,实现了对覆盖了一定厚度铝板的预制裂纹试块的检测。

1 传感器工作原理

1.1 传感器设计

本文研究的传感器为柔性差测量科赫分形涡流传感器(简称传感器),基于互感模式设计,包括激励线圈和信号拾取线圈两部分,线圈形状均为基于分形自相似理论设计的三阶科赫线圈,其迭代过程参考文献[20]。激励线圈为单匝科赫曲线,信号拾取线圈为多匝科赫曲线,设计过程为借助 CAD 软件,将三阶科赫曲线向内偏移 0.1 mm,共偏移 12 次,然后对整体曲线进行上下二等分,将相邻两线圈相连以实现信号叠加,并在中间位置将上下两部分线圈反接绕制。激励线圈和信号拾取线圈的外接圆直径均为 10 mm,激励线圈线宽 0.2 mm,信号拾取线圈线宽 0.05 mm。激励线圈和信号拾取线圈均加工在柔性电路板上,柔性电路板固定在外壳底部,传感器通过导线和 SMA 接头相连,如图 1 所示。

1.2 等效电路模型

图 2 为传感器的等效电路模型,其中, V_s 是激励电压, V_0 是信号拾取线圈的输出电压, R_1 和 L_1 分别是激励线圈的等效电阻和电感, R_s 是电源模块的内阻, L_{21} 、 L_{22} 是两信号拾取线圈等效电感, R_2 是信号拾取线圈的等效电阻, R_3 和 L_3 分别是被测试块的等效电阻和电感, I_1 是激励电流, I_2 是信号拾取线圈中的感应电流, I_3 是试块中的

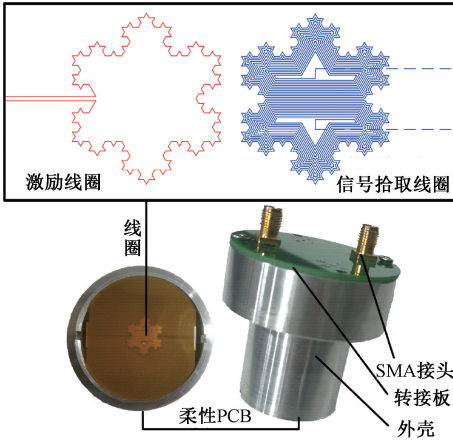


图 1 柔性差测量科赫分形涡流传感器

Fig. 1 Flexible differential measurement Koch fractal eddy current sensor

感应电流, M_{12l} 、 M_{12r} 是激励线圈和信号拾取线圈之间的互感, M_{13} 是激励线圈和试块之间的互感, M_{32l} 、 M_{32r} 是试块和信号拾取线圈之间的互感。由于在激励线圈两端流入和流出的电流均为 I_1 , 且信号拾取线圈两端流入和流出的电流均为 I_2 , 故图 2 电路模型可等效为一种二端网络, 如图 3 所示。对于二端网络, 有 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 、 $\mathbf{H}$ 4 组参数, 针对本文所述等效电路, 选择合适的参数对其进行表征, 将该参数作为传感器的输出信号。

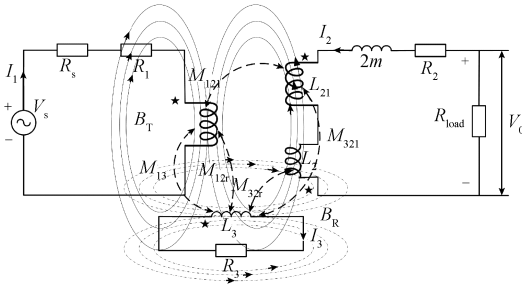


图 2 传感器进行内部裂纹检测的等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of internal crack detection by sensor

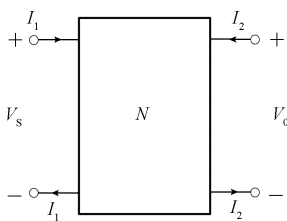


图 3 二端网络模型

Fig. 3 Two-terminal network model

根据图 2 等效电路, 由基尔霍夫电压定律可知:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ V_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & j\omega\Delta M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega\Delta M_{12} & Z_2 & j\omega\Delta M_{32} \\ j\omega M_{13} & j\omega\Delta M_{32} & Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + 2j\omega m + j\omega L_{2l} + j\omega L_{2r}$, $Z_3 = R_3 + j\omega L_3$, $M_{12l} - M_{12r} = \Delta M_{12}$, $M_{32l} - M_{32r} = \Delta M_{32}$ 。仪表放大器的输入阻抗远远大于信号拾取线圈的等效电阻, 为了进行简化, 将其设为无限大, 即 $R_{load} = \infty$, 则 $I_2 = 0$ 。且由于传感器的信号拾取线圈差动布置, 两信号拾取线圈与激励线圈之间的互感相等, 此时 $\Delta M_{12} = 0$ 。故式(1)可简化为:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ V_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & j\omega M_{13} \\ 0 & Z_2 & j\omega\Delta M_{32} \\ j\omega M_{13} & j\omega\Delta M_{32} & Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

参数 $\mathbf{G}$ 为使用 V_s 和 V_0 表示 I_1 和 I_2 , 参数方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_s \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

通过式(2)可得出参数 $\mathbf{G}$ 方程的系数分别为:

$$G_{11} = \frac{I_1}{V_s} \bigg|_{V_0=0} = \frac{R_3 + j\omega L_3}{(R_s + R_1 + j\omega L_1)(R_3 + j\omega L_3) + \omega^2 M_{13}^2} \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{I_1}{V_0} \bigg|_{V_s=0} \quad (5)$$

$$G_{21} = \frac{I_2}{V_s} \bigg|_{V_0=0} = 0 \quad (6)$$

$$G_{22} = \frac{I_2}{V_0} \bigg|_{V_s=0} \quad (7)$$

由于传感器为互感式传感器, 信号拾取线圈检测到的电压信号不为 0, 即 $V_s \neq 0$ 。所以此时 G_{12} 和 G_{22} 不存在。

参数 $\mathbf{R}$ 为使用 I_1 和 I_2 表示 V_s 和 V_0 , 参数方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

通过式(2)可得出参数 $\mathbf{R}$ 方程的系数分别为:

$$R_{11} = \frac{V_s}{I_1} \bigg|_{I_2=0} = \frac{(R_s + R_1 + j\omega L_1)(R_3 + j\omega L_3) + \omega^2 M_{13}^2}{R_3 + j\omega L_3} \quad (9)$$

$$R_{12} = \frac{V_s}{I_2} \bigg|_{I_1=0} \quad (10)$$

$$R_{21} = \frac{V_0}{I_1} \bigg|_{I_2=0} = \frac{\omega^2 M_{13} \Delta M_{32}}{R_3 + j\omega L_3} \tag{11}$$

$$R_{22} = \frac{V_0}{I_2} \bigg|_{I_1=0} \tag{12}$$

由于传感器的正常工作需要在激励线圈中通入一定大小的激励电流,若激励电流为 0,此时试件表面无法产生感应涡流,传感器无法识别出裂纹的存在,故传感器检测裂纹的条件是激励电流不为 0,即 $I_1 \neq 0$,故 R_{12} 与 R_{22} 均不存在。

参数 T 为使用 V_0 和 I_2 表示 V_s 和 I_1 , 参数方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & -T_{12} \\ T_{21} & -T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ I_2 \end{pmatrix} \tag{13}$$

通过式(2)可得出 参数 T 方程的系数分别为:

$$T_{11} = \frac{V_s}{V_0} \bigg|_{I_2=0} = \frac{(R_s + R_1 + j\omega L_1)(R_3 + j\omega L_3) + \omega^2 M_{13}^2}{\omega^2 M_{13} \Delta M_{32}} \tag{14}$$

$$T_{12} = \frac{V_s}{-I_2} \bigg|_{V_0=0} \tag{15}$$

$$T_{21} = \frac{I_1}{V_0} \bigg|_{I_2=0} = \frac{R_3 + j\omega L_3}{M_{13} \Delta M_{32}} \tag{16}$$

$$T_{22} = \frac{I_1}{-I_2} \bigg|_{V_0=0} \tag{17}$$

同理可得 T_{12} 与 T_{22} 不存在。

参数 H 为使用 I_1 和 V_0 表示 I_2 和 V_s ,参数方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ V_0 \end{pmatrix} \tag{18}$$

通过式(2)可得出参数 T 方程的系数分别为:

$$H_{11} = \frac{V_s}{I_1} \bigg|_{V_0=0} \tag{19}$$

$$H_{12} = \frac{V_s}{V_0} \bigg|_{I_1=0} \tag{20}$$

$$H_{21} = \frac{I_2}{I_1} \bigg|_{V_0=0} \tag{21}$$

$$H_{22} = \frac{I_2}{V_0} \bigg|_{I_1=0} \tag{22}$$

同理可得 H_{11} 、 H_{12} 、 H_{21} 、 H_{22} 均不存在。

二端网络相关参数的影响因素如表 1 所示,其中“√”表示有影响,“-”表示无影响。由于 G_{12} 、 G_{21} 、 G_{22} 、 R_{12} 、 R_{22} 、 T_{12} 、 T_{22} 、 H_{11} 、 H_{12} 、 H_{21} 、 H_{22} 不存在或等于 0,故不作说明。在传感器检测裂纹的过程中,输出信号应尽可能仅与试块有关,与其余参数无关,根据此原则确定

可表征传感器输出信号的表达式。由表 1 可知,影响 G_{11} 、 R_{11} 、 T_{11} 的因素不仅包括与试块相关的等效参数,还包括与试块无关的等效参数,如 R_s 、 R_1 、 L_1 , 这些因素的波动会给传感器的输出信号带来不必要的测试误差,如在传感器工作过程中,由于连续工作等原因,激励线圈长时间处于通电状态,这样不可避免的造成传感器温度上升,从而造成激励线圈的电阻值或者电感值的漂移,给输出信号带来误差,故 G_{11} 、 R_{11} 、 T_{11} 不可表征传感器输出信号。对于 R_{21} 和 T_{21} ,当试块中无裂纹时,两激励线圈与试块之间的互感相等,即 $M_{32l} = M_{32r}$, 所以 $\Delta M_{32} = 0$,此时 T_{21} 无意义。综上,参数 R 方程的系数 R_{21} 可表征传感器的输出信号。

表 1 二端网络相关参数的影响因素

Table 1 Influencing factors of two-terminal network related parameters

系数	ω	R_s	R_1	L_1	R_3	L_3	M_{13}	ΔM_{32}	R_2	L_{2l}	L_{2r}	R_{load}
G_{11}	√	√	√	√	√	√	√	-	-	-	-	-
R_{11}	√	√	√	√	√	√	√	-	-	-	-	-
R_{21}	√	-	-	-	√	√	√	√	-	-	-	-
T_{11}	√	√	√	√	√	√	√	√	-	-	-	-
T_{21}	√	-	-	-	√	√	√	√	-	-	-	-

在激励频率确定的情况下,给传感器中通入一定强度的交变电流 I_1 产生一次磁场,通过 M_{13} 将该磁场耦合到试块中,随后试块表面会生成感应电流 I_3 , I_3 的分布会影响 R_3 和 L_3 的大小,此时空间中产生二次磁场,再通过 ΔM_{32} 将磁场耦合到信号拾取线圈中,从而输出感应电压 V_0 。当被测试块中无裂纹时, $\Delta M_{32} = 0$,此时 $R_{21} = 0$;当传感器检测到被测试块中的裂纹时,导致 $M_{32l} \neq M_{32r}$, 故 $\Delta M_{32} \neq 0$,此时 R_{21} 中存在裂纹信息,即在传感器检测到裂纹的过程中, $R_{21} \neq 0$ 。综上,可利用参数 R 方程的系数 R_{21} 作为等效跨阻抗表征传感器的输出信号,通过判断 R_{21} 是否为 0,进而判断裂纹的存在。

2 有限元分析

2.1 有限元模型

在有预制裂纹的试块上覆盖具有一定厚度的铝板(与试块同等材料),模拟具有内部裂纹的试块。信号拾取线圈位于激励线圈下方,所建立的几何模型如图 4 所示。预制裂纹尺寸为 35 mm×0.25 mm×3 mm。利用 COMSOL 软件,将网格控制为极细化网格,在频域下进行有限元分析。空气域和试块的相关参数如表 2 所示。

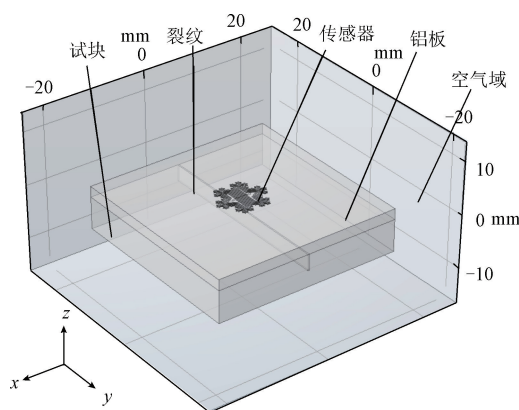


图 4 几何模型
Fig. 4 Geometric model

表 2 有限元模型主要参数

Table 2 Main parameters of finite element model

参数名称	尺寸/mm	相对介电常数	相对磁导率	电导率 /($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
空气域	50×50×30	1	1	10
试块	35×35×6	1	1	3.774×10^7

在有限元分析模型中,激励频率为 10 kHz,信号拾取线圈距试块表面的距离为 0.1 mm,激励线圈中通入的电流为 1 A,研究传感器对覆盖 0.2~2.0 mm(以 0.2 mm 为步长递增)厚度铝板的预制裂纹试块的检测性能。

2.2 试块内部不同水平面的涡流演化规律

涡流是否能够穿透到裂纹所在的位置,是进行内部裂纹检测的必要条件。当激励线圈中通入一定强度的电流后,试块中所感应到的涡流集中分布在试块表面,试块表面以下区域涡流分布分散,距离试块表面越远,涡流分布越分散。试块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^[15]公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}$$

式中: f 为激励频率; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; σ 为电导率。趋肤深度主要受到激励频率、电导率、磁导率的影响。当激励频率为 10 kHz 时, $\delta \approx 0.8$ mm。在试块内部不同平面,涡流的分布状态决定涡流与裂纹的扰动程度,因此研究试块内部不同平面的涡流分布,分析其演化规律,是传感器能否检测到裂纹的先决条件。

试块表面(深度记为 0.0 mm)及表面以下不同深度(0.2~2.4 mm,以 0.2 mm 为步长递增)不同深度所在平面的涡流分布如图 5 所示。由图 5 可知,随着深度的增加,涡流分布形状与试块表面涡流分布形状的差异性增强,涡流分布形状经历着从雪花状向圆形的演变,将该现象称作“激励源信息损失趋肤效应”;涡流分布的集中性降低,分布区域以涡流密度最大回路为中心向两侧发生

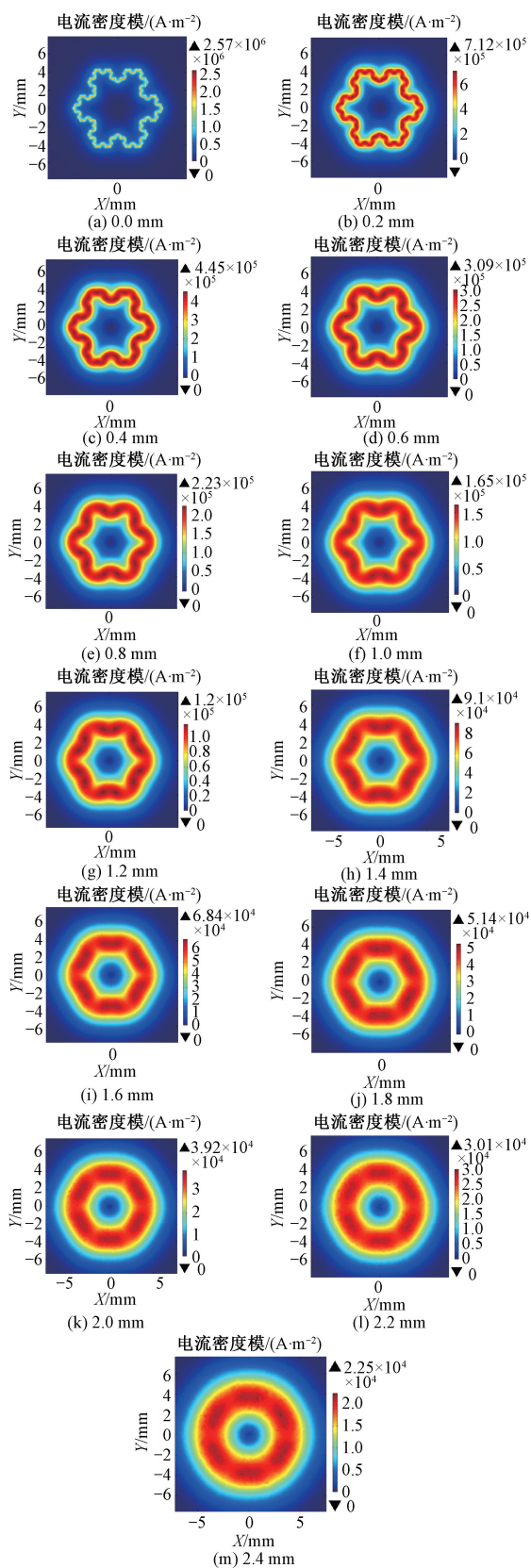


图 5 试块表面及表面以下不同深度所在平面的感应涡流分布
Fig. 5 The induced eddy current distribution on the surface of the specimen and the horizontal plane at different depths below the surface

扩散。图 5(a)为试块表面涡流分布,此时涡流形状表现为雪花状,与激励线圈的相似性最高,且涡流密度最高,分布最集中;图 5(b)为距试块表面以下 0.2 mm 平面的涡流分布,此时涡流形状与激励线圈形状之间的相似性降低,涡流分布的集中性下降,但是基于分形理论所调理的局部分形区域仍存在;随着涡流继续渗透到趋肤深度位置,此时涡流分布与激励线圈形状之间的相似性及涡流分布的集中程度持续降低,相邻的小局部分形区域发生融合,传感器所建立的分形优势降低,如图 5(e)所示;当涡流渗透到 3 倍趋肤深度位置,此时涡流形状已演化为圆形,涡流分布的集中性更弱,涡流密度最大区域仍位于涡流分布的中心,但涡流密度最大区域不连续,分成了 6 个区域,如图 5(m)所示。

涡流密度最大值随平面深度的变化规律如图 6 所示。由图 6 可知,平面所在深度越大,感应涡流密度最大值越小,且最大值趋于 0;试块表面与 0.2 mm 深所在平面之间涡流密度最大值相差最大,随着涡流向下方渗透,相邻两平面之间涡流密度最大值的差异越来越小,涡流密度减小的速率变缓。在试块表面,涡流密度最大值为 2.57×10^6 A/m²,对于试块中不同深度平面的涡流,如 0.2 mm 深平面,涡流密度最大值为 7.12×10^5 A/m²,与试块表面相比,最大值降低了 72.3%,此时涡流密度最大值减小的速率最快。随着深度的增加,涡流密度减小的速率变缓,如 0.8 mm 深所在平面涡流密度最大值为 2.23×10^5 A/m²,相比 0.6 mm 深所在平面最大值降低了 27.8%;2.4 mm 深所在平面涡流密度最大值为 2.25×10^4 A/m²,相比 2.2 mm 深所在平面最大值降低了 25.2%。

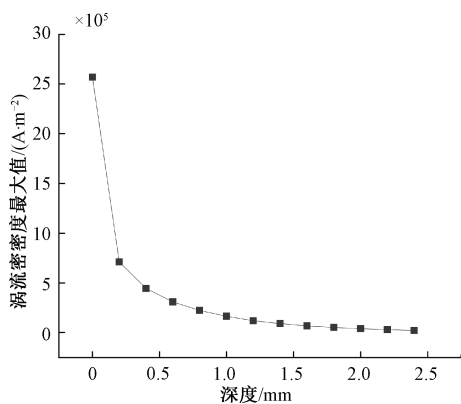


图 6 涡流密度最大值随平面深度的变化规律

Fig. 6 The variation of the maximum eddy current density with the depth of the profile

2.3 传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的有限元结果

在 10 kHz 激励频率时,传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的裂纹信号如图 7 所示。由图 7 可

知,随着所覆盖铝板厚度的增加,裂纹信号的电压变化范围减小,信号强度降低。这是由于感应涡流集中分布在试件表面,距试件表面越远,感应涡流密度越小,故随着覆盖层厚度的增加,裂纹顶部面感应到的涡流减少,从而造成裂纹与涡流之间的扰动减弱,这种扰动程度决定传感器裂纹信号的强弱,扰动越强,裂纹信号越强,反之越弱。

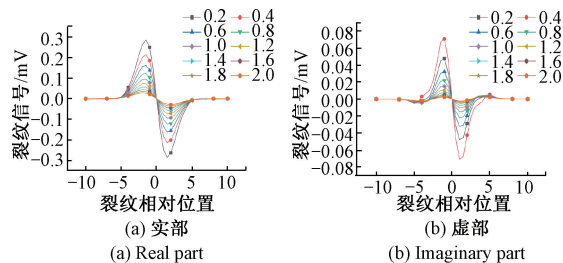


图 7 传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的输出信号

Fig. 7 The sensor detects the output signal of the prefabricated crack specimen covering different thickness aluminum plates

传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的裂纹信号峰峰值变化规律如图 8 所示。由图 8 可知,随着所覆盖铝板厚度的增加,裂纹信号的实部和虚部峰峰值均减小,且实部峰峰值始终大于虚部。这与裂纹信号的强度有关,当所覆盖的铝板厚度较低时,此时裂纹上表面所在平面感应涡流密度大,传感器检测到的裂纹信号强度高,同时所对应的峰峰值更大。随着铝板厚度的增加,裂纹上表面所在平面感应涡流密度减小,裂纹信号强度随之减小,裂纹信号的峰峰值减小。当铝板厚度为 0.2 mm 时,裂纹信号的实部和虚部峰峰值分别为 0.14 和 0.07 mV,随着铝板厚度增加到 0.8 mm,即在趋肤深度处,实部和虚部峰峰值分别为 0.25 和 0.04 mV,此时峰峰值分别减小了 56.89%、68.92%;当铝板厚度增加到 2.0 mm,实部和虚部峰峰值分别为 0.056 和 0.005 mV,此时峰峰值分别减小了 89.86%、96.79%。

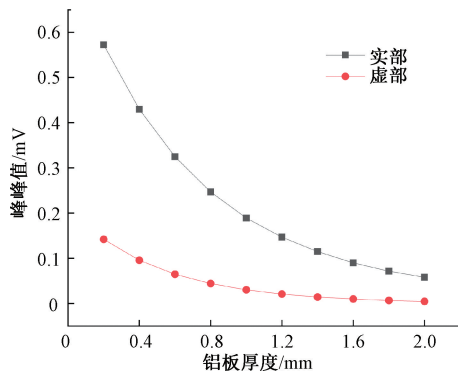


图 8 裂纹信号峰峰值随铝板厚度的变化规律

Fig. 8 The variation law of crack signal peak-to-peak value with the thickness of covering layer

3 试验验证

3.1 试验系统

搭建试验系统研究传感器可以检测到内部裂纹时的最大覆盖层厚度。试验系统原理如图 9 所示,其中激励线圈中通入的正弦激励信号由函数发生器 RIGOL-DG832 产生,信号拾取线圈检测到的信号由锁相放大器 OE2031 作信号处理,锁相放大器中得到的是信号拾取线圈检测到的电压信号,通过该电压值除以激励电流值,再除以前置放大器 AIGTEK-ATA-5210 的放大倍数(200 倍),得到传感器的跨阻抗值,最后利用 MATLAB 对输出信号进行去趋势处理;功率放大器 RIGOL-PA1011 的作用是对激励信号强度进行放大;利用万用表 RIGOL-DM3058 随时监控激励电流。传感器固定在三维扫描台上,其移动通过步进电机控制,控制信号通过串口通信,利用上位机软件发出。基于试验原理图搭建试验系统,对覆盖不同厚度铝板的裂纹试块进行裂纹检测试验,如图 10 所示。

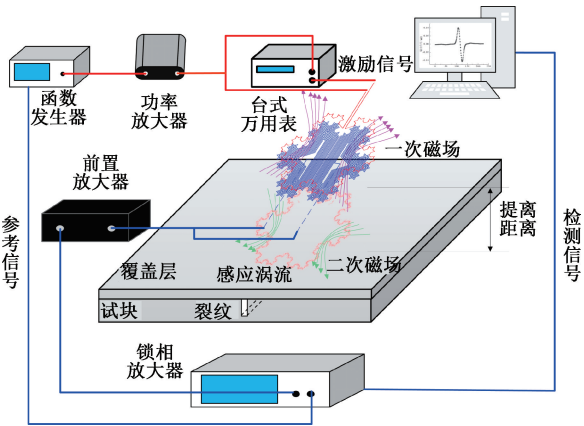


图 9 试验系统原理

Fig. 9 Experimental system schematic diagram

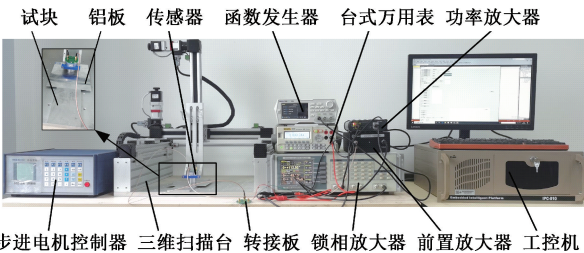


图 10 试验系统实物

Fig. 10 Physical diagram of test system

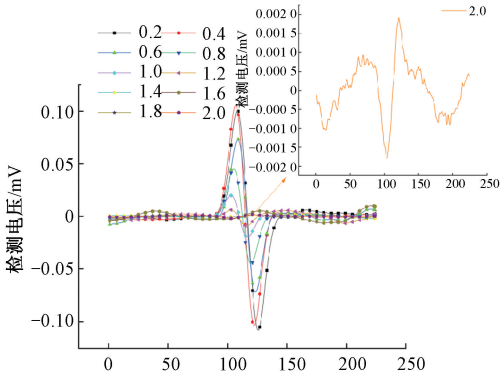
传感器检测覆盖铝板的预制裂纹试块,采用线扫描试验,传感器在试块上方做一次往返运动。在前进过程

中,步长为 0.024 mm,传感器共前进 53.76 mm,传感器在该过程中进行裂纹检测,并将检测数据反馈至锁相放大器;传感器的后退过程不进行检测,当 X 轴步进电机收到后退指令后,控制传感器后退至起点位置。

试验过程中激励频率为 10 kHz,提离距离为 0.1 mm,所采用的试块为加工有预制裂纹的铝制长方体试块,试块尺寸为 350 mm×80 mm×6 mm,预制裂纹贯穿试块的宽度方向,裂纹宽 0.25 mm、深 3 mm。在裂纹上表面覆盖具有一定厚度的铝板,且俯视方向上铝板完全遮盖住预制裂纹,铝板的厚度为 0.2~2.0 mm(以 0.2 mm 为步长递增)。

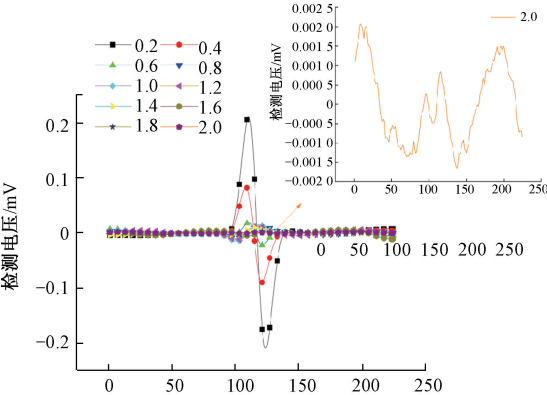
3.2 试验结果

传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的裂纹信号如图 11 所示,局部图为检测覆盖 2.0 mm 厚度铝板时,传感器检测到的裂纹信号。由图 11 可知,当铝板厚度为 2.0 mm 时,此时裂纹信号的实部有表征裂纹的峰谷特征,可以确定试块中存在裂纹,但是输出信号的虚部此时以无法确定裂纹的存在。随着铝板厚度增加到 2.0 mm



(a) 实部

(a) Real part



(b) 虚部

(b) Imaginary part

图 11 传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的裂纹信号

Fig. 11 The sensor detects the crack signal of the prefabricated crack test block covering different thickness aluminum plates

以上,裂纹信号的实部和虚部均被噪声淹没,无法从中获取表征裂纹的信息,无法确定裂纹的存在,故传感器最大可识别出覆盖 2.0 mm 厚铝板的预制裂纹试块。

图 11 中无法直接观察出裂纹信号与铝板厚度之间的变化规律,故分别求出各裂纹信号对应的信号峰峰值,如图 12 所示。由图 12 可知,随着裂纹深度的增加,裂纹信号的实部和虚部峰峰值均下降。这是由于趋肤效应的影响,距离试块上表面越远,涡流密度越小,裂纹与涡流的扰动程度越弱,此时裂纹信号的强度降低,峰峰值减小。当铝板厚度为 0.2 mm 时,裂纹信号的实部和虚部峰峰值分别为 0.21 和 0.42 mΩ,随着铝板厚度增加到 0.8 mm,即在趋肤深度处,实部和虚部峰峰值分别为 0.09 和 0.02 mΩ,相比覆盖 0.2 mm 厚铝板时检测到的裂纹信号峰峰值分别减小了 56.8%、95.21%;当铝板厚度增加到 2.0 mm,实部和虚部峰峰值分别为 0.003 73 和 0.003 72 mΩ,相比覆盖 0.2 mm 厚铝板时检测到的裂纹信号峰峰值分别减小了 98.21%、99.11%。

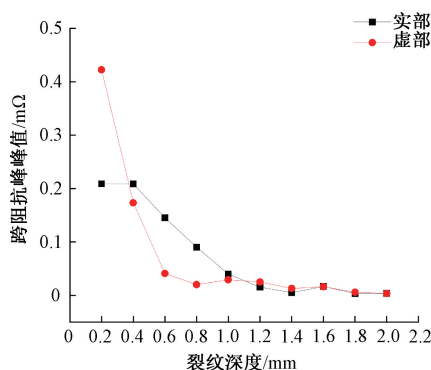


图 12 传感器检测到裂纹信号峰峰值随铝板厚度的变化规律

Fig. 12 The peak-to-peak value of the crack signal detected by the sensor varies with the thickness of the aluminum plate

对于柔性差测量科赫分形涡流传感器,当激励频率为 10 kHz 时,传感器可检测到裂纹时覆盖铝板厚度最大为 2.0 mm,此时还未达到 3 倍渗透深度 2.4 mm。这是由于试块表面以下 2.0~2.4 mm 所在平面的涡流密度小,涡流集中程度低,传感器的检测性能有限,此时传感器无法拾取到裂纹与涡流之间微弱的扰动,当平面深度继续增加到 2.4 mm 以上时,平面的涡流分布更为分散且密度小,裂纹与涡流之间的扰动更加微弱,甚至裂纹的存在不足以对涡流造成扰动,此时传感器无法检测到裂纹存在。

4 结 论

本文以柔性差测量科赫分形涡流传感器为研究对象,建立了传感器等效电路模型,并推导了二端网络所对

应的参数 G, R, T, H , 确定了可表征传感器输出信号的表达式,通过有限元分析,研究了试块表面及表面以下不同深度所在平面的涡流演化规律,通过试验研究了传感器对覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的检测性能,确定了传感器可检测到裂纹时所覆盖的最大铝板厚度,得出如下结论。

1) 传感器进行内部裂纹检测的等效电路模型可等效为二端网络,可用参数 R 中的系数 R_{21} 表征传感器的输出信号。

2) 有限元结果表明,不同深度所在平面涡流分布表现出“激励源信息趋肤效应”,即随着平面所在深度的增加,涡流分布的形态与试块表面感应涡流形态之间的差异性越来越大,涡流分布形态由雪花状向圆形演化。

3) 在传感器检测覆盖不同厚度铝板的预制裂纹试块的过程中,随着铝板厚度的增加,裂纹与涡流扰动的程度降低,传感器检测到的输出信号强度减弱,峰峰值减小。

4) 试验结果表明,当激励频率为 10 kHz 时,柔性差测量科赫分形涡流传感器可检测到裂纹时所覆盖的最大铝板厚度为 2.0 mm。

参考文献

- [1] LI C, BIN G F, LI J, et al. Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model [J]. Tribology International, 2021, 163: 107197.
- [2] ABDALLA A N, FARAJ M A, SAMSURI F, et al. Challenges in improving the performance of eddy current testing[J]. Measurement and Control, 2019, 52(1-2): 46-64.
- [3] ZENG Z W, LIAO Y F, LIU X H, et al. Detection of fiber fracture in unidirectional CFRP by remote field eddy-current testing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (8): 5755-5762.
- [4] CHEN G L, SONG Z B, JIN W Y. A novel planar differential excitation eddy current probe based on the fractal Koch curve [J]. Measurement, 2022, 193: 110947.
- [5] 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.
- [6] YE C F, ZHANG N, LEI P, et al. Flexible array probe with in-plane differential multichannels for inspection of microdefects on curved surface[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(1): 900-910.
- [7] CHEN G L, LI Z F, CAO Z, et al. A differential excitation eddy current probe based on novel annular

- fractal curve for defects inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(16): 15903-15915.
- [8] KONG Y W, CHEN D F, LIU Q, et al. A prediction model for internal cracks during slab continuous casting[J]. Metals, 2019, 9(5): 587.
- [9] TIAN G Y, SOPHIAN A, TAYLOR D, et al. Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(1): 90-96.
- [10] PARK D G, ANGANI C S, RAO B P C, et al. Detection of the subsurface cracks in a stainless steel plate using pulsed eddy current [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(4): 350-353.
- [11] RICCI M, SILIPIGNI G, FERRIGNO L, et al. Evaluation of the lift-off robustness of eddy current imaging techniques[J]. NDT & E International, 2017, 85: 43-52.
- [12] YE C F, LAURETI S, MALEKMOHAMMADI H, et al. Swept-frequency eddy current excitation for TMR array sensor and pulse-compression: Feasibility study and quantitative comparison of time and frequency domains processing[J]. Measurement, 2021, 187: 110249.
- [13] KARPENKO O, EFREMOV A, YE C F, et al. Multi-frequency fusion algorithm for detection of defects under fasteners with EC-GMR probe data [J]. NDT & E International, 2020, 110: 102227.
- [14] ZHANG N, LEI P, HE Y Z, et al. Flexible probe with array tunneling magnetoresistance sensors for curved structure inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [15] XIE L, GAO B, TIAN G Y, et al. Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 293: 189-199.
- [16] HE Y Z, PAN M C, LUO F L, et al. Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation[J]. NDT & E International, 2011, 44(4): 344-352.
- [17] ABIDIN I Z, MANDACHE C, TIAN G Y, et al. Pulsed eddy current testing with variable duty cycle on rivet joints[J]. NDT & E International, 2009, 42(7): 599-605.
- [18] KANG H L, BAEK M K, PARK I H. Estimation of deep defect in ferromagnetic material by low frequency eddy current method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3965-3968.
- [19] YE C F, WANG Y, WANG M L, et al. Frequency domain analysis of magnetic field images obtained using TMR array sensors for subsurface defect detection and quantification[J]. NDT & E International, 2020, 116: 102284.
- [20] 殷晓康, 杨丽强, 王伟, 等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 239-250.
- YIN X K, YANG L Q, WANG W, et al. Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 239-250.
- [21] CHEN G L, ZHANG W M, PANG W H. Koch curve fractal geometry excitation probe for eddy current non-destructive testing [J]. Measurement, 2018, 124: 470-478.
- [22] 陈国龙, 张帅帅, 曹政, 等. 绝对式科赫分形平面涡流传感器裂纹检测性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 98-107.
- CHEN G L, ZHANG SH SH, CAO ZH, et al. Research on crack detection performance of absolute Koch planar eddy current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 98-107.

作者简介



陈国龙 (通信作者), 2010 年于北京理工大学获得学士学位, 2018 年于北京理工大学获得博士学位, 现为兰州理工大学副教授, 系主任, 主要研究方向为电磁无损检测。
E-mail: cgl20061273@126.com

Chen Guolong (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2010, Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2018. Now he is an associate professor at Lanzhou University of Technology. His main research interest includes electromagnetic non-destructive testing.