

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006291

电容-涡流双模式一体化探头检测性能影响因素研究*

殷晓康,符嘉明,谷悦,李伟,陈国明

(中国石油大学(华东)机电工程学院 青岛 266580)

摘要:电容-涡流双模式一体化无损检测方法,可结合绝缘体检测中的电容检测技术与导体检测中的涡流检测技术的优势,满足玻纤复合材料修复结构等“绝缘-导电”混合结构的全面检测需求。对双模式一体化检测技术的电容与涡流模式原理分别进行了分析,识别双模式一体化探头检测性能影响因素,对激励信号频率、提离距离、探头扫描方向及线圈参数对检测性能的影响进行了试验研究,以检测特征信号变化率曲线中目标缺陷中心位置处的标准变化率为量化指标,直观表征各因素对检测性能的影响方式与程度。结果表明,试验条件与探头设计参数对各模式检测性能影响规律不同,其中提离距离与线圈参数影响较为显著。通过对各因素影响规律的综合考虑,有望实现检测性能提升并指导探头优化设计。

关键词:双模式;无损检测;检测性能;影响因素;探头设计

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

Investigations into the influential factors for the inspection performance of capacitive-eddy current dual modality integrated probe

Yin Xiaokang, Fu Jiaming, Gu Yue, Li Wei, Chen Guoming

(School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Capacitive-eddy current dual modality integrated non-destructive testing method combines the advantages of capacitive inspection technique in the inspection of insulators and eddy current inspection technique in the inspection of conductors, and can fulfill the overall inspection requirement of “insulator-conductor” hybrid structures such as glass fiber composite repair structure. The principles of the capacitive mode and eddy current mode of dual modality integrated inspection technique are analysed, respectively, the influential factors of the inspection performance for dual modality integrated probe are identified. The influences of excitation signal frequency, lift-off distance, probe scan direction and coil design parameters on the inspection performance are studied in experiment. Normalized variation ratio (NVR) at the center of the target defect in the inspection characteristic signal variation ratio curve is taken as a quantitative indicator to intuitively characterize the influential pattern and degree of various factors on the inspection performance. The results indicate that experiment conditions and design parameters have different influential patterns on the inspection performance, among which the lift-off distance and coil parameters have obvious influence. Comprehensive considering the influential patterns of various factors may hopefully achieve the inspection performance improvement and guide the optimal probe design.

Keywords: dual modality; non-destructive testing; detection performance; influencing factor; probe design

0 引言

由于防腐、隔热、保温、减振等需求,能源、交通及军事领域大量使用了类似绝缘包覆金属管、带热障涂层构件及玻纤复合材料补强结构等“绝缘-导电”混合结构。

由于结构的复杂性及材料的多样性,对于混合结构各材料层的全面检测是无损检测行业的技术难题与研究热点。近年来,为解决混合结构全面检测的难题,研究人员尝试采用将两种(或以上)不同检测方法相结合的复合检测技术,如超声相控阵与电磁超声结合、脉冲涡流与射线结合、微波与热成像的结合等。在众多多模式复合技

收稿日期:2020-04-22 Received Date: 2020-04-22

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0802303)、国家自然科学基金(51675536)、中央高校基本业务费自主创新项目(18CX02084A)资助

术中,电容-涡流复合的检测技术因其可充分发挥电容与涡流检测技术分别在非导电材料与导电材料检测中的优势,被成功应用于热障涂层及绝缘包覆金属管等单一检测技术难以全面检测的“绝缘-导电”混合结构中^[1-2]。

国内外研究人员针对电容-涡流双模式复合的检测技术进行了较为深入的研究,以应对复杂条件下/混合结构中多参数检测的挑战。双模式复合方式方面:陈棣湘等^[3]提出采用双面印刷电路板的设计将电磁与电容检测技术结合,通过对高分辨率柔性电磁/电容传感器设计、多传感器信息融合、材料多物理属性反演等关键技术的突破,实现热障涂层系统涂层厚度及粘结层电导率等参数进行测量^[1-5];Grundy等^[6]JENTEK Sensor公司的研究人员将曲折缠绕磁力计(meandering winding magnetometer, MWM)式涡流传感器与交叉指阵列(interdigital electrode dielectrometer, IDED)式电容传感器相结合,实现对结构健康状况的监测;Long等^[7]借鉴超材料原理(metamaterial-inspired)开发了兼具电容与电感传感功能的接近传感器,通过该传感器采用不同频率的激励,实现被测目标材料属性的区辨;崔自强等^[8]发明了基于LCR表/阻抗分析仪的电容/电磁双模态成像测量系统,利用自动切换开关实现电容测量回路与互感测量回路的切换,完成复杂流体成像和多相流参数的检测;Bekas等^[9]设计了一种打印在复合材料基体上的多功能智能结构传感器,该传感器具有并联的电容与电感单元,可用于监测复合材料修补位置树脂固化及缺陷检测。双模式检测技术应用方面:Salas等^[10]采用电容-涡流双模式结合的检测方案,高精度测量金属板厚度;George等^[11]设计电容电感双模接近传感器,实现占位物体电磁属性检测;Kan等^[12]也开发出一种电容电感双模式接近传感器,用于机器人的目标识别与测距;张洪朋等^[13]利用硅钢片和平面线圈构建出电感-电容双模式传感器用于多参数油液污染物检测。上述电容-涡流双模式复合技术很好地解决了不同应用场合中的多参数测量问题,但这些技术的不同测量模式多采用独立的传感器设计与测试装置/通道,造成部分技术的设备复杂程度较高或者检测时间较长,两种模式信息融合困难,双模式检测优势尚存提高空间。

基于以上分析,文献[14]提出一种新型电容-涡流双模式无损检测技术,并初步验证了该技术在“复合材料-金属”混合结构检测中的可行性。与其他文献报道的电容-涡流复合检测技术各模式分别采用独立敏感元件不同,该新型电容-涡流双模式探头中的双线圈在电容、涡流各自模式中作为敏感元件整体使用,这种双模式一体化的设计可大大简化检测正反面问题并提高探头设计自由度。文献[14]充分展示了电容-涡流双模式复合技术相比单一技术在混合结构检测中的优越性,并重点关

注了该技术的实施方法和可行性。为进一步提升电容-涡流双模式一体化检测技术的检测性能,本文对该双模式探头检测性能影响因素进行了深入研究。首先对电容-涡流双模式检测技术的基本原理进行了简单的介绍,然后分析了影响双模式探头检测性能影响因素,最后通过试验研究了激励信号、提离高度、探头扫描方向、探头形状等因素对检测性能的影响,为后续电容-涡流双模式检测系统开发及新型探头设计等提供依据。

1 电容-涡流双模式无损检测技术

1.1 电容-涡流双模式探头

本文所研究电容-涡流双模式检测技术所采用的探头具有蚀刻在印刷电路板上的两个平面线圈,为双端口器件,如图1所示。



图1 平面双线圈式电容-涡流双模式探头

Fig. 1 Dual planar coil capacitive-eddy current dual modality probe

根据外部激励与测量电路接线的不同,双模式探头中平面双线圈可作为电容成像的激励-测量电极对(线圈单端接入)或涡流检测的激励-接收线圈对(线圈两端接入)。双模式分时工作,模式转换通过外部激励与测量电路的程序控制切换实现,平面线圈的电容极板和涡流线圈接线转换形式如图2所示。

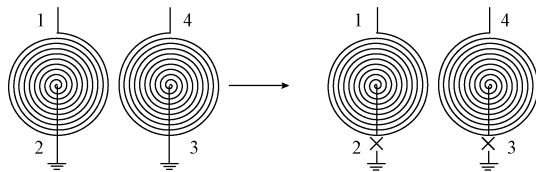


图2 电容与涡流模式接线方式

Fig. 2 Wiring schematic diagram of the capacitive and eddy current modes

图2左侧为涡流模式接线,线圈端口1接激励信号,端口4输出检测信号,端口2和3与地连接形成完整的电流回路,实现涡流检测;图2右侧为电容模式接线,端口2和3断开,线圈只有端口1和端口4分别与激励电路和检测电路连接,两个线圈无电流回路,作为电容极板使用,实现电容检测。实际双模式检测系统包含检测模式切换装置,分别与线圈4个端口以及外部电路连接,通过来自上位机的控制信号控制完成双

模式探头线圈和外部电路连接方式的模式切换,实现单次扫描完成对被测对象的电容检测和涡流检测。

1.2 电容-涡流双模式无损检测技术基本原理

电容-涡流双模式检测技术由电容与涡流两种模式复合而成,需对电容模式与涡流模式的检测原理分别分析。在双模式检测中,采用激励信号为较低频率电压信号(10 kHz),故可采用准静态场假设(quasi-static field approximation),忽略位移电流、印刷电路走线间寄生电容等因素,简化分析。电容模式依靠边缘电场进行检测,利用展开至共面的极板间的非线性边缘电场作为探测场,对混合结构中非导电层进行检测。被测结构非导电材料层表面或内部缺陷会引起探测场扰动,从而改变测量电极上的电荷量,导致测量电容变化。检测系统通过测量电容变化实现对被测结构非导电材料层的检测,电容模式原理如图3所示。

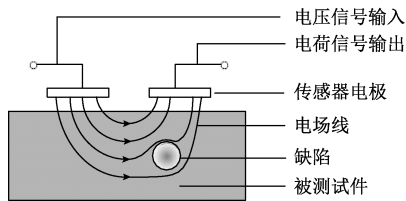


图3 电容模式原理

Fig. 3 Principle of the capacitive mode

根据洛伦兹互易定理,通过对互易激励条件下等效电路的分析,可得出由被测材料中缺陷的存在所导致电容模式电容变化量 ΔC 的表达式^[14]:

$$\Delta C = \frac{1}{V^2} \int_{V_f} [(\varepsilon_{II} - \varepsilon_I) \mathbf{E}_I \cdot \mathbf{E}_{II} - (\mu_{II} - \mu_I) \mathbf{H}_I \cdot \mathbf{H}_{II}] dv \quad (1)$$

式中: V 为互易激励电压;互易激励下的两个独立物理场由下标 I 和 II 标识,下标 I 表示无缺陷情况下的材料属性参数与探头下方的电场与磁场,下标 II 表示有缺陷情况下材料属性参数与探头下方的电场与磁场。

涡流模式基于电磁感应定律,双模式探头的激励线圈中通入交变电流时,将产生交变电磁场,从而在探头下方被测混合结构导电材料层中感生出涡电流,若被测结构导电材料层中存在缺陷,涡流将受到缺陷扰动,引发二次磁场变化,最终导致检测线圈中感应电压变化。检测系统通过提取检测线圈的感应电压变化实现对被测结构导电材料层的检测,涡流模式原理如图4所示。

与电容模式类似,在涡流模式下,可得出由于被测材料中缺陷的存在导致涡流模式转移阻抗变化量 ΔZ 表达式^[14]:

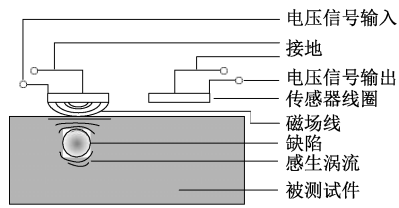


图4 涡流模式原理

Fig. 4 Principle schematic diagram of the eddy current mode

$$\Delta Z = \frac{1}{I^2} \int_{V_f} [(\varepsilon_{II} - \varepsilon_I) \mathbf{E}_I \cdot \mathbf{E}_{II} - (\mu_{II} - \mu_I) \mathbf{H}_I \cdot \mathbf{H}_{II}] dv \quad (2)$$

式中: I 为互易激励电流;下标 I 表示无缺陷情况下的材料属性与探头下方的电场与磁场,下标 II 表示有缺陷情况下材料属性与探头下方的电场与磁场。

2 双模式探头检测性能影响因素分析

电容-涡流双模式一体化检测技术通过探头在被测区域的扫描实现成像。在每个扫描位置,检测系统分别进行电容模式与涡流模式检测并将测得的电容值与转移阻抗分别存储,扫描完成后可形成独立的电容图像与涡流图像,用于对混合结构完整性的综合评价。为提升双模式检测技术的性能,需对双模式探头检测性能影响因素进行分析。国内外研究人员对单一电容或涡流传感器检测性能影响因素的研究较为深入^[15-18],但对于需要兼顾各模式平衡的电容-涡流双模式检测技术,相关研究未见报道,需在双模式一体化前提下分别考虑双模式探头电容与涡流模式的性能影响因素。

对于电容模式所涉及的平面电容传感器,双模式检测技术的测量值为电容值。在准静电场前提下,可忽略位移电流及介电损耗,通过对式(1)的分析,可获取双模式探头电容模式下检测电容值影响因素表达式:

$$C = f(\varepsilon, f, h, d, r) \quad (3)$$

式中: ε 为被测试样非导电结构层的相对介电常数; f 为正弦激励信号的频率; h 为探头与被测对象之间的提高距离; d 为被测试样非导电结构层厚度; r 为探头结构参数。极板间的电容与激励频率无关,对于给定被测对象(ε 和 d 为定值),影响电容检测值的主要因素为提高距离 h 与探头结构参数 r 。

对于涡流模式所涉及的平面线圈涡流传感器,双模式成像技术的测量值为转移阻抗。通过对式(2)的分析,可获取双模式探头涡流模式下转移阻抗值影响因素表达式:

$$Z = f(\sigma, \mu, f, h, d, r) \quad (4)$$

式中: σ 为被测对象导电结构层(金属)的电导率; μ 为被

测对象导电结构层(金属)的相对磁导率; f 是正弦激励信号的频率; h 为线圈与被测对象之间的提高距离; d 被测试样非导电结构层厚度; r 为探头结构参数。对于给定被测对象(σ 、 μ 和 d 为定值),影响转移阻抗检测值的主要因素为激励信号频率 f 、提高距离 h 、探头结构参数 r ,其中激励信号频率 f 从检测灵敏度和探测场穿透深度两个方面影响检测性能。

由于双模式探头采用平面线圈的设计,使得极板间电场耦合(电容模式)与线圈间的磁场耦合(涡流模式)相对较弱,各模式检测信号微弱且容易受噪声干扰,因此,除式(3)和(4)所述检测性能影响因素外,在实施双模式检测时需特别注意检测设备及试验条件等对检测性能的影响,如连接线缆屏蔽效果、探头封装形式、探头加持方式、被测对象表面平整度及检测边缘效应等。本文考虑理想检测设备与试验条件下(即:无线缆寄生电容扰动、屏蔽电磁干扰、被测对象为平面结构、探头表面与被测对象表面平行、无边效应等)双模式探头的检测性能影响因素。

3 双模式探头成像性能影响因素试验研究

在以上检测性能影响因素分析的基础上,本节进行双模式检测试验,以发掘不同因素对各模式检测性能的影响规律。

3.1 双模式检测试验系统

对双模式探头检测性能影响因素研究所采用的试验系统如图 5 所示。该系统包括双模式探头、X-Y-Z 三轴扫描台架、信号发生器、模式切换控制盒、电压放大器、电荷放大器、锁相放大器、信号采集卡和上位机。

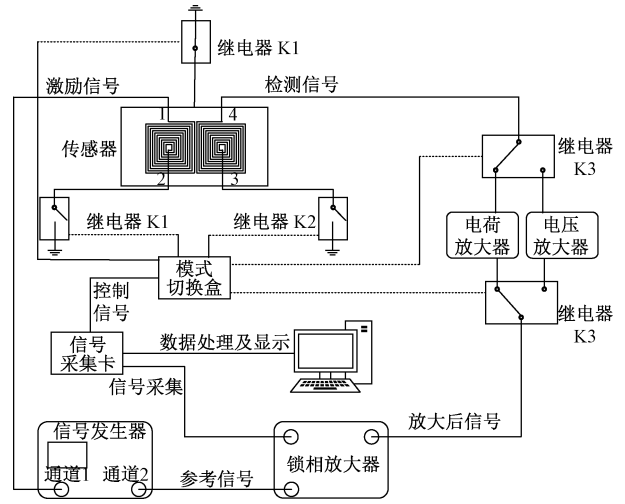


图 5 双模式检测试验系统

Fig. 5 Block diagram of the dual modality inspection experiment system

双模式探头由三轴扫描台架夹持;信号发生器产生电压激励信号与同频参考信号分别用于探头激励与锁相放大器参考;模式切换盒中的继电器 K1、K2、K3 由控制信号驱动,实现电容模式与涡流模式两种检测模式的切换;电容模式下检测信号进入电荷放大器将电荷信号转变为电压信号并放大,涡流模式下检测信号进入电压放大器进行放大;各模式电压信号进入锁相放大器进行处理后由信号采集卡采集并传输到上位机进行处理与显示。

探头是电容-涡流双模式检测技术关键部件,其设计参数将决定双模式探头的检测性能,前期研究表明,圆形双线线圈式探头可平衡电容与涡流模式间测设计矛盾,可作为通用设计方案使用。除特别说明外,本文中的检测试验均采用图 6 所示双模式探头,图 6 中 1~4 表示线圈端口编号,端口与外接电路连接方式如图 6 所示,探头参数如表 1 所示。

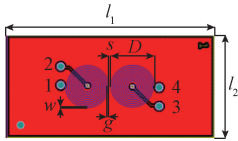


图 6 典型双模式探头

Fig. 6 A typical dual modality probe

表 1 平面线圈参数表

Table 1 Parameter table of the planar coil

参数名称	参数符号	参数值
探头长度	l_1	39 mm
探头宽度	l_2	19 mm
线圈直径	D	8 mm
线圈对间距	s	0.5 mm
线圈匝数	n	10 匝
线径	w	0.2 mm
线间距	g	0.2 mm

3.2 试验用试块

电容-涡流双模式检测技术为检测“绝缘体-导体”混合结构检测而设计,但为分别研究各模式检测性能影响因素,需分别设计并加工最能体现单一模式成像性能的试块,并利用双模式探头的单一模式分别进行成像试验。对于适合非导电材料体积型检测缺陷的电容模式,采用带通孔玻璃钢试块(试块 I)。试块 I 为 100 mm(长)×100 mm(宽)×10 mm(厚)玻璃钢板,其中心带有直径为 10 mm 的圆形通孔,试块 I 如图 7 所示。

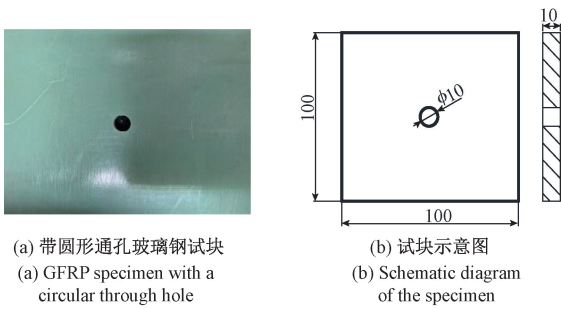


图 7 电容模式试验试件

Fig. 7 Specimen for capacitive mode

对于适合导电材料裂纹型缺陷检测的涡流模式,采用带裂纹铝合金试块(试块Ⅱ),试块为 100 mm(长)×90 mm(宽)×9 mm(厚)铝合金板,其表面带有 45 mm(长)×0.8 mm(宽)×7 mm(深)的裂纹,试块Ⅱ如图 8 所示。

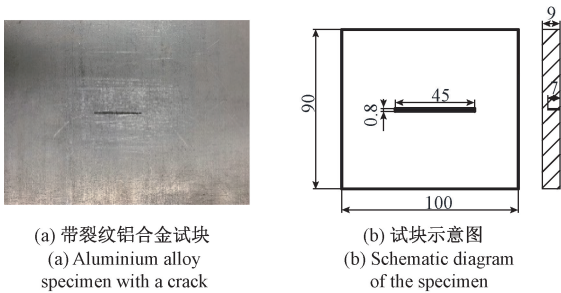


图 8 涡流模式试验试件

Fig. 8 Specimen for eddy current mode

3.3 双模式探头检测试验

1) 激励信号频率影响

为研究激励信号频率对成像性能影响,使用图 6 所示的平面线圈双模式探头,采用不同频率正弦信号作为激励,在电容模式和涡流模式下进行扫描试验,探头放置方向与扫描方向关系如图 9 所示(简称为平行扫描,如非特殊说明,本文剩余部分试验均采用此扫描方向)。

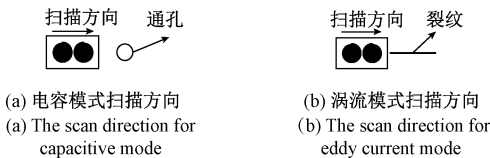


图 9 探头扫描方向示意图(平行扫描)

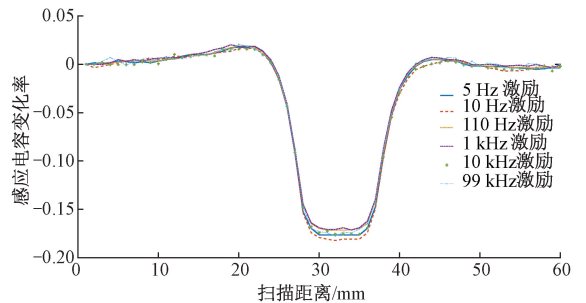
Fig. 9 Schematic diagram of probe scan direction (parallel scan)

信号频率影响试验中采用正弦电压激励(pk-pk 10 V),传感器提高高度 0.4 mm,激励频率分别设置为 5 Hz、10 Hz、110 Hz、1 kHz、10 kHz 和 99 kHz。为讨论问题方便,本文所有试验结果均由各模式特征信号标准变化率(normalized variation ratio, NVR)表示,其定义为:

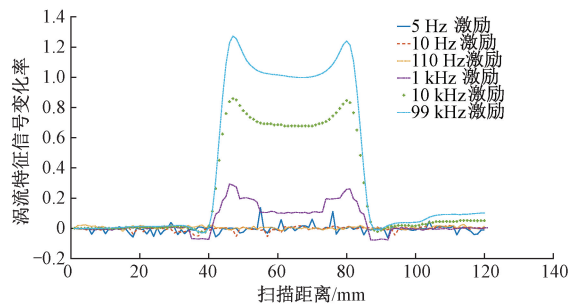
$$NVR = (V_m - V_0) / V_m \quad (3)$$

式中: V_m 为任意测点处的特征信号幅值; V_0 为无缺陷位置处特征信号幅值,由于 V_m 与 V_0 相对关系, NVR 的取值可能为正值或者负值。 NVR 值的大小,反映了缺陷对特征信号的扰动程度。

两种模式激励信号频率影响试验结果分别如图 10(a) 和(b) 所示。



(a) 电容模式缺陷扫描结果
(a) Scan result of capacitive mode defect



(b) 涡流模式缺陷扫描结果
(b) Scan result of eddy current mode defect

图 10 激励频率影响试验

Fig. 10 Excitation frequency influence experiments

在电容模式中(图 10(a)),由于在所采用的激励信号频率范围内,准静电假设成立,可忽略位移电流与介电损耗激励,因此频率的改变对扫描结果影响不大,不同激励频率下电容特征信号基本重合。在涡流模式中(图 10(b)),在较低频率交流电压(5、10 Hz)激励下,未能实现对裂纹的检出,原因是在较低频率下,感生涡流的强度较小、检测线圈中的感应电动势较小。

为直观评价激励信号频率(及本文后续研究各因素)对双模式检测性能的影响,选取变化率曲线中目标缺陷中心位置处的 NVR 为量化指标(简称中心变化率),将所研究因素对检测性能的影响程度进行量化。

中心变化率虽非变化率曲线中的极值点,但可消除缺陷边缘效应及非对称效应的影响,并综合反映双模式探头在给定试验条件下检测信号对目标缺陷的响应规律,适合作为特征指标对试验结果进行量化分析。分别提取电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制两种模式中心变化率随激励信号频率变化规律,如图 11 所示。

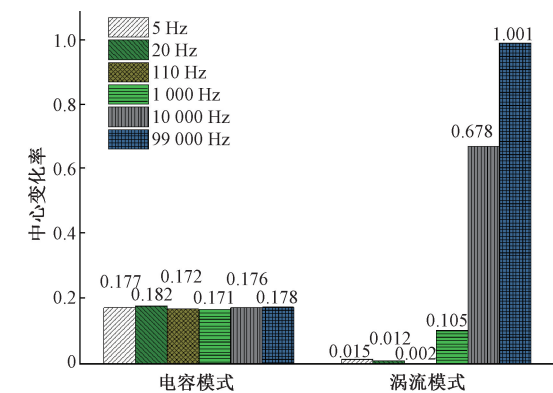


图 11 不同激励信号频率中心标准变化率
Fig. 11 Central NVRs for different excitation signal frequencies

其中电容模式不同频率下的中心变化率基本持平,而在涡流模式中,频率越高(1 kHz 以上),中心变化率越大(由 1 kHz 处的 0.106 增加到 99 kHz 处的 1.001),同一缺陷所产生的信号畸变率越大。可见在检测仪器测量范围内可适当选择较高频率可增强涡流模式检测灵敏度。但需指出的是本文试验采用带表面缺陷金属试块,如需检测隐藏缺陷需综合考虑激励频率对穿透深度的影响。

2) 探头提离距离影响

为研究探头提离距离对检测性能影响,使用图 6 所示的平面线圈双模式探头,采用正弦电压激励(pk-pk 10 V, 10 kHz),在不同提离距离下(1~7 mm)对玻璃钢试块及铝试块分别进行了电容模式与涡流模式的检测,试验结果如图 12(a)、(b)所示。

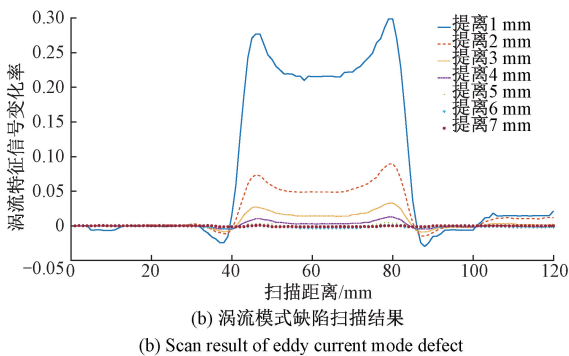
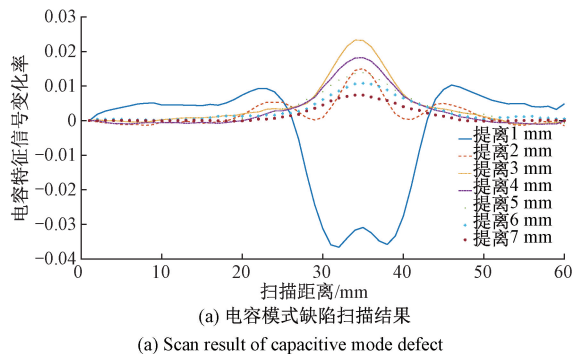


图 12 提离距离影响试验结果
Fig. 12 Experiment results of lift-off distance influence

由图 12 可见,在所有提离距离下,两种模式均实现了对缺陷的检出,但各模式特征信号呈现出不同的变化规律:对于电容模式,随着提离距离增大,由孔缺陷导致的特征信号变化率曲线由凹陷变为凸起;对于涡流模式,随着提离距离增大,由裂纹缺陷导致的特征信号变化率曲线所呈现的凸起程度逐渐减小。为直观反映提离距离对各模式特征信号的影响,分别提取电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制两种模式中心变化率随提离距离变化规律,如图 13 所示。

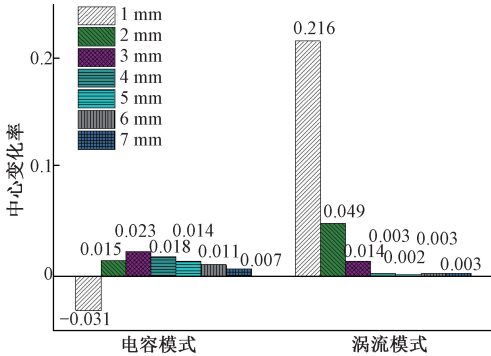


图 13 不同提离距离中心标准变化率
Fig. 13 Central NVRs for different lift-off distances

由图 13 可见,对电容模式,随着提离距离的增加,中心变化率由 1 mm 处的负值(-0.031)变成正值,增加至 3 mm 处的最大值(0.023)后逐渐减小,减小规律维持到较大的提离处(7 mm)。电容模式中心变化率出现此趋势的原因在于,探头下方存在负灵敏度区域,随提离距离的增大,缺陷由大部分位于正灵敏度区域变为大部分位于负灵敏度区域,导致响应信号变化趋势出现翻转。与电容模式不同,随着提离距离的增加,涡流模式的中心变化率由 1 mm 提离处的最大值(0.216)单调下降至 3 mm 处的较小值(0.014),没有出现翻转现象,而在 4 mm 以上提离距离下,中心变化率接近于 0,表明涡流模式检测适合于较小提离距离。

3) 扫描方向影响

由于源自双模式探头的电容探测场与涡流探测场均不具有旋转对称性,探头相对缺陷的放置方向将对检测效果产生影响。本节在两种模式下采用相互垂直的扫描方向对玻璃钢试块与铝试块进行检测试验,研究扫描方向的变化对检测性能影响。除图9所示平行扫描外,探头还可采用垂直扫描的方式,如图14所示。

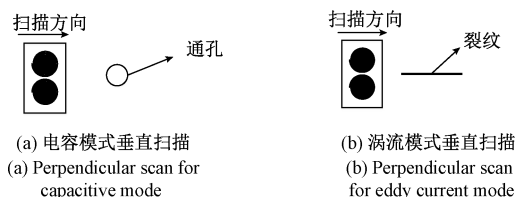
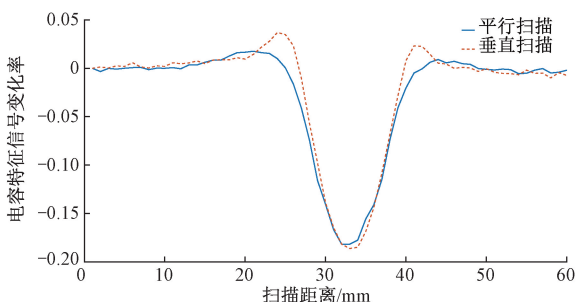


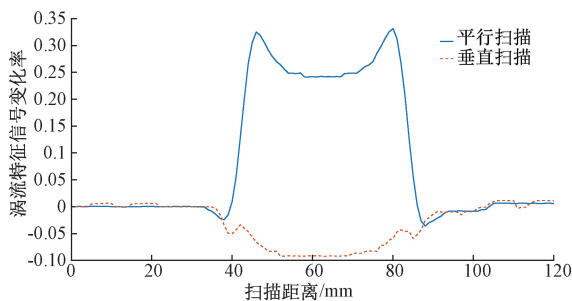
图14 双模式探头各模式扫描方向示意图(垂直扫描)

Fig. 14 Schematic diagram for the scan direction of various modes of the dual modality probe (perpendicular scan)

扫描方向影响试验采用正弦电压激励(pk-pk 10 V, 10 kHz), 提离高度 0.5 mm, 对玻璃钢试块及铝试块分别进行了电容模式与涡流模式两个扫描方向的检测, 试验结果如图15(a)、(b)所示。



(a) Scan result of capacitive mode defect



(b) Scan result of eddy current mode defect

图15 扫描方向影响试验结果

Fig. 15 Experiment results of scan direction influence

由图15可见,对于具有旋转对称性的圆孔缺陷,电容模式下的平行扫描与垂直扫描呈现不同的响应特征,平行扫描变化率曲线在扫描方向上呈现了更大的扩散范

围(畸变区域宽度较大)。对于涡流模式,两个扫描方向下的曲线呈现了不同的畸变方向,有望作为裂纹方向的判据。这是因为在不同扫描方向情况下,裂纹对试块中涡流的扰动形式不同,导致激励与检测线圈之间的耦合变化情况呈现不同规律。

分别提取电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制两种模式中心变化率随扫描方向变化规律,如图16所示。

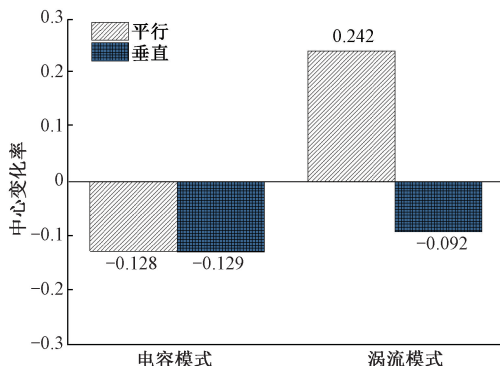


图16 不同扫描方向中心标准变化率

Fig. 16 Central NVRs for different scan directions

由图16可见,电容模式两个扫描方向下的中心变化率基本相同(-0.128与-0.129),因为两个扫描方向在通孔中心位置处等效。对于涡流模式,中心变化率由平行扫描处的0.242变为垂直扫描处的-0.092,出现了极性的变化与绝对值的减小,可见该类型探头对平行裂纹更为敏感。此外,对比涡流模式下两个扫描方向的结果,可根据中心变化率的变化情况推测裂纹缺陷与探头中心线的相对角度关系。

4) 探头设计参数影响

双模式探头采用平面双线圈组合作为敏感元件,线圈的形状和尺寸等设计参数对探头检测性能影响较大,本节着重研究研究探头平面线圈的设计参数(线圈形状、间距和匝数)对其检测性能的影响。在探头设计参数影响试验中,均采用正弦电压激励(pk-pk 10 V, 10 kHz),提离高度保持为0.5 mm。

对于线圈形状影响研究,本文设计并制造了对称式圆形、方形、点对点三角形、背对背三角形和同心圆5种不同形状的平面线圈探头,如图17所示。除线圈形状外,5个探头线圈面积、线圈匝数、线圈最近距离等其他线圈参数保持一致,其中图17(a)所示对称式圆形线圈探头与图6所示探头结构参数完全一致。

利用图17探头对玻璃钢和铝试块分别进行扫描,所获取的线圈形状影响试验结果如图18所示。分别提取图18中电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制不同线圈形状下两种模式中心变化率,如图19所示。

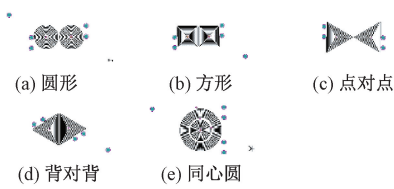
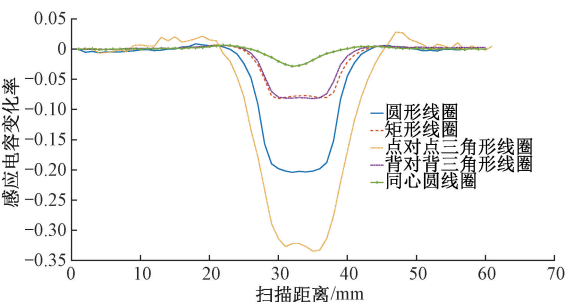


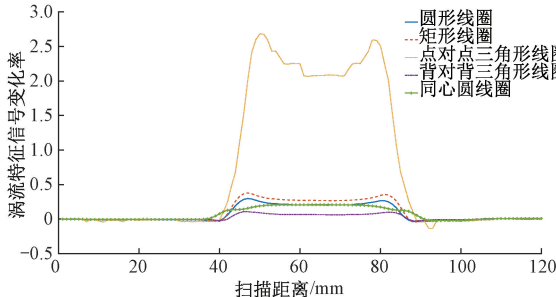
图 17 不同线圈形状双模式探头

Fig. 17 Dual modality probes with different coil geometries



(a) 电容模式缺陷扫描结果

(a) Scan result of capacitive mode defect



(b) 涡流模式缺陷扫描结果

(b) Scan result of eddy current mode defect

图 18 线圈形状影响试验结果

Fig. 18 Experiment results of coil geometry influence

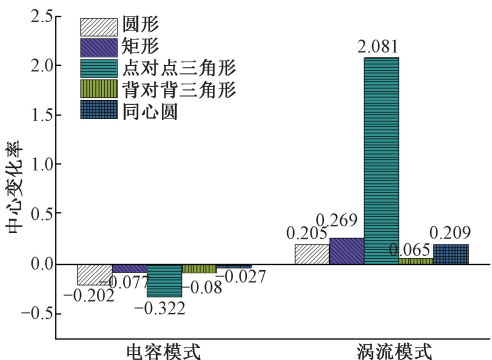


图 19 不同线圈形状中心标准变化率

Fig. 19 Central NVRs for different coil geometries

由图 19 可见,在电容模式和涡流模式中,中心变化率绝对值最大的均为三角形线圈(电容模式下的 0.322 与涡流模式下的 2.081)。对于电容模式,在点对点三

角形线圈中,虽然两个线圈(极板)耦合程度较低,但由于两个线圈最近的距离为三角形顶点,造成电荷在线圈顶点处的聚集,因此当遇到缺陷时顶点处的电场扰动程度大,反映在结果中表现为特征信号畸变率更大。此外,点对点三角形线圈探头相对其他探头由于线圈等效间距较大,造成探头的穿透深度较大,对于如本试验中采用的圆孔缺陷等较深缺陷,也会造成特征信号变化率最大值的增大。对于涡流模式,不同形状的线圈在被测试块中感应的涡流具有不同的流型,综合考虑不同形状线圈间的耦合程度,亦会导致特征信号对同一裂纹缺陷的不同变化率。

除线圈形状外,双线圈间最近距离(以下简称线圈间距)也是影响耦合的重要参数。对线圈间距影响研究所采用的探头,如图 20 所示。对称式圆形线圈的间距分别为 0.5、1.0、1.5 与 2.0 mm,其他结构参数与图 6 所示探头一致。

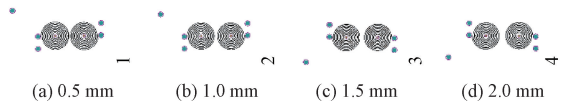
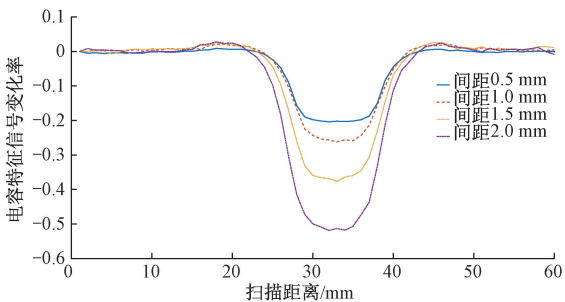


图 20 不同线圈间距双模式探头

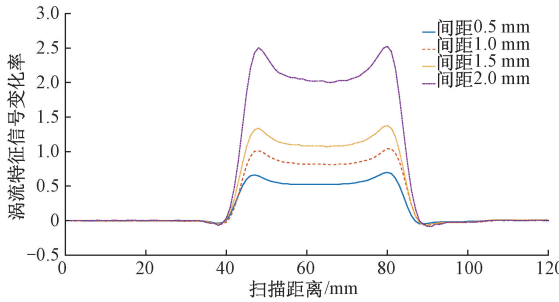
Fig. 20 Dual modality probes with different coil spacings

线圈间距影响试验结果如图 21 所示。分别提取图 21 中电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制不同线圈间距下两种模式中心变化率,如图 22 所示。



(a) 电容模式缺陷扫描结果

(a) Scan result of capacitive mode defect



(b) 涡流模式缺陷扫描结果

(b) Scan result of eddy current mode defect

图 21 线圈间距影响试验结果

Fig. 21 Experiment results of coil spacing influence

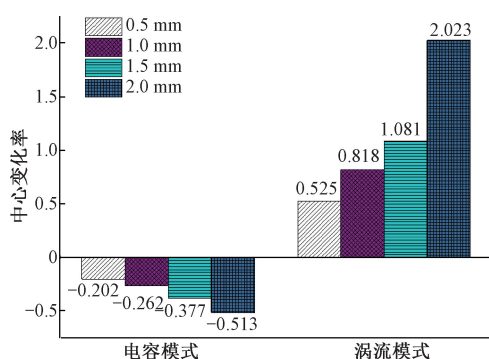


图 22 不同线圈间距中心标准变化率

Fig. 22 Central NVRs for different coil spacing

由图 22 可见,电容模式和涡流模式均显示出间距越大中心变化率绝对值越大的现象,均为 $NVR_{2\text{ mm}} > NVR_{1.5\text{ mm}} > NVR_{1\text{ mm}} > NVR_{0.5\text{ mm}}$ 。这是因为在电容模式下,双线圈间电场的强度会因间距变化而变化,同时探头的检测深度也会随着间距变化而变化,较大的线圈间距会减弱双线圈间的耦合但可提高检测灵敏度。涡流模式的结果与电容模式类似,增大的线圈间距提高了对同一缺陷的检测灵敏度。

线圈匝数的多少可影响电容模式下相对应的极板实际面积的大小,同时也影响涡流模式下线圈之间的耦合强度。采用如图 23 所示具有不同匝数的圆形双线圈探头,用以探究不同匝数下电容模式与涡流模式下的检测性能。

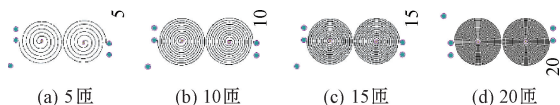


图 23 不同线圈匝数双模式探头

Fig. 23 Dual modality probes with different number of coil turns

线圈匝数影响试验结果如图 24 所示。分别提取图 24 中电容与涡流模式试验曲线中心变化率值,并绘制不同线圈匝数情况下两种模式中心变化率,如图 25 所示。

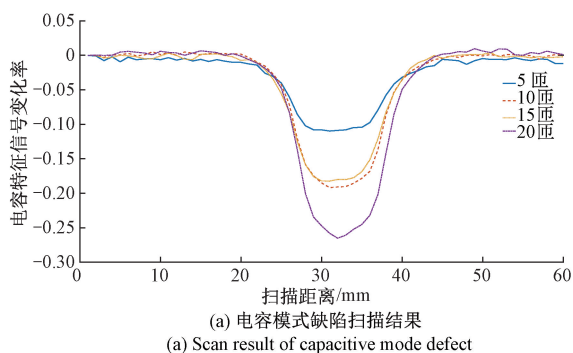


图 25 不同线圈匝数中心标准变化率

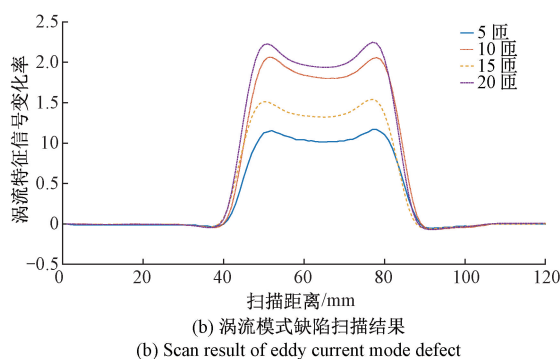


图 24 线圈匝数影响试验结果

Fig. 24 Experiment results of the influence of different number of coil turns

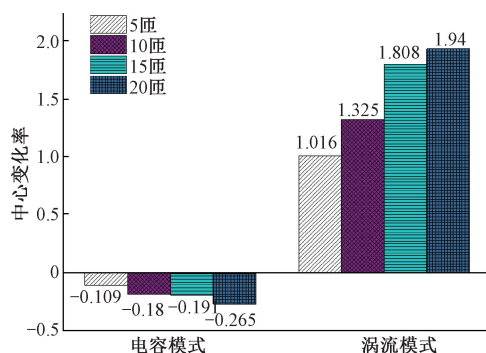


图 25 不同线圈匝数中心标准变化率

Fig. 25 Central NVRs for different number of coil turns

由图 25 可见,电容模式在 20 匝时灵敏度最高(中心变化率绝对值为 0.265),5 匝时最低(中心变化率绝对值为 0.109),这是因为线圈匝数影响了作为电容极板时的极板面积,线圈密度对应着电容极板的大小,极板越大信号强度越大,检测电场的渗透深度也越大。在涡流模式下,匝数影响双线圈的耦合强度,因此检测结果也呈现出匝数越大灵敏度越高的趋势(中心变化率绝对值由 5 匝时的 1.016 单调递增至 20 匝时的 1.94)。

4 结 论

平面线圈双模式探头将电容、涡流检测技术复合,可有效解决“绝缘-导电”混合结构全方位检测的技术难题,其双模式检测可在非接触条件下实现,一次扫描获取双模式检测信息,具有检测速度快,获取信息全面等特点。本文对双模式探头检测性能影响因素进行了分析与试验研究,为双模式检测系统性能提升与双模式探头优化设计提供了借鉴,主要结论如下:

1) 双模式探头激励信号频率的高低对于电容模式成像影响较小。但在涡流模式下,激励频率的高低会影响

涡流的渗透深度,也影响双线圈之间的耦合。因此在对不同的对象进行检测时,需选择合适的频率,在满足渗透深度的前提下可通过提高频率来获得较高的检测灵敏度。

2) 探头提离距离会影响检测特征信号变化率。在电容模式下会因提离距离增大出现特征信号变化趋势翻转现象,而涡流模式特征信号变化率具有单调递减特性。探头扫描方向与目标缺陷的相对角度会导致不同的检测结果;对于电容模式,平行扫描的变化率曲线在扫描方向上呈现了更大的扩散范围;对于涡流模式,平行扫描的变化率绝对值高于垂直扫描,且特征信号变化率呈现了不同的畸变方向。

3) 双模式探头平面线圈形状对探头检测性能有直接影响,且对两种模式的影响规律相似。相邻线圈存在尖端可以提高两种模式的检测灵敏度;两种模式下的探头灵敏度在一定范围内与线圈间距正相关;线圈匝数越多,探头在两种模式下检测的灵敏度越高。

参考文献

- [1] 代守强, 陈棣湘, 田武刚, 等. 用于热障涂层检测的柔性平面电容传感器[J]. 无损检测, 2016, 38(10): 6-9.
DAI SH Q, CHEN D X, TIAN W G, et al. Flexible planar capacitive sensor for detection of thermal barrier coatings[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(10): 6-9.
- [2] REN Y, PAN M C, CHEN D X, et al. An electromagnetic/capacitive composite sensor for testing of thermal barrier coatings [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(5): 1630.
- [3] 陈棣湘, 潘孟春, 田武刚, 等. 基于柔性电磁传感器的发动机叶片微缺陷检测 [J]. 中国测试, 2018, 44(1): 65-68.
CHEN D X, PAN M CH, TIAN W G, et al. Micro damage testing of engine blades based on flexible electromagnetic sensor[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(1): 65-68.
- [4] 代守强, 陈棣湘, 田武刚, 等. 平面电容传感器热障涂层缺陷检测系统 [J]. 中国测试, 2017, 43(1): 78-83.
DAI SH Q, CHEN D X, TIAN W G, et al. Thermal barrier coatings based on planar capacitive sensor defect detection system[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(1): 78-83.
- [5] 周卫红, 陈棣湘, 谢瑞芳. 基于柔性电磁传感器的发动机叶片微缺陷检测技术[J]. 测试技术学报, 2015, 29(3): 251-255.
ZHOU W H, CHEN D X, XIE R F, Quantitative damage testing for engine blades with flexible electromagnetic sensors [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(3): 251-255.
- [6] GRUNDY D, WASHABAUGH A, SCHLICKER D, et al. Health monitoring using MWM-array and IDED-array sensor networks [C]. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2005. DOI: 10.1117/12.606069.
- [7] LONG J, WANG B. A metamaterial-inspired sensor for combined inductive-capacitive detection [J]. Applied Physics Letters, 106(7): 074104.
- [8] 崔自强, 湛宇翔. 基于 LCR 表/阻抗分析仪的电容/电磁双模态成像测量系统:CN110186999A [P]. 2019-05-10.
CUI Z Q, CHEN Y X. A Capacitive/electromagnetic dual mode imaging system based on LCR/ impedance analyzer:CN110186999A [P]. 2019-05-10.
- [9] BEKAS D G, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI F M H. A smart multi-functional printed sensor for monitoring curing and damage of composite repair patch [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 085029.
- [10] SALAS A J R, LU M, HUANG R, et al. Accurate measurements of plate thickness with variable lift-off using a combined inductive and capacitive sensor [J]. NDT & E International, 2020, 110:102202.
- [11] GEORGE B, ZANGL H, BRETTTERKLIEBER T, et al. A combined inductive-capacitive proximity sensor for seat occupancy detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (5): 1463-1470.
- [12] KAN W, HUANG Y, ZENG X, et al. A dual-mode proximity sensor with combination of inductive and capacitive sensing units [J]. Sensor Review, 2018. DOI: 10.1108/SR-06-2017-0111.
- [13] 张洪朋, 白晨朝, 孙广涛, 等. 高通量微型多参数油液污染物检测传感器[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(9): 2236-2244.
ZHANG H P, BAI CH ZH, SUN G T, et al. High-throughput miniature multi-parameter oil contamination detection sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2236-2244.
- [14] 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.
- [15] 吴斌,杨挺,刘秀成,等. 线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响[J/OL]. 仪器仪表学报;1-9 [2020-04-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2179.th.20200520.1741.020.html>.
- WU B, YANG T, LIU X CH, et al. Influence of coil bending angle on the defect detection ability of flexible eddy current sensor[J/OL]. Chinese Journal of Scientific Instrument; 1-9 [2020-04-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2179.th.20200520.1741.020.html>.
- [16] 郭士杰,肖杰,刘今越,等. 电容阵列柔性压力传感器设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(07): 49-55.
- GUO SH J, XIAO J, LIU J Y, et al. Capacitor array flexible pressure sensor design and analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 49-55.
- [17] 赵海文,王曼菲,刘吉晓,等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 25-32.
- ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Mechanism study of flexible tactile sensor based on electrical double-layer capacitor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 25-32.
- [18] 李满宏,王经天,吴玉,等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 233-243.
- LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 233-243.

作者简介



殷晓康

E-mail: xiaokang.yin@upc.edu.cn

殷晓康(通信作者),2005年于华东理工大学获得学士学位,2007年和2011年于英国华威大学分别获得硕士学位和博士学位,现为中国石油大学(华东)副教授,主要研究方向为电磁无损检测技术与结构健康监测技术。

Yin Xiaokang (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2005 from East China University of Science and Technology, received his M.Sc. degree in 2007 and Ph.D. degree in 2011 both from The University of Warwick, UK, respectively. Now, he is an associate professor at China University of Petroleum (East China). His main research interests include electromagnetic NDE and SHM techniques.