

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005984

线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响*

吴斌, 杨挺, 刘秀成, 何存富

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要:采用有限元仿真和实验方法分析了圆形线圈处于不同弯曲角度时,柔性涡流传感器对模拟裂纹缺陷方向角及深度的检测能力变化规律。结果表明:圆形线圈弯曲导致各向均匀涡流场朝单向涡流场转变,无论是工作于自感还是互感检测模式下,柔性涡流传感器对不同方向裂纹缺陷的检测灵敏度均降低。对于90°裂纹,当线圈弯曲角度为30°时,自感和互感模式的检测灵敏度分别下降约7%和45%。线圈弯曲导致传感器对裂纹方向、深度的识别能力随线圈弯曲角度增大而单调下降。相比自感模式,互感模式下柔性涡流传感器对裂纹方向及深度的识别能力更佳。线圈与曲面贴合造成的弯曲对传感器性能的影响不可忽略,在设计柔性涡流传感器时应合理选择弯曲角度范围。

关键词: 涡流检测; 柔性线圈; 弯曲角度; 缺陷检测能力

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Influence of coil bending angle on the defect detection ability of flexible eddy current sensor

Wu Bin, Yang Ting, Liu Xiucheng, He Cunfu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Finite element simulation and experiment methods are employed to analyze the detection ability of flexible eddy current sensor for detecting the orientation angle and depth of a simulated crack defect when the circular coil is in different bending angles. The obtained results show that the bending of the circular coil leads the isotropic eddy current field to change to unidirectional eddy current field. No matter the flexible eddy current sensor works under self-induction mode or mutual-induction mode, the sensitivity of the flexible eddy current sensor to the crack faults with different orientation angles decreases. For instance, when the bending angle of the coil is 30°, the sensitivity of the flexible eddy current sensor to the crack with an orientation angle of 90° in self- and mutual induction modes reduces by 7% and 45%, respectively. In addition, the coil bending causes that the recognition ability of the flexible eddy current sensor to the crack orientation angle and depth monotonously decreases as the bending angle of the coil increases. Under mutual-induction mode the flexible eddy current sensor achieves better recognition ability to crack orientation angle and depth compared with the case under the self-induction mode. The influence of the coil bending occurred in the shape matching between the coil and curved surface on the performance of the sensor can not be ignored. A reasonable coil bending angle range should be selected when designing the flexible eddy current sensor.

Keywords: eddy current testing; flexible coil; bending angle; defect detection ability

0 引言

齿轮、汽轮机叶片等关键零部件在制造和服役过程中均需要进行无损探伤。作为五大常规无损技术之一的

涡流方法,因具有响应速度快、无需接触和耦合剂等优点,已广泛应用于金属构件的损伤检测^[1-4]。常规的涡流传感器一般由磁芯和硬质的电感线圈构成,进行封装后不具备柔性,无法适应齿轮齿底、汽轮机叶片根部的复杂曲面,在实际应用中存在局限性。柔性涡流传感器的研

收稿日期:2020-01-05 Received Date:2020-01-05

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0809000)项目资助

制^[5-6],是解决这一问题的主要途径。国内,于霞等^[7]从平面线圈阵列入手,结合柔性基底研制了嵌入式柔性涡流传感器。Xie等^[8]通过在聚酰亚胺薄膜上蚀刻一个周期矩形激励线圈和多个感应线圈,形成柔性涡流阵列传感器,并配套提出了基于仿真的归一化裂纹信号拟合算法,实现了疲劳裂纹长度的定量检测。法国原子能总署^[9-10]则将柔性涡流阵列电路板卷曲包覆于橡胶导轮,与曲面保持良好接触进行损伤检测。

柔性电路的采用,一方面使得涡流传感器具备了一定的柔性,能够适度弯曲并与曲面贴合,或以点、线接触方式对曲面进行裂纹扫查^[11]。另一方面,随着柔性电路的弯曲,内部的激励和接收线圈均会产生几何形变而成为空间三维线圈,不同位置的导线与待测表面的提离距离存在差异,直接影响传感器在材料表面激发的涡流场分布和线圈对裂纹引起的局部磁场畸变的检测能力。胡颖等^[12]基于轴对称时谐电磁场理论,建立了自感线圈弯曲成球壳后对导电球体表面测量的数学模型,得到了线圈匝数、几何尺寸和频率对线圈自感及阻抗的影响规律。这一研究为柔性线圈理论建模提供了强有力的基础。

对于形状更为复杂的弯曲线圈以及互感式涡流检测线圈,理论精确建模困难。因此,本文提出利用三维有限元仿真手段,建立平面螺旋线圈弯曲后形成的自感和互感式两种柔性涡流传感器模型,定量研究线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响规律。通过缺陷检测实验验证有限元仿真所得结论,为柔性涡流阵列传感器的优化及空间布局提供参考设计方法。

1 有限元仿真分析

1.1 仿真模型

完全柔性的涡流传感器线圈可以沿任意的角度弯曲,但对于常用的以聚酰亚胺薄膜作为基底的印刷线圈电路,因聚酰亚胺薄膜材料刚度和厚度的限制而更易于在单方向进行弯曲。如图1所示,单方向弯曲后的印刷线圈电路板以窄条(近似线接触)形式与待测曲面接触。

本文主要研究平面圆形螺旋线圈的弯曲问题,包括自感式和互感式两种涡流检测模式。对于给定的平面线圈,选定其两条相互垂直的直径 D_b 和 D_p ,保持直径 D_b 与原平面的位置不变, D_b 两侧线圈沿 D_p 方向对称弯曲后形成图1中放大图中所示的线圈形状。定义弧线 D_p 任一端点处切线与原平面的角度为线圈弯曲角度 θ 。随着弯曲角度 θ 的增大,线圈中导线与试件表面的提离距离增加。若线圈用于涡流激励,则耦合至试件内部的磁场强度下降,形成的涡流密度降低;当线圈用于检测涡流

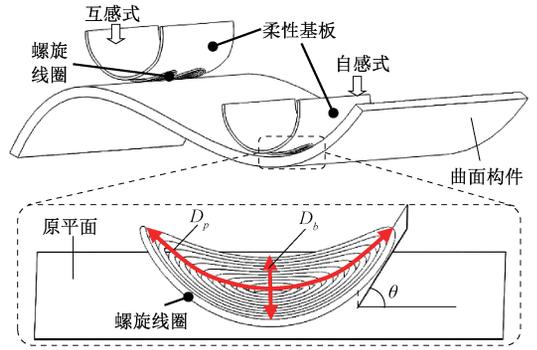


图1 弯曲的涡流检测线圈

Fig.1 Schematic diagram of curved eddy current detection coil

场变化时,提离距离增加会降低对磁场的检测灵敏度^[13-14]。

在 COMSOL 软件的交变磁场仿真模块中,先后建立图2所示的自感和互感式涡流检测有限元模型^[15],仿真分析弯曲角度 θ 对涡流传感器缺陷检测能力的影响程度。

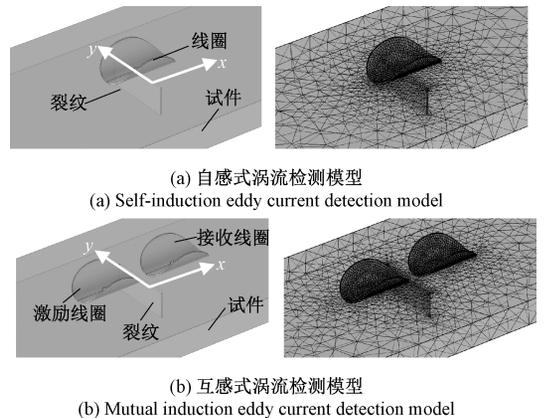


图2 几何模型和网格划分结果

Fig.2 Geometric models and grid meshing results

被测试件的外观尺寸为:长 20 mm、宽 10 mm 和高 2 mm,材料设置为铝(相对磁导率 $\mu_r = 1$,电导率 $\sigma = 3.774 \times 10^7$ S/m)。线圈的几何模型经 SolidWorks 软件建模后再导入 COMSOL 软件。不同弯曲程度的线圈均由高度 0.1 mm、内径 0.3 mm、外径 5.0 mm 的平面线圈经特征弯曲操作而形成。平面线圈下表面的几何中心与试件表面的提离距离为 0.1 mm。线圈的材质设置为铜($\mu_r = 1, \sigma = 5.998 \times 10^7$ S/m)。在图2(a)左图所示的 y 轴方向上,试件表面设置了一开口型长槽(长 5 mm,宽 0.1 mm,深 2 mm)模拟裂纹缺陷,其长度方向的中点位于线圈中心正下方。在图2(b)中,激励与接收线圈的中心距为 6 mm,裂纹长度方向的中点位于激励、接收线圈几何中心连线中点的正下方。

图 2 (a) 所示的线圈和图 2 (b) 所示的激励线圈均采用均匀多匝模型, 通入 0.2 A 的激励电流。模型整体采用自由四面体网格进行划分。在自感式涡流检测模型中, 线圈和模拟裂纹部分进行了精细划分; 在互感式涡流检测模型中, 激励与接收线圈、缺陷区域进行了精细网格划分, 最小网格尺寸达到 0.2 mm。模型其他区域的最小网格尺寸为 0.4 mm。

1.2 仿真结果

1) 自感式涡流检测

图 3 (a) 所示为平面 ($\theta=0^\circ$) 通电线圈在无缺陷试件中形成的涡流场仿真结果。圆形线圈的中心对称性决定了各方向涡流密度趋于均匀, 预示着平面线圈对不同方向裂纹的检测灵敏度是一致的。固定裂纹长度与图 2 中 x 轴的夹角 $\beta=90^\circ$, 仿真分析了线圈弯曲角度 θ 对涡流场分布的影响。图 3 (b) ~ (d) 所示分别为 $\theta=30^\circ, 60^\circ$ 和 90° 时裂纹周边的涡流场仿真结果。随着线圈弯曲角度增大, 沿线圈弯曲方向的导线提离不断增加导致下方的涡流密度逐渐减弱, 使得各向均匀的涡流场逐步转变为椭圆分布形式, 也即涡流场逐渐呈现单向特性。这一变化将导致涡流线圈对不同方向裂纹的检测灵敏度存在差异。

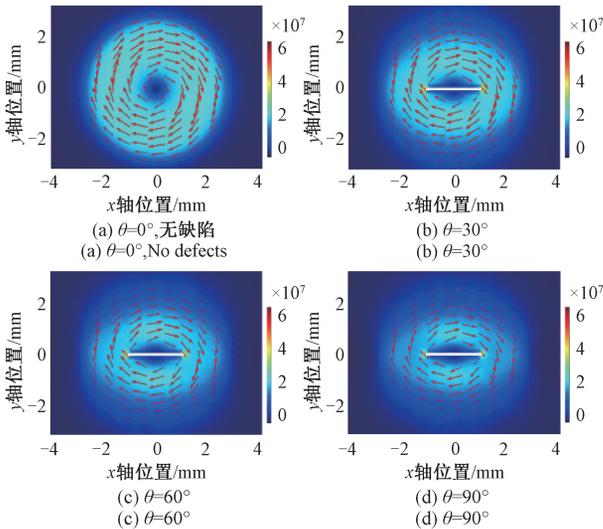


图 3 弯曲角度不同时的涡流场分布仿真结果

Fig.3 Simulation results of eddy current field distribution for different bending angles

为了定量分析线圈弯曲角度对裂纹检测能力的影响, 提取裂纹中心位置处的磁通密度模, 其相对无缺陷试件中提取结果的相对变化率 γ 作为涡流传感器的缺陷检测灵敏度。线圈弯曲角度 θ 和裂纹角度 β 发生变化时传感器的缺陷检测灵敏度的分析统计结果如图 4 所示。当线圈弯曲角度 $\theta=0^\circ$ 时, 传感器对不同方向裂纹的检测灵敏度基本一致, 这主要由平面线圈形成涡流场的中心对

称性决定。当线圈弯曲角度增加至 $\theta=30^\circ$ 时, 试件中形成的涡流场密度减弱并逐渐显现出弱单向特性, 导致传感器的检测灵敏度有所下降, 并对不同方向裂纹的检测灵敏度存在差异; 当 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时, 线圈激发的涡流场更趋于单向 (平行 x 轴), 对偏移 x 轴方向的裂纹的检测灵敏度进一步下降。

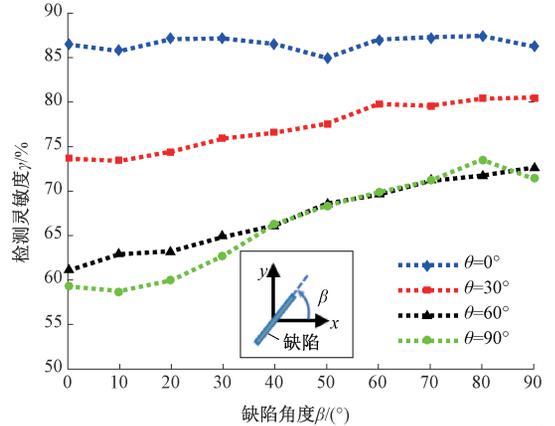


图 4 不同角度裂纹缺陷的检测灵敏度分析结果

Fig.4 The analysis result of detection sensitivity for the crack defects with different orientation angles

总体来看, 线圈弯曲后形成的涡流场主要沿 x 方向, 对于垂直 x 方向的裂纹 ($\beta=90^\circ$) 检测灵敏度最高。随着裂纹方向从垂直 x 轴 ($\beta=90^\circ$) 偏转至平行 x 轴 ($\beta=0^\circ$) 过程中, 检测灵敏度 γ 不断降低, 且下降幅度与线圈弯曲角度呈正相关, 例如线圈弯曲角度分别为 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时, 相应的灵敏度下降约 7% 和 12%。

2) 互感式涡流检测

无裂纹和裂纹角度固定为 $\beta=0^\circ$ 两种情况下, 线圈弯曲角度对接收线圈感应电压的影响如图 5 所示。以 V_d 和 V_h 分别表示有、无裂纹缺陷时接收线圈的感应电压, 利用增量 ($V_d - V_h$) 为灵敏度指标, 分析互感式线圈对不同方向裂纹检测能力的影响。

接收线圈的输出电压主要由互感效应引起。在无裂纹试件中, 线圈弯曲导致线圈本身尺寸、两线圈回路的相对几何位置均发生变化, 导致激励与接收线圈间的互感效应加剧, 接收线圈输出电压随线圈弯曲角度增大而升高。裂纹的存在会部分切断互感路径, 导致互感回路介质磁导率大幅减小, 互感系数随线圈弯曲角度增大而降低, 导致感应电压输出幅值持续下降。从图 5 可以看出, 随着弯曲角度的增加, 互感式涡流传感器对平行互感路径的裂纹 ($\beta=0^\circ$) 检测灵敏度呈现快速下降趋势。

不同弯曲角度情况下, 互感式涡流传感器对不同角度缺陷的检测灵敏度如图 6 所示。当裂纹方向平行互感路径 ($\beta=0^\circ$) 时, 检测灵敏度最高; 对于垂直互感路径

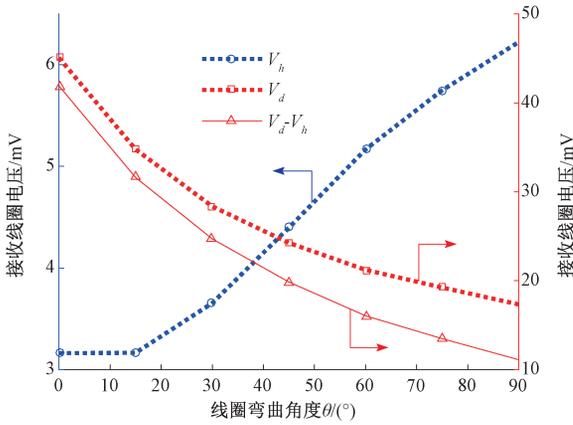


图5 线圈弯曲角度对接收线圈输出电压的影响

Fig.5 Influence of coil bending angle on the output voltage of the receiving coil

($\beta=90^{\circ}$)的裂纹的检测灵敏度最低。这与图4中针对自感模式分析得到的结论相反。随着线圈弯曲角度的增大,传感器对所有方向裂纹的检测灵敏度均降低。相比无弯曲状态,当线圈弯曲至 $\theta=30^{\circ}$ 时,对 $\beta=0^{\circ}$ 和 $\beta=90^{\circ}$ 裂纹的检测灵敏度分别下降了约45%和95%。

线圈外径5.0 mm、内径0.3 mm,中心距与有限元模型中保持一致为6 mm。实验测试过程中,激励信号参数始终保持不变,频率和幅值分别为2 MHz和5 V。先采用其中的1个线圈作为自感式涡流传感器,再将两个线圈构成互感式涡流传感器,分别进行裂纹检测。共制备了两块缺陷试件,试件的尺寸如图8所示。

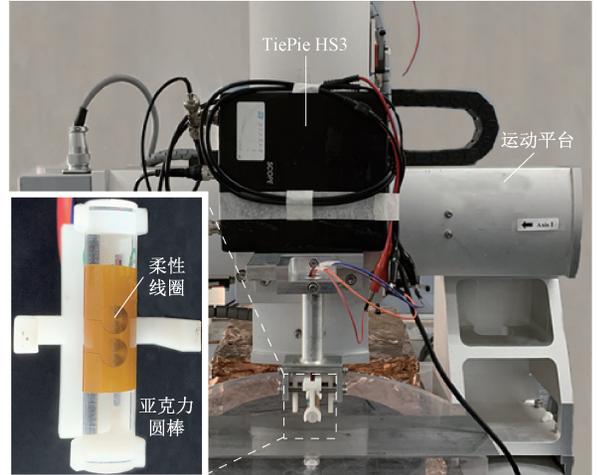


图7 涡流检测实验系统

Fig.7 Eddy current detection experiment system

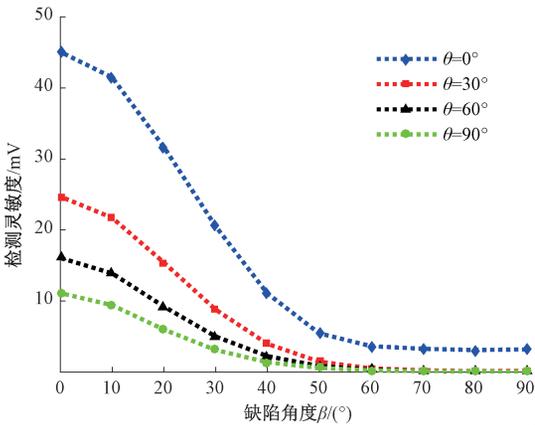


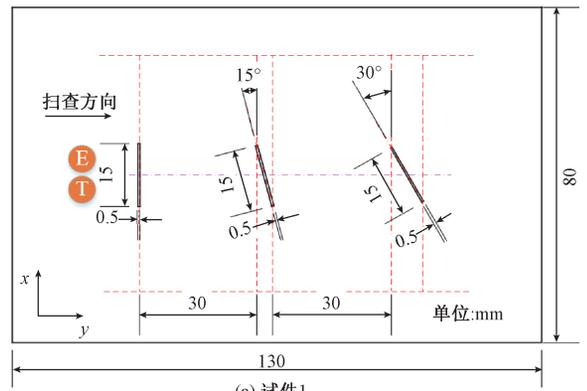
图6 传感器对不同角度裂纹缺陷的检测能力

Fig.6 Detection ability of the sensor for the crack defects with different orientation angles

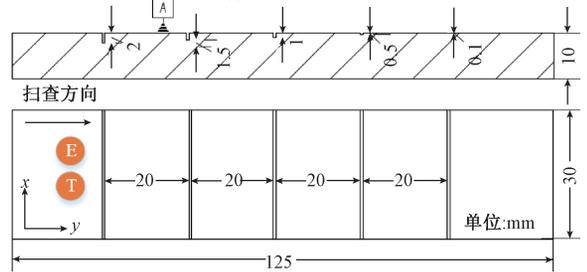
2 实验验证与结果分析

2.1 实验装置

为验证上述有限元分析所得结论,构建如图7所示的涡流检测实验系统。利用TiePie HS3型板卡作为激励源和信号采集器,四轴运动平台用于搭载柔性涡流线圈沿待测试件进行直线扫描。整套实验系统由上位机中的LabVIEW程序进行控制。制备的柔性电路中共印制有2个参数一致的线圈,单个线圈中共包含25匝铜质导线。



(a) 试件1
(a) Sample 1



(b) 试件2
(b) Sample 2

图8 缺陷试件尺寸

Fig.8 Dimensions of the samples with defects

试件1中包含3个长15 mm、宽0.5 mm、深2 mm的

裂纹缺陷,裂纹长度方向与 x 轴的夹角分别为 $\beta=0^\circ$, $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 。试件 2 中包含宽 0.1 mm、长 30 mm 但深度分别为 $h=0.1、0.5、1.0、1.5、2.0$ mm 的 5 个模拟裂纹缺陷。将柔性电路先后卷曲并粘贴固定在外径分别为 3、4、7、10 mm 的亚克力圆棒表面,以调整线圈的弯曲角度分别为 $\theta=30^\circ、50^\circ、70^\circ、90^\circ$ 。利用感应信号与激励信号的幅值比 A_r 作为表征参量,对模拟裂纹缺陷方向或深度进行表征。

2.2 结果分析与讨论

首先,在不同线圈弯曲角度条件下,先后使用自感和互感两种检测模式对试件 1 中 3 个不同方向的模拟裂纹缺陷进行检测,典型的扫查结果如图 9 所示。当裂纹角度 β 从 0° 增加至 30° 过程中,自感模式检测的缺陷信号幅值逐渐降低,而互感模式检测规律恰好相反。对于固定方向的裂纹,随着线圈弯曲角度增加,缺陷信号幅值均呈现单调下降趋势。上述规律与图 4 和 6 有限元仿真结果显示的规律相符。

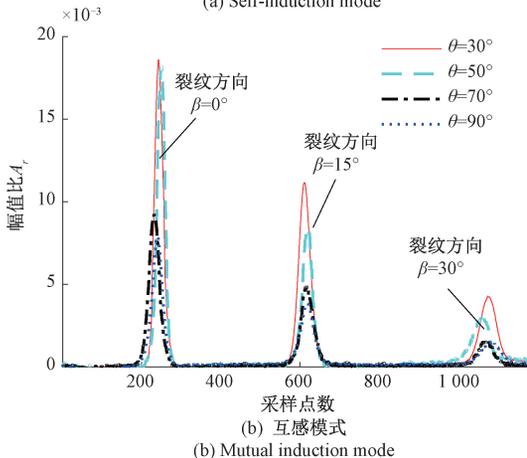
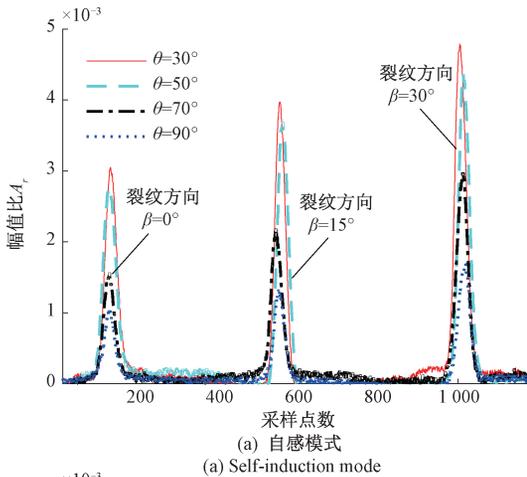


图 9 不同角度裂纹缺陷的实验检测信号
Fig.9 Experiment detection signals for the crack defects with different orientation angles

其次,使传感器先后工作于自感和互感检测模式,对试件 2 中 5 个不同深度的模拟裂纹缺陷进行检测,扫查结果如图 10 所示。

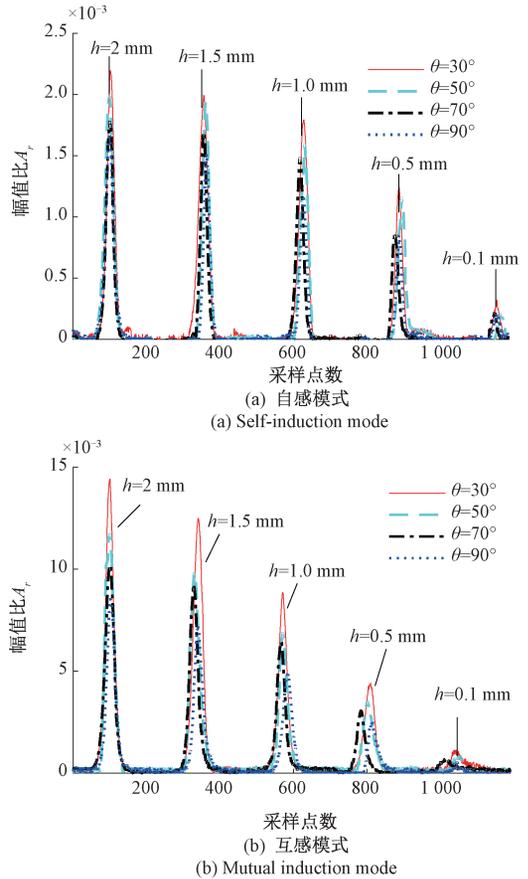


图 10 不同深度裂纹缺陷实验检测信号
Fig.10 Experiment detection signals for the crack defects with different depths

无论是自感还是互感模式,涡流传感器检测的缺陷信号幅值均随裂纹深度增大而单调上升,但上升速率与传感器的线圈弯曲角度有关。为定量分析线圈弯曲角度对传感器的缺陷检测能力的影响,从图 9 和 10 所示结果中提取出缺陷处的信号峰值,分别绘制如图 11 和 12 所示。

从图 11 所示结果可以看出,信号峰值与模拟裂纹角度间存在良好的线性关系。将信号峰值与裂纹角度的拟合直线的斜率 K_a 用于评价传感器对裂纹方向识别能力。当 K_a 取值越大,则传感器对裂纹方向变化的识别能力越好;当 K_a 取值越小,则传感器对不同角度裂纹的检测能力趋于一致。利用同样的信号处理方法,分析信号峰值随模拟裂纹深度变化的实验数据,以拟合直线斜率 K_d 描述传感器对裂纹深度的识别能力。最终统计得到的自感和互感模式下涡流传感器的 K_a 和 K_d 值如表 1 所示。

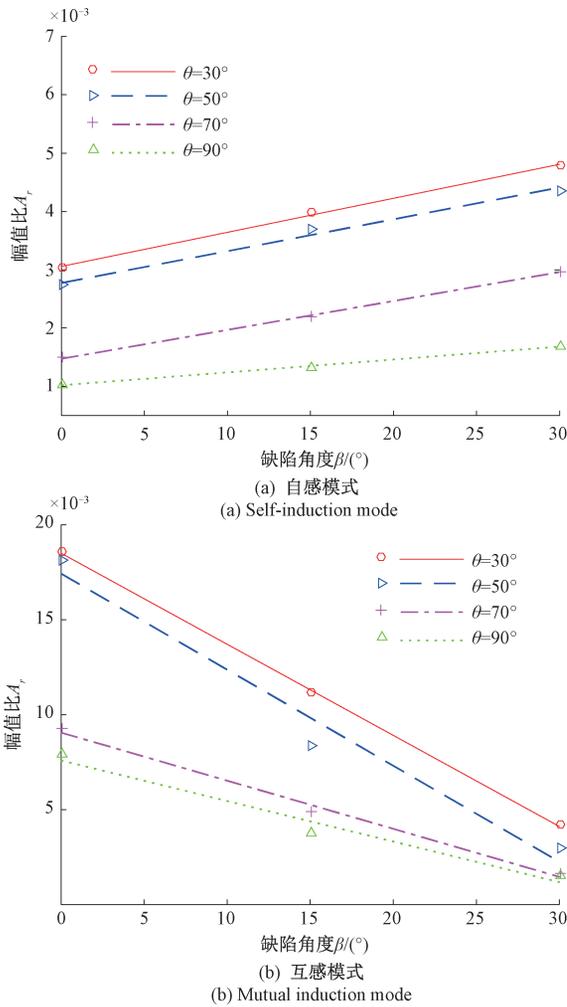


图 11 线圈弯曲角度对裂纹缺陷角度检测能力的影响
Fig.11 Influence of coil bending angle on crack defect orientation angle detection ability

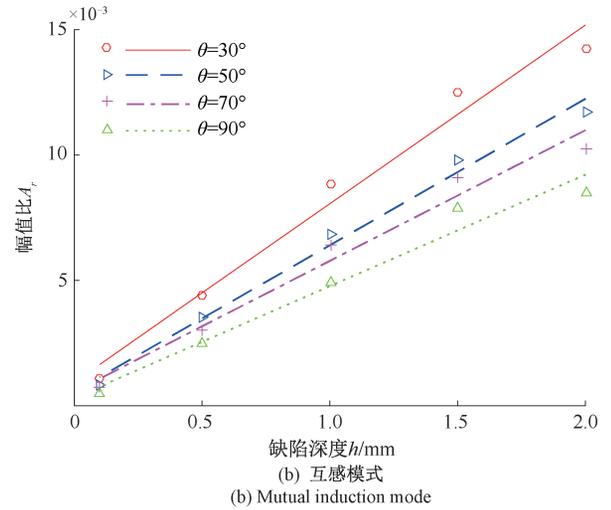
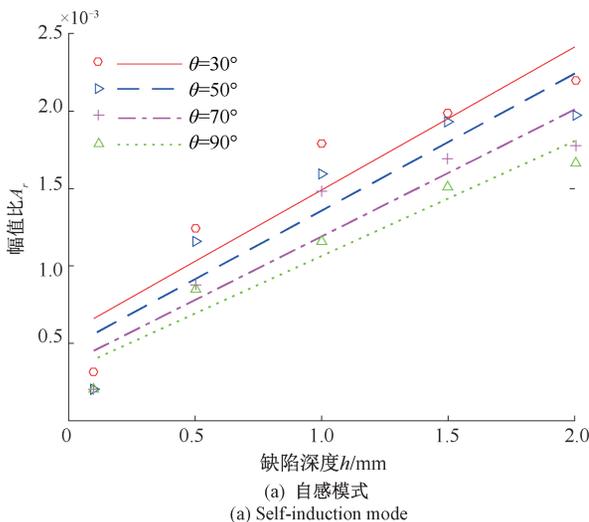


图 12 线圈弯曲角度对裂纹缺陷深度检测能力的影响
Fig.12 Influence of coil bending angle on crack defect depth detection ability

表 1 传感器裂纹缺陷检测能力评价指标统计结果
Table 1 Statistic result of the crack defect detection ability index of the sensor

弯曲角度 $\theta / (^{\circ})$	K_a		K_d	
	自感式 ($\times 10^{-5} / (^{\circ})$)	互感式 ($10^{-5} / (^{\circ})$)	自感式 ($10^{-4} / \text{mm}$)	互感式 ($10^{-4} / \text{mm}$)
30	5.8	-48	9.2	71
50	5.5	-51	8.8	58
70	4.9	-25	8.2	52
90	2.2	-21	7.4	44

对比可以看出：

1) 在测试的线圈弯曲角度范围内,相比自感模式,互感检测模式下的 K_a 和 K_d 值均高一个量级,也即传感器工作于互感模式时,对裂纹缺陷的方向及深度识别能力更佳。

2) 对于两种涡流检测模式, K_a 和 K_d 值均随线圈弯曲角度增大而减小,预示着线圈弯曲会导致传感器对裂纹方向、深度变化的检测灵敏度下降。

3) 线圈弯曲导致涡流场由各向均匀转变为具有单向特性,通过对比 $\theta = 30^{\circ}$ 、 $\theta = 90^{\circ}$ 时 K_a 和 K_d 值的变化程度,可以发现:对于自感和互感检测模式,线圈弯曲造成的传感器裂纹方向识别能力劣化程度要高于对裂纹深度识别能力的影响。

3 结 论

结合三维有限元仿真和实验测试方法,定量分析了

平面螺旋线圈弯曲角度对柔性涡流传感器裂纹缺陷检测能力的影响规律,具体结论如下:

1) 线圈弯曲将导致柔性涡流传感器(无论自感还是互感检测模式)的缺陷检测与识别能力下降,且下降幅度与线圈弯曲角度呈正相关。

2) 平面螺旋线圈弯曲后形成的柔性涡流传感器工作于互感模式时,对裂纹方向及深度的识别能力优于自感模式。

3) 实验结果验证了柔性涡流传感器三维有限元建模方法的准确性,可以借鉴用于分析线圈与曲面贴合造成的弯曲对传感器性能的影响,指导柔性涡流传感器的设计及实际应用。

参考文献

[1] 周德强,田贵云,尤丽华,等.基于频谱分析的脉冲涡流缺陷检测研究[J].仪器仪表学报,2011,32(9):1948-1953.

ZHOU D Q, TIAN G Y, YOU L H, et al. Study on pulsed eddy current defect signal detection technology based on spectrum analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 1948-1953.

[2] 曹青松,刘丹,周继惠,等.一种钢丝绳断丝无损定量检测方法[J].仪器仪表学报,2011,32(4):787-794.

CAO Q S, LIU D, ZHOU J H, et al. Non-destructive and quantitative detection method for broken wire rope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 787-794.

[3] 周德强,潘萌,常祥,等.铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测模式研究[J].仪器仪表学报,2017,38(6):1498-1505.

ZHOU D Q, PAN M, CHANG X, et al. Research on detection modes of ferromagnetic component defects using pulsed eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1498-1505.

[4] LI Y, UDPA L, UDPA S S. Three-dimensional defect reconstruction from eddy-current NDE signals using a genetic local search algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2004, 40(2): 410-417.

[5] MACHADO M A, ROSADO L, PEDROSA N, et al. Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER[J]. NDT & E international, 2017, 87:111-118.

[6] 肖春燕.柔性探头涡流检测复杂曲面结构缺陷的研究[J].微计算机应用,2011,32(9):29-32.

XIAO CH Y. Eddy current testing for flaws in the

complex curved structure by a flexible probe [J]. Microcomputer Applications, 2011, 32(9):29-32.

[7] 于霞,张卫民,邱忠超,等.飞机发动机叶片缺陷的差激励涡流传感器检测[J].北京航空航天大学学报,2015,41(9):1582-1588.

YU X, ZHANG W M, QIU ZH CH, et al. Differential excitation eddy current sensor testing for aircraft engine blades defect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1582-1588.

[8] XIE R, CHEN D, PAN M, et al. Fatigue crack length sizing using a novel flexible eddy current sensor array[J]. Sensors, 2015, 15(12): 32138-32151.

[9] GILLES-PASCAUD C, DECITRE J M, VACHER F, et al. Eddy current flexible probes for complex geometries[C]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820(1): 399-406.

[10] MARCHAND B, DECITRE J M, CASULA O. Flexible and array eddy current probes for fast inspection of complex parts[C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1211(1): 385-392.

[11] CHEN X L, DING T H. Flexible eddy current sensor array for proximity sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(1): 126-130.

[12] 胡颖,丁天怀,王鹏.曲面柔性线圈涡流效应的特性[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(10):1429-1433.

HU Y, DING T H, WANG P. Characteristics of eddy current effects in curved flexible coils [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(10): 1429-1433.

[13] 孙振国,蔡栋,李东,等.车轮辐板裂纹涡流检测探头的提高抑制研究[J].机电工程,2015,32(11):1423-1427.

SUN ZH G, CAI D, LI D, et al. Suppressing lift-off effect in eddy current testing on the plate cracks in a wagon wheel [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2015, 32(11): 1423-1427.

[14] 杜金强,何宇廷,李培源.矩形柔性涡流阵列传感器裂纹检测研究[J].传感器与微系统,2014,33(5):17-19,22.

DU J Q, HE Y T, LI P Y. Research on crack inspecting of rectangular flexible eddy current array sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(5): 17-19,22.

[15] 刘平政,宋凯,宁宁,等.飞机紧固件孔周裂纹检测

远场涡流传感器设计及优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6):1-8.

LIU P ZH, SONG K, NING N, et al. Design and optimization of remote field eddy current sensor for crack detection around the hole of aircraft fasteners [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 1-8.

作者简介



吴斌, 1984 年于天津大学获得学士学位, 1990 年于北京航空航天大学获得工学硕士学位, 1996 年于太原工业大学获得工学博士学位。现为北京工业大学机电学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为无损检测技术与仪器。

E-mail: wb@bjut.edu.cn

Wu Bin received his B. Sc. degree in 1984 from Tianjin University, M. Sc. degree in 1990 from Beihang University and Ph. D. degree in 1996 from Taiyuan University of Technology. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in College of ME, Beijing University of Technology. His main research interests include nondestructive testing technology and instrument.



杨挺, 2016 年于江苏大学获得学士学位, 现为北京工业大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测技术与仪器。

E-mail: iyt2017@emails.bjut.edu.cn

Yang Ting received his B. Sc. degree in 2016 from Jiangsu University; now, he is a master student in Beijing University of Technology. His main research interest includes nondestructive testing technology and instrument.



刘秀成 (通信作者), 2007 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2013 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学机电学院教授, 主要研究方向为无损检测技术与仪器。

E-mail: xiuchliu@bjut.edu.cn

Liu Xiucheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2007 from Beihang University and Ph. D. degree in 2013 from Beijing University of Technology. Now, he is a professor in College of ME, Beijing University of Technology. His main research interest includes nondestructive testing technology and instrument.