

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209296

绝对式科赫分形平面涡流传感器裂纹检测性能研究^{*}

陈国龙,张帅帅,曹 政,李朝飞,靳伍银

(兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

摘 要:针对传统涡流传感器会忽略特殊方向短裂纹的缺点,提出了一种绝对式科赫分形平面涡流传感器,其激励线圈和信号拾取线圈均采用基于分形自相似理论的科赫雪花曲线。首先,对具有相同尺寸的科赫和圆形传感器进行有限元分析。然后,针对不同长度、方向、宽度和深度的裂纹,对比分析两种传感器响应信号的差异。最后,搭建实验系统对有限元分析结果进行验证。研究表明,对于不同长度、方向和宽度裂纹的探测,有限元分析结果与实验结果定性一致;在 3 和 5 mm 长的裂纹检测中,科赫传感器输出信号变化量比圆形传感器至少高出 40%;在不同方向裂纹检测中,对于难检测方向的 90° 裂纹,科赫传感器比圆形传感器至少高出 49%;在不同宽度裂纹检测中,科赫传感器的信号变化量比圆形传感器至少高出 29%;在不同深度裂纹检测中,科赫传感器比圆形传感器至少高出 6%;相对圆形传感器,科赫传感器对短裂纹探测的优势更加显著。该研究结果对平面柔性涡流传感器电磁感应结构的设计具有重要的参考意义。

关键词:分形几何;涡流检测;无损检测;平面涡流传感器;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

Research on crack detection performance of absolute Koch planar eddy current sensor

Chen Guolong, Zhang Shuaishuai, Cao Zheng, Li Zhaoifei, Jin Wuyin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The traditional eddy current probes may neglect short cracks in special orientation. To address this issue, an absolute Koch planar eddy current probe is proposed. Both the excitation coil and the pickup coil of the probe adopt the Koch snowflake curve based on fractal self-similarity theory. Firstly, the finite element analysis for the Koch probe and the circular probe with the same dimension is conducted. Then, for cracks with different lengths, directions, widths and depths, the difference of response signals of two probes is compared. Finally, an experimental system is established to evaluate the finite element analysis results. Results show that for the inspection of cracks with different lengths, directions and widths, the finite element analysis results are qualitatively consistent with the experimental results. For the inspection of the crack with 3 and 5 mm in lengths, the variations of signals output from the Koch probe are at least 40% higher than those of the circular probe. In the detection of crack in different orientations, the variation of signal output from the Koch probe is at least 49% higher than that of the circular probe for the inspection of the 90° crack which is difficult to be detected. In the detection of crack in different widths, the variation of signal output from the Koch probe is at least 29% higher than that of the circular probe. In the detection of crack in different depths, the variation of signal output from the Koch probe is at least 6% higher than that of the circular probe. The Koch probe has more significant edge for the inspection of short cracks relative to the circular probe. The research result has important reference significance for the design of the electromagnetic structure of planar eddy current probe.

Keywords: fractal geometry; eddy current testing; nondestructive testing; planar eddy current probe; defect detecting

0 引言

基于电磁感应原理的涡流检测技术,以非接触、灵敏度高、检测速度快、适用范围广等优点,被广泛应用于特种设备、高铁、航空航天等重要领域。随着检测对象的多样化,以及检测条件的复杂化,传统模式的涡流检测已经不能满足需求,在不同方向取得新进展;检测结果从定性评价向定量评估发展^[1];激励波形从简单的单频向多频^[2]、脉冲^[3]、脉冲调频^[4-5]等复杂波形发展;检测功能集成化^[6];传感器结构以及检测系统向复杂化、定制化方向发展等^[7]。

涡流传感器作为获取被测对象物理信息的开端,其性能直接影响检测结果的可靠性。目前,随着工业零部件结构的复杂化,传统的刚性涡流传感器由于结构形状存在限制,无法对该类构件的关键区域进行检测。针对该问题,基于印刷电路板设计的平面线圈涡流传感器提供了解决方案^[8-9]。

近年来,国内外学者针对不同检测目标,利用印刷电路板技术设计各种平面或柔性涡流传感器。为实现对异质材料缺陷的同时检测,文献[10-12]提出一种电容-涡流双模式一体化无损检测方法,实现“绝缘-导电”混合结构中的缺陷同时检测。利用柔性电路板良好的弯曲性,可以适应如航空发动机叶片等复杂构件的涡流检测。文献[13-14]提出一种基于隧道磁阻效应(tunneling magneto resistive, TMR)的柔性涡流传感器,在减少感应通道的同时,实现了试件表面以及亚表面裂纹的定量检测;Zhang 等^[15]提出一种柔性阵列涡流传感器,该传感器可弯曲成半圆形固定在半圆形轨道底部,以实现钢球表面完整性的评价,该传感器对钢球表面裂纹检测正确率达 95.52%,误检率小于 0.7%;She 等^[16]提出一种柔性差动蝶形阵列涡流传感器,该传感器可与螺纹表面贴合,可检测从螺纹顶部到底部以及侧面的缺陷,并可通过不同的信号拾取线圈实现缺陷的定位;Ding 等^[17]提出的花萼状涡流传感器可实时检测金属螺栓孔处 1 mm 精度疲劳裂纹损伤;Ye 等^[18]提出一种双排平面内差动的柔性探头,该探头中有四个通道,这 4 个通道互补,可检测涡轮叶片上不同方向的裂纹。

目前已有的柔性传感器的线圈结构及其元素多为直线形、矩形或圆形,在各向同性材料中感应出的涡流在局部区域内分布较单一。当涡流流动方向与被测裂纹平行时,裂纹对涡流的扰动较小,容易造成漏检。为了提高平面线圈涡流传感器对该方向上裂纹检测的敏感性, Rosado 等^[19]提出了一种平面旋转场涡流传感器,在两个相互垂直的激励导线中分别通入幅值相同、相位相差 90° 的正弦交流电,以产生一个方向随时间周期性旋转的涡流场,该传感器对不同方向裂纹的检测一致性较好。Chen 等^[20]提出一种新型线圈结构涡流传感器,激励线圈

采用科赫雪花曲线,信号拾取线圈采用阿基米德螺旋线,该线圈结构提升了局部区域涡流方向的多样性,以增加涡流被不同方向微裂纹扰动的几率和强度。然而,由于该传感器的拾取线圈为螺旋线形,与激励线圈形状不同,无法高效地拾取涡流扰动引起的磁场变化。随后,Chen 等^[21-22]进一步设计了差激励式平面科赫涡流传感器,并对其裂纹探测性能进行了研究。但是,差分式传感器对变化缓慢的缺陷识别率较低^[23]。

基于此,本文提出激励线圈与信号拾取线圈形状大小均相同的绝对式科赫平面涡流传感器,对不同长度、方向、宽度和深度的裂纹进行检测。同时,设计与其外接圆相同的绝对式圆形平面涡流传感器,作为参考进行对比分析。

1 科赫分形涡流传感器及其等效电路模型

1.1 传感器结构

绝对式科赫分形涡流传感器(以下简称:科赫传感器)设计为互感式结构,包括激励和信号拾取线圈。激励线圈和信号拾取线圈均为双端子单匝科赫线圈。其中,科赫曲线的外接圆直径为 10 mm,迭代次数为 2,即科赫曲线的阶次为 2。传感器制备在硬质电路板上,激励线圈位于顶层,信号拾取线圈位于底层,两线圈的科赫曲线部分在电路板法向重合,如图 1(a)和(b)所示。信号拾取线圈的输出端通过过孔引到顶层焊盘上以焊接信号输出线。激励线圈的线宽为 0.254 mm(10 mil),信号拾取线圈的线宽为 0.152 mm(6 mil)。为了对比科赫传感器对涡流场的调理效果,设计了与科赫曲线外接圆尺寸相同的圆形传感器作为参照,如图 1(c)和(d)所示。两传感器线圈的电感和电阻值如表 1 所示。

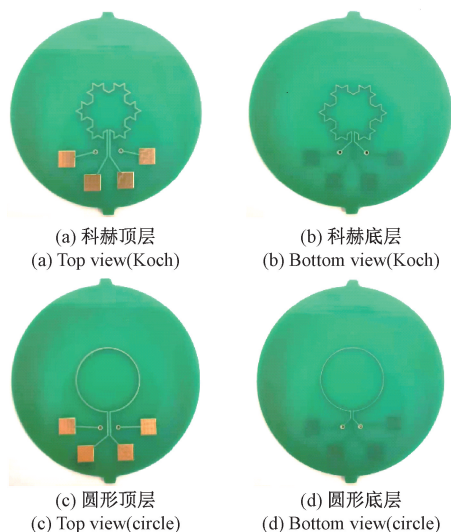


图 1 传感器原型照片

Fig. 1 Images of sensor prototype

表1 传感器线圈的电感和电阻

Table 1 Inductance and resistance of sensor coils

参数	激励线圈		信号拾取线圈	
	科赫	圆形	科赫	圆形
电感/nH	238.9	205.4	260.8	217.1
电阻/mΩ	171.7	135.1	305.9	260.8

1.2 传感器等效电路

科赫传感器是一种互感式平面涡流传感器,可以等效为二端口网络。在无试件情况下,绝对式传感器的等效电路如图2所示。根据基尔霍夫定律可得^[24]:

$$\begin{cases} U_1 = Z_1 I_1 - I_2 j\omega M_{12} \\ I_1 j\omega M_{12} = Z_2 I_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_1 为激励电压, Z_1 为激励线圈中的阻抗, 且 $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$, I_1 为激励电流, M_{12} 为激励线圈与信号拾取线圈之间的互感, Z_2 为信号拾取线圈中的阻抗, 且 $Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + R_{\text{load}}$, I_2 为信号拾取线圈中的电流。

同时,有:

$$U_2 = I_2 R_{\text{load}} \quad (2)$$

根据式(1)和(2)可得出无试块时的等效跨阻抗公式:

$$Z_{12} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{j\omega M_{12} R_{\text{load}}}{Z_2} \quad (3)$$

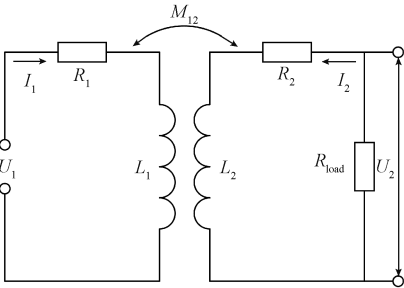


图2 无试块等效电路图

Fig. 2 Diagram of equivalent circuit without specimen

当传感器靠近试块时,等效电路如图3所示。由基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{cases} U_1 = Z_1 I_1 - I_2 j\omega M_{12} - I_3 j\omega M_{13} \\ I_1 j\omega M_{12} + I_3 j\omega M_{23} = Z_2 I_2 \\ I_1 j\omega M_{13} + I_2 j\omega M_{23} = Z_3 I_3 \end{cases} \quad (4)$$

其中, I_3 为传感器在试块中感应出的涡流的等效电流, $Z_3 = R_3 + j\omega L_3$ 为试块的等效阻抗。根据式(2)和(4)可得有试块时传感器的等效跨阻抗:

$$Z'_{12} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{(j\omega M_{12} Z_3 - \omega^2 M_{13} M_{23}) R_{\text{load}}}{\omega^2 M_{23}^2 + Z_2 Z_3} \quad (5)$$

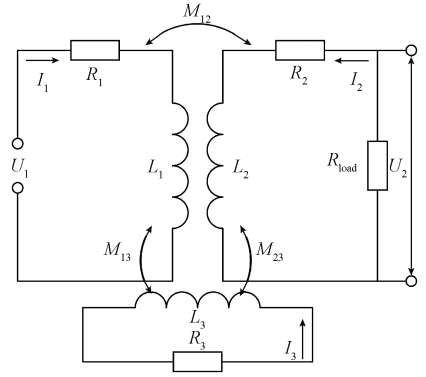


图3 有试块等效电路图

Fig. 3 Diagram of equivalent circuit with specimen

根据式(3)和(5),可得出等效跨阻抗的变化量为:

$$\Delta Z = Z'_{12} - Z_{12} = - \frac{\omega^2 M_{13} M_{23} R_{\text{load}} + j\omega^3 M_{12} M_{23}^2 R_{\text{load}}}{\omega^2 M_{23}^2 Z_2 + Z_2^2 Z_3} \quad (6)$$

2 有限元分析

本文利用 COMSOL 多物理场仿真软件的 AC/DC 模块进行有限元分析。为了对比研究两种传感器对试件表面不同几何参数裂纹的检测性能,将所有模型在频域下进行计算分析。

首先建立传感器有限元分析的几何模型,采用理想线构造线圈形状,在圆形传感器裂纹检测有限元分析模型中,激励线圈与信号拾取线圈形状均为半径为 5 mm 的圆;科赫曲线的阶次为 2,其外接圆半径为 5 mm;激励线圈和信号拾取线圈同轴心,相距 0.4 mm;信号拾取线圈在被测试件上方的提离距离为 0.1 mm;试件与空气为同轴长方体,被测试件为铝制试件,其几何尺寸为 70 mm×70 mm×6 mm,空气域的几何尺寸为 80 mm×80 mm×30 mm。然后设置控制方程和边界条件,给激励线圈施加大小为 1 A。利用扫掠网格,将裂纹位置以及线圈正下方位置的网格进行细化,以便于得到更准确的解。最后在 100 kHz 的频率下进行有限元仿真分析。通过有限元分析计算无裂纹模型,以对比分析两种传感器建立的法向磁场以及感应出涡流分布的情形;通过参数扫掠方法,假定传感器与试件不动,裂纹移动以模拟传感器扫描过程,研究两种传感器的裂纹探测信号的差异。

2.1 两种传感器的磁场与涡流分布

图4和5所示为科赫激励线圈与圆形激励线圈在试件表面感应出的法向磁场分布,在同一激励频率下,科赫线圈在试件表面感应出的磁场强度在局部区域更集中,这是由于科赫曲线在局部区域曲率的变化造成磁场的叠

加,这对提高裂纹检测的灵敏度是有益的。图 6 和 7 所示为科赫激励线圈与圆形激励线圈在试件表面感应出的涡流分布,其分布与线圈形状相似。圆形线圈感应出的涡流流向均匀变化,呈圆形分布,而科赫线圈的感应涡流流向在局部区域急剧变化。这是由于科赫曲线相较于圆形,其特点是由很多条等长线段构成,这些线段从不同方向首尾相连,相互叠加,从而使各自感应出的涡流场叠加,增加了多个局部小曲率,改变了涡流的分布状态,这在裂纹检测过程中有重要意义,有利于提高涡流传感器的检测灵敏度;同时相较于圆形的单一不变曲率,科赫曲线上急剧变化的局部小曲率增多,局部区域涡流流向发生变化,从而导致涡流与小裂纹在局部区域相互作用的几率增强,各个方向的短裂纹的存在仍然可以产生扰动,从而提高其裂纹探测概率。

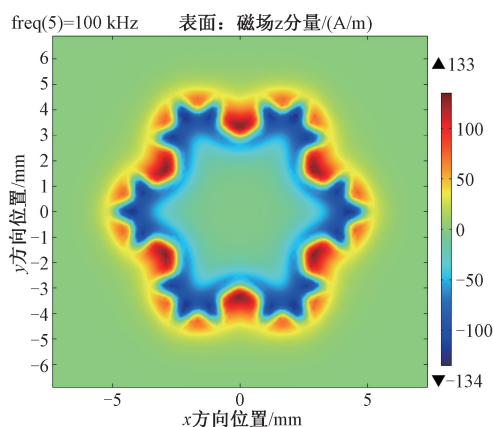


图 4 科赫激励线圈法向磁场强度分布

Fig. 4 Normal magnetic field intensity distribution of the Koch excitation coil

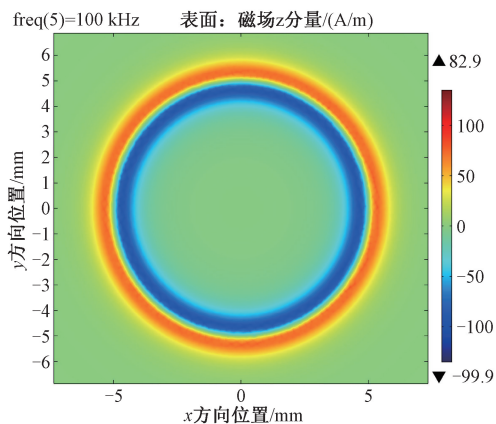


图 5 圆形激励线圈法向磁场强度分布

Fig. 5 Normal magnetic field intensity distribution of the circular excitation coil

对于圆形传感器,在试件表面建立的法向磁场在正、反两个方向的最大值分别为 82.9 和 99.9 A/m;而科赫

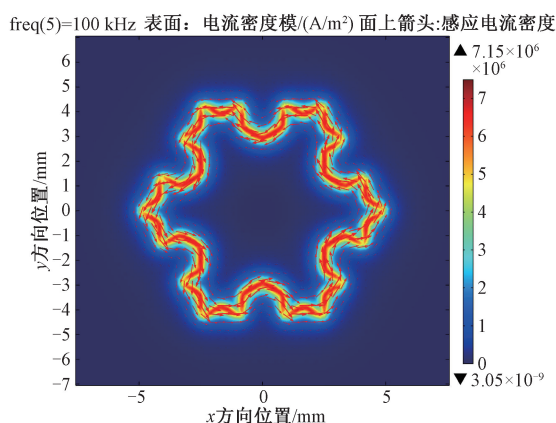


图 6 科赫激励线圈涡流分布

Fig. 6 Eddy current distribution of the Koch excitation coil

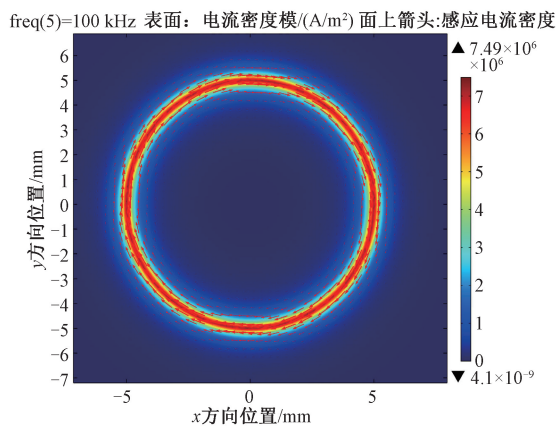


图 7 圆形激励线圈涡流分布

Fig. 7 Eddy current distribution of the circular excitation coil

传感器的为 133 和 134 A/m。故在相同激励电流的情况下,科赫曲线由于存在微小结构使其在试件表面建立的法向磁场的强度在正、反两个方向上分别是圆形传感器的 1.6 和 1.34 倍。

2.2 裂纹长度对输出信号的影响

分别提取两种传感器信号拾取线圈检测到的电压信号,包括实部信号与虚部信号。由于虚部信号紊乱,无法识别出裂纹信息,而实部信号中的现象比较明显,故后续对比分析中均采用输出信号的实部分量。

对含长度分别为 3、5、10、15、20 mm,宽度为 0.25 mm,深度为 1.6 mm,方向为 90°(裂纹方向为扫描轴线与裂纹所在直线之间的夹角)裂纹的试件,在提离距离为 0.1 mm 下进行有限元分析。图 8 为两种传感器对不同长度裂纹输出信号的波形图。

对于两种传感器,当裂纹长度为 3 和 5 mm 时,输出信号波形具有“双峰”特性,而当裂纹长度为 10、15、20 mm 时,输出信号具有“单峰”特性。发生该现象的原

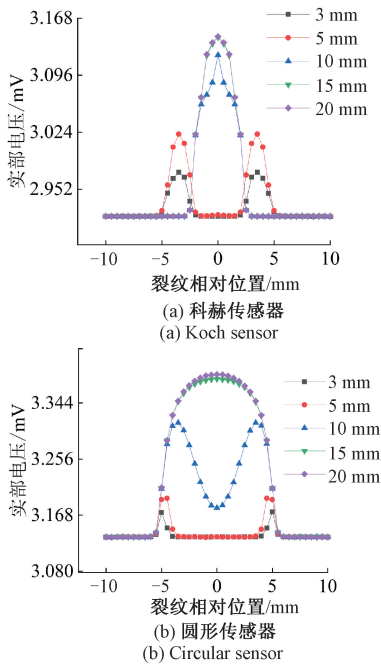


图 8 两种传感器对不同长度裂纹检测的实部电压信号对比
Fig. 8 Comparison of real voltage signals of two sensors for crack detection in different lengths

因是由于两种传感器在试件中感应出涡流分布具有环状特性,裂纹长度长于线圈尺寸时,裂纹经过传感下方的整个过程中对涡流分布进行不间断扰动,且扰动最强位置在裂纹位于传感器中心处;当裂纹尺寸短于传感器线圈尺寸时,裂纹在传感器下方移动的过程中,靠近和离开激励线圈时,对涡流分布产生两次较强的扰动,故信号波形呈“双峰”特性。

科赫和圆形传感器在无裂纹位置处的背景信号分别为 2.92 和 3.13 mV,这是由于在等电流激励下,圆形传感器的面积大于科赫曲线包围的面,因此对空间净磁场的感应电压更大。

当裂纹长度 ≤ 15 mm 时,两种传感器输出信号的峰值均随裂纹长度的增加而增加。但是,对于长度为 15 和 20 mm 的裂纹,两种传感器的输出信号几乎重合,这是由于裂纹长度远大于传感器尺寸时,每种传感器在扫描时“看到”的裂纹是一样的,两种裂纹导致的涡流分布是一样的,则输出信号几乎相同。

对于 3、5、10、15、20 mm 长的裂纹,科赫传感器输出信号的变化量的最大值分别为 0.06、0.10、0.20、0.23、0.23 mV,输出信号相对无裂纹时背景信号的变化率分别为 1.9%、3.6%、7.0%、7.8%、7.8%;圆形传感器输出信号的变化量分别为 0.04、0.06、0.18、0.25、0.26 mV,相对变化率分别为 1.4%、2.0%、5.6%、8.0%、8.2%。裂纹长度由小到大,科赫传感器输出信号变化量最大值依次

是圆形传感器的 1.30、1.67、1.16、0.90、0.89 倍,信号相对变化率的倍数依次为 1.40、1.80、1.24、0.97、0.95 倍。由此可见,当裂纹长度小于传感器线圈尺寸时,科赫传感器的输出信号明显优于圆形传感器的,而当裂纹尺寸长于传感器尺寸时,圆形传感器的输出信号反而占优。其原因是:当裂纹长度较短时,涡流分布方向占主导作用,由于分形曲线的微小结构引起被测构件中局部区域涡流方向信息更加丰富,可有效避免圆形传感器的涡流与裂纹平行导致涡流难以被裂纹扰动的缺点,如图 9 所示;当裂纹尺寸大于传感器尺寸时,在扫描过程中,裂纹总能遇到与自身相互垂直的涡流从而产生较强的扰动,如图 10 所示。综上所述,科赫传感器在探测尺寸短于自身尺寸的 90°方向时,性能强于圆形传感器。

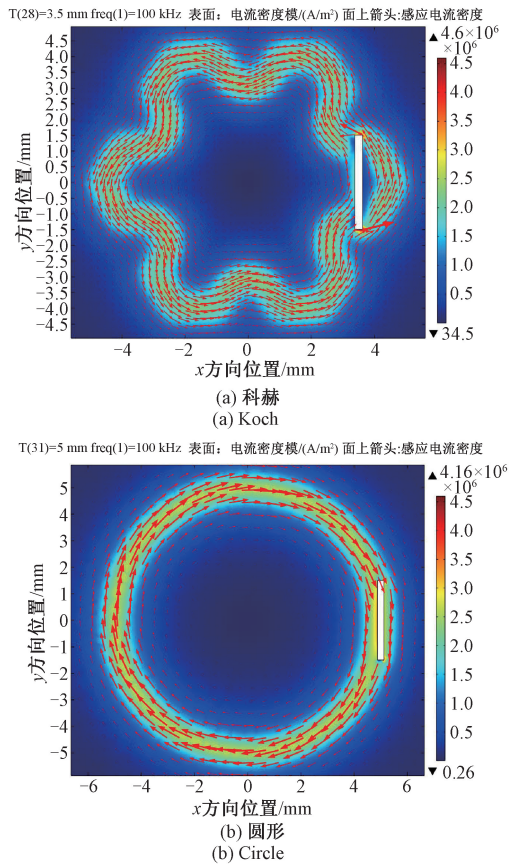


图 9 两种传感器检测 3mm 长裂纹时在试件表面感应出的涡流分布图
Fig. 9 Distribution of eddy current induced on specimen surface when two kinds of sensors detect 3mm long crack

2.3 裂纹方向对输出信号的影响

对长宽高分别为 5、0.25 和 1.6 mm 的裂纹在不同方向时的信号进行有限元仿真分析,方向分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。分别提取两种传感器感应电压的实部信号,如图 11 所示。

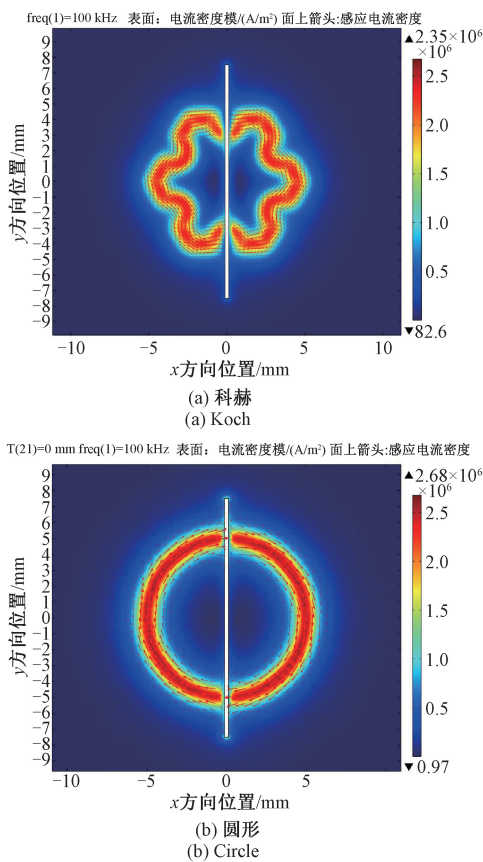


图 10 两种传感器检测 15 mm 长裂纹时在试件表面感应出的涡流分布图

Fig. 10 Distribution of eddy current induced on specimen surface when two kinds of sensors detect 15 mm long crack

两种传感器输出信号的变化量随角度变化情况如图 12 所示。整体而言,当裂纹方向在 90°附近时,圆形传感器的输出信号有明显的衰减,0°方向裂纹信号变化量是 90°方向的 51.7%,该现象在文献[22]中的实验结果中也出现,是由于涡流分布的方向信息比较单一。而科赫传感器对 90°方向裂纹信号变化量相对 0°方向裂纹的反而增加了 3%。在检测方向角大于 75°方向的裂纹时,科赫传感器输出的响应信号的 ΔV 值比圆形传感器的大 45% 以上。

为了进一步对比科赫与圆形传感器对不同方向裂纹的探测性能,对每个 ΔV 值所对应的不同方向裂纹检出率进行计算,如图 13 所示。由该图可知,当调理电路的灵敏度 ≤ 0.09 mV 时,科赫传感器可以检测到所有方向的裂纹,对不同方向裂纹的检出率为 100%;然而,当调理电路的灵敏度 ≤ 0.06 mV 时,圆形传感器才可以检测到所有方向的裂纹。说明相比于圆形传感器,科赫传感器对所有方向裂纹的响应更灵敏。

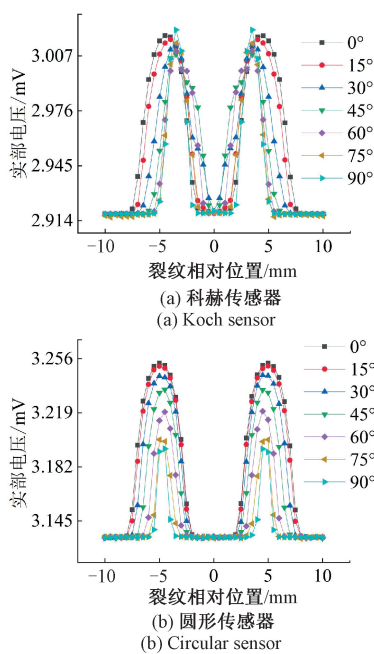


图 11 两种传感器对不同方向裂纹检测的实部电压信号对比

Fig. 11 Comparison of real voltage signals of two sensors for crack detection in different directions

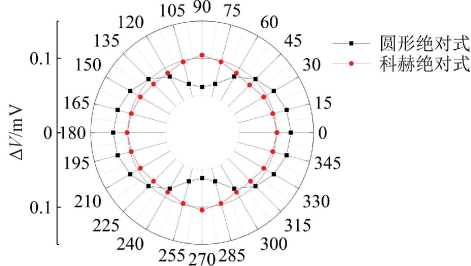


图 12 两种传感器对不同方向裂纹检测的实部电压信号 ΔV 值对比

Fig. 12 Comparison of ΔV values of two sensors for crack detection in different directions

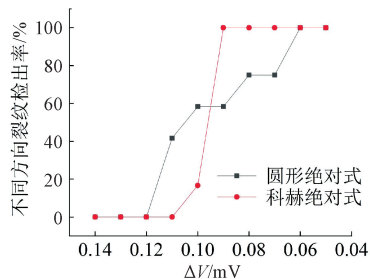


图 13 两种传感器对不同方向裂纹的检出率

Fig. 13 Probability of detection of the two sensors to crack in different directions

2.4 裂纹宽度对输出信号的影响

对宽度分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 mm,长度为 5 mm,深度为 1.6 mm,方向为 90°的裂纹,在提高距离为 0.1 mm 时进行有限元分析。分别提取两种传感器感应电压的实部信号,如图 14 所示。

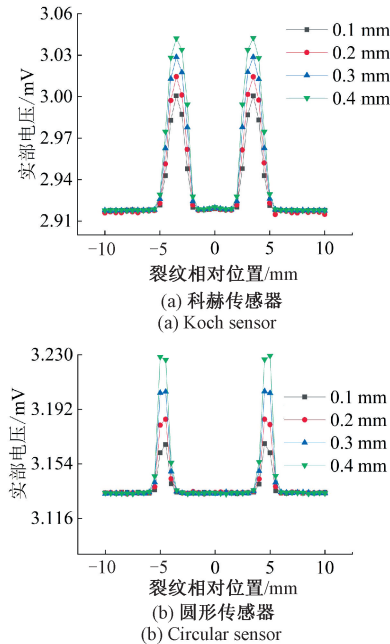


图 14 两种传感器对不同宽度裂纹检测的
实部电压信号对比

Fig. 14 Comparison of real voltage signals of two sensors
for crack detection in different widths

由图 14 可知,随着裂纹宽度的增加,两种传感器的实部信号均表现为实部电压信号的峰值逐渐增加,裂纹宽度的变化改变了峰值的大小,并没有改变峰值的位置,感应电压在横轴上的变化范围不变;且科赫传感器检测到的感应电压在横轴上的变化范围大于圆形传感器。

这是由于裂纹宽度的增加,导致检测到的裂纹的面积增加,集中在裂纹两端的涡流增多,感应涡流的路径变长,裂纹产生的扰动更强;在传感器的移动方向上,裂纹的长度并没有变化,裂纹两端感应涡流的相对距离没有变化,所以检测到的电压信号变化的范围不变;由于科赫曲线局部区域涡流集中,曲率连续变化,检测到裂纹的线圈区域比圆形线圈更广,即在检测过程中,科赫传感器与裂纹作用的线圈区域更广,在感应电压上体现为在横轴上感应电压的变化范围更大。提取两种传感器实部电压信号变化值 ΔV ,如图 15 所示。

由图 15 可知,随着裂纹宽度的增加,两种传感器检测到的实部电压信号 ΔV 值均增加,且科赫传感器检测到的 ΔV 值大于圆形传感器,平均大 76.5%,即在检测宽度单一变化的裂纹时,科赫传感器的检测性能优于圆形

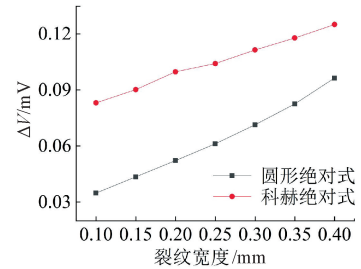


图 15 两种传感器对不同宽度裂纹检测的实部信号变化量
Fig. 15 Comparison of ΔV values of two sensors for
crack detection in different widths

传感器。这是由于在检测裂纹的过程中,与裂纹作用的科赫线圈区域的相对面积逐渐增加,裂纹的存在改变感应涡流的分布,且随着裂纹宽度的增加,这种改变涡流分布的程度更加强烈,即裂纹产生的扰动更强烈,被科赫线圈检测到的几率更大,所以检测信号的实部信号变化量更大;而对于圆形线圈,由于感应涡流的形状也是圆形,裂纹长度为 5 mm,在检测到裂纹时,裂纹对涡流的分布以及涡流流向影响很小,所以检测到的实部信号的变化量相对较小。

2.5 裂纹深度对输出信号的影响

对裂纹深度为 0.2~1.6 mm,以 0.1 mm 为步长增加,裂纹长度为 5 mm,裂纹宽度为 0.25 mm,裂纹方向为 90°的试件,在提高距离为 0.1 mm 下进行有限元分析。提取实部电压信号变化值 ΔV ,如图 16 所示。

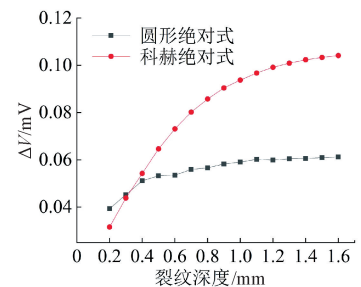


图 16 两种传感器对不同深度裂纹检测的
实部电压信号 ΔV 值对比

Fig. 16 Comparison of ΔV values of two sensors for
crack detection in different depths

对于科赫传感器,随着裂纹深度的增加,检测到的实部电压信号 ΔV 值逐渐增加,而对于圆形传感器, ΔV 值变化量小,这说明科赫传感器对于裂纹深度的变化更敏感。这是由于裂纹深度的变化不会改变检测到的裂纹的长度,随着裂纹深度的增加,沿着裂纹底部流动的一部分涡流的路径变长,检测信号的 ΔV 值增加。随着裂纹深度的增加,科赫传感器输出信号的 ΔV 值大于圆形传感

器,平均大 70.1%,即对于深度单一变化的裂纹,科赫传感器的检测效果大于圆形传感器。

3 实验验证

实验系统原理图如图 17 所示。由函数发生器 RIGOL-DG832 产生所需正弦激励信号,经功率放大器 RIGOL-PA1011 将激励信号放大,得到一定强度的激励电流,串联 1 个台式万用表 RIGOL-DM3058 实时监控激励电流的大小,该激励电流进入传感器的激励线圈,产生 1 个交变的一次磁场,试件表面产生的感应涡流产生 1 个二次交变磁场,一次磁场和二次磁场在空间中相互叠加,从而导致信号拾取线圈的磁通量发生变化,产生感应电压。感应电压通过前置放大器 AIGTEK-ATA-5210,获得一定的信噪比,最后经锁相放大器 OE2031 获得传感器输出信号的实部和虚部,然后通过上位机控制扫描台移动并获取锁相放大器的输出信号。

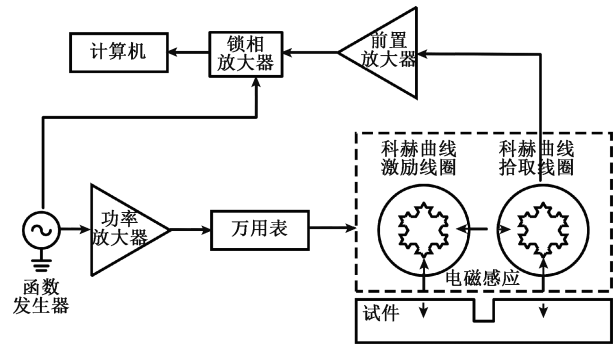


图 17 实验系统原理图

Fig. 17 Principle diagram of the experimental system

根据实验原理图,搭建实验系统。在裂纹检测的过程中,将传感器安装在三维扫描台上,带有裂纹的试件固定在三维扫描台的底部,在 0.1 mm 的提离距离下,三维扫描台沿 x 方向移动。实验系统实物图如图 18 所示。

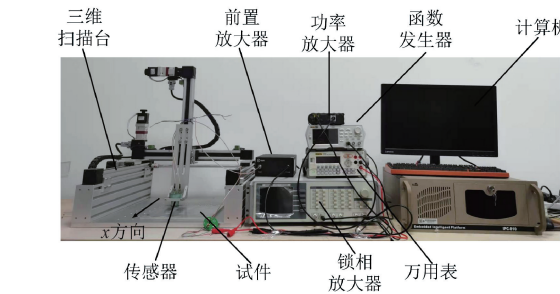


图 18 实验系统实物图

Fig. 18 Physical diagram of the experimental system

实验过程中试件选择铝制试件,试件尺寸以及裂纹尺寸均与仿真相同,对两种传感器分别进行不同长度、方

向、宽度、深度裂纹的检测,将储存在计算机里的实验数据利用 Matlab 进一步处理,经过滤波、去趋势之后,提取电压信号的模,分别得到检测不同长度、方向、宽度、深度裂纹实部电压信号的 ΔV 值,如图 19 所示。

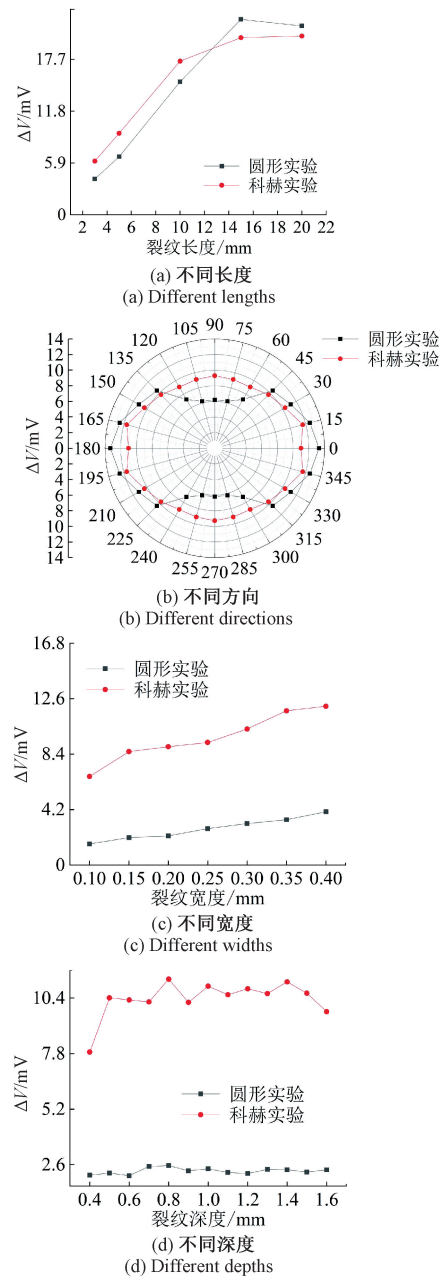


图 19 两种传感器对试件表面不同几何参数裂纹的检测

Fig. 19 Detection of cracks with different geometric parameters on specimen surface by two current sensors

实验结果显示,对于不同长度裂纹的检测,在检测 3、5 mm 短裂纹时,科赫传感器的拾取信号变化量 ΔV 分别比圆形传感器的高 49.7% 和 40.2%,即科赫传感器对于短裂纹的检测效果更好,这与有限元分析的结果一致;对于不同方向裂纹的检测,随着裂纹角度的增加,圆形传

感器检测到的电压信号的 ΔV 值减小,裂纹方向的变化对圆形传感器的影响更大,而科赫传感器检测到的电压信号的 ΔV 值没有显著变化,对不同方向的裂纹都有较高的检测灵敏度,实验结果与有限元分析结果相同;对于不同宽度裂纹的检测,科赫传感器检测到感应电压的 ΔV 值均大于圆形传感器, ΔV 值比圆形传感器平均高 263%,说明科赫传感器的检测性能更好,与有限元分析的结果一致;对于不同深度裂纹的检测,科赫传感器的 ΔV 值至少高于圆形传感器 273%。

两种传感器对不同方向裂纹的检出率如图 20 所示。科赫与圆形传感器随 ΔV 值的变化趋势与有限元结果相同,科赫传感器对所有方向裂纹检测的 ΔV 值均大于 9 mV,而圆形传感器在 ΔV 为 9 mV 时,只能检测到有限个方向的裂纹。说明圆形传感器对所有方向裂纹均能检测到的灵敏度小于科赫传感器。

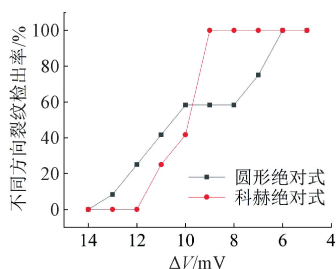


图 20 两种传感器对不同方向裂纹的检出率

Fig. 20 Probability of detection of the two sensors to crack in different directions

另外,从实验结果中可观察到,最终的结果有波动,尤其是对不同深度裂纹的实验,这些现象都是由实验过程中不可避免的外界因素造成的,如实验过程中三维扫描台的振动、外界噪音干扰、传感器的安装误差、定位误差等;另外,由于传感器的线圈均为单匝线圈,在实验过程中提离噪声大。该问题将在后续的研究中通过增加信号拾取线圈的匝数以期解决。

4 结 论

本文将分形几何与平面涡流传感器结合,提出一种绝对式科赫分形平面涡流传感器,通过有限元分析,对比科赫线圈和圆形线圈的涡流分布,以及两种传感器对不同长度、方向、宽度、深度裂纹的检测性能,并通过搭建实验平台验证有限元分析的结果,得到以下结论:

1) 科赫传感器在被测件中感应出的涡流在局部区域被调埋在更多方向上,有利于被不同方向裂纹扰动。

2) 在有限元分析结果中,对于 5 mm 长不同方向裂纹的检测,科赫传感器对大于 75° 方向裂纹的响应信号的 ΔV 值比圆形传感器的大 45% 以上。

3) 在不同方向短裂纹探测时,科赫传感器相对圆形传感器的灵敏度更高。

参考文献

- [1] 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, HU 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.
- [2] BERNIERI A, BETTA G, FERRIGNO L, et al. Crack depth estimation by using a multi-frequency ECT method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(3): 544-552.
- [3] SOPHIAN A, TIAN G Y, FAN M B. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.
- [4] XIE S J, ZHANG L, ZHAO Y, et al. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects [J]. NDT & E International, 2020, 111: 102211.
- [5] 刘正帅, 李勇, 任淑廷, 等. 构件损伤脉冲调制涡流检测探头新构型及性能综合分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 170-178.
LIU ZH SH, LI Y, REN SH T, et al. Novel structure and performance analysis of pulse-modulation eddy current probes for testing of damages in structural components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 170-178.
- [6] 胡祥超, 罗飞路, 唐莺, 等. 航空原位集成涡流无损检测系统[J]. 无损检测, 2011, 33(3): 59-62, 65.
HU X CH, LUO F L, TANG Y, et al. A novel system of integrated eddy current nondestructive testing for aviation[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33 (3): 59-62, 65.
- [7] 孟繁悦, 韩赞东, 石承昊. 多通道在线涡流检测系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 51-57.
MENG F Y, HAN Z D, SHI CH H. Research on multichannel online eddy current testing system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 51-57.
- [8] PATTOM T, FILKINS R, FULTON J, et al. Recent advances and implementations of flexible eddy current probe technology[J]. Review of Progress in Quantitative

- Nondestructive Evaluation, 1998, 17: 1809-1816.
- [9] PATTOM T, FILKINS R, FULTON J, et al. Development of a hand-held, flexible eddy current probe for inspection of curving surfaces[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 2107-2111.
- [10] 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.
- [11] 殷晓康, 李晨, 李振, 等. 电容成像无损检测实验平台的开发[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(3): 90-96.
- YIN X K, LI CH, LI ZH, et al. Development of NDT experimental platform based on capacitance imaging technology [J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(3): 90-96.
- [12] 李振, 殷晓康, 李晨, 等. 基于 COMSOL 的电容成像传感器仿真研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 1-5.
- LI ZH, YIN X K, LI CH, et al. Simulation study of capacitance imagine sensor based on COMSOL software[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(9): 1-5.
- [13] 樊祥洪, 陈涛, 何宇廷, 等. 柔性涡流传感器裂纹原位定量监测技术[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(9): 97-104.
- FAN X H, CHEN T, HE Y T, et al. In-Situ quantitative monitoring of crack propagation by flexible eddy current sensor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(9): 97-104.
- [14] FAN X H, CHEN T, HE Y T, et al. Influence of spatial winding distribution of flexible eddy current sensor on quantitative monitoring of subsurface cracks [J]. Measurement, 2021, 178: 109382.
- [15] ZHANG H Y, MA L Y, XIE F Q. A method of steel ball surface quality inspection based on flexible arrayed eddy current sensor[J]. Measurement, 2019, 144: 192-202.
- [16] SHE S B, LIU Y Z, ZHANG S J, et al. Flexible differential butterfly-shape eddy current array sensor for defect detection of screw thread [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20764-20777.
- [17] DING H, HE Y T, JIAO S B. Rosette eddy current sensor for structural health monitoring [C]. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2013, 330: 430-436.
- [18] YE C F, ZHANG N, LEI P, et al. Flexible array probe with in-plane differential multi-channels for inspection of micro-defects on curved surface[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(1): 900-910.
- [19] ROSADO L S, SANTOS T G, RAMOS P M, et al. A new dual driver planar eddy current probe with dynamically controlled induction pattern[J]. NDT & E International, 2015, 70: 29-37.
- [20] 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.
- [21] CHEN G L, CAO Z, ZHANG W M. A novel planar differential Koch fractal eddy current probe with parallel wound topological structure [J]. Journal of Sensors, 2021, DOI:10.1155/2021/6671189.
- [22] 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.
- [23] DENG W Q, BAO J, LUO S Q, et al. Simulation analysis of eddy current testing parameters for surface and subsurface defect detection of aviation aluminum alloy plate[J]. Journal of Sensors, 2022, DOI:org/10.1155/2022/8111998.
- [24] ONA D I, TIAN G Y, SUTTHAWEEKUL R, et al. Design and optimisation of mutual inductance based pulsed eddy current probe [J]. Measurement, 2019, 144:402-409.

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, 主要研究方向为电磁无损检测和涡流传感器。
E-mail: cgl20061273@126.com

Chen Guolong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2010, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2018. He is currently an associate professor at Lanzhou University of Technology. His main research interests include electromagnetic NDT and eddy current sensors.