

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314828

基于单谐振结构的金属裂纹 CRFID 传感器设计^{*}

王帅 孙姗 薛严冰 宋智

(大连交通大学自动化与电气工程学院 大连 116028)

摘要: 为实现单结构谐振器对金属裂纹参数的无损检测,设计了一款同时检测裂纹宽度及方向的无芯片射频识别(CRFID)金属裂纹传感器。将圆形、切角矩形谐振器一体化设计,利用HFSS有限元分析软件对传感器进行结构优化与性能仿真。深层次探究了不同裂纹缺陷下传感器雷达散射截面(RCS)的响应特征。结果表明金属结构的裂纹方向和裂纹宽度可以通过传感器谐振频率的变化进行识别。双极化下 RCS 幅频特性的频偏方向对应裂纹的方向,而频偏量与裂纹宽度成正比。设计的 CRFID 传感器能够检测 0°水平方向、90°竖直方向、45°或 135°斜向等三类方向下的亚毫米宽度裂纹,其中裂纹宽度检测灵敏度最高可达 43.5 MHz/0.1 mm。

关键词: 金属裂纹;无损检测;CRFID 传感器;裂纹方向;裂纹宽度

中图分类号: TN98; P225.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Design of metal crack CRFID sensor based on single resonant structure

Wang Shuai Sun Shan Xue Yanbing Song Zhi

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: A Chip-less Radio Frequency Identification (CRFID) metal crack sensor with a single resonant structure is proposed to simultaneously detect crack width and direction. The circular and the rectangle with tangent corners resonators are integrated into the design, and the electromagnetic simulation software HFSS is utilized to optimize the structure and simulate the performance of the sensor. The response characteristics of Radar Cross Section (RCS) of the sensor under different defect cracks are studied systematically. It is found that frequency shift is proportional to the crack width. The results show that the crack direction and crack width on the metal structure can be identified by the change of the resonant frequency of the sensor. The frequency shift direction in RCS amplitude-frequency characteristics in the two polarization directions correspond to the direction of the crack, and the resonant frequency shift is proportional to the crack width. The CRFID sensor can detect cracks in submillimeter width in three directions: 0°(horizontal), 90°(vertical), 45° or 135°(oblique), among which the crack detection sensitivity can reach up to 43.5 MHz/0.1 mm.

Keywords: metal crack; non-destructive testing; CRFID sensor; crack direction; crack width

0 引言

结构健康监测(structural health monitoring, SHM)集传感器技术和物联网技术于一身,是实现民用基础设施结构自动检测损伤的有效途径^[1]。对于服役过程中的工程设备,如果没有 SHM 系统,将无法监测循环载荷对设施结构造成的渐进式影响,一旦形成裂纹使得设备结构应力极限降低,这将引发设备故障、发生危险事件^[2]。因此,有效利用 SHM 对基础设施进行监测,尤其是针对金属结构的裂纹监测,是降低设备维护成本、延长使用寿命、改善公共安全的至关重要手段^[3]。

金属裂纹检测通常采用无损检测技术,例如具有较高灵敏度和可靠性的超声波检测、涡流检测和微波波导检测等^[4-7]。但是这些检查方法成本高、周期长,不适合进行定期检测。为实现金属裂纹低成本、实时、非接触检测的目标,无芯片射频识别(chipless radio frequency identification, CRFID)已成为裂纹检测的新方法^[8]。与有芯片射频识别技术相比,CRFID 在成本、传感能力以及在恶劣环境下工作的能力方面具有显著优势^[9],且 CRFID 传感技术具备多参数检测能力。

近年来,研究者在金属裂纹检测方面有诸多成果,研究

收稿日期:2023-10-25

* 基金项目:辽宁省科技厅应用基础研究项目(2022JH2/101300267)资助

主要集中在传感器的谐振结构设计上。Caizzone 等^[10]将一对传感器标签放置在裂缝两侧, 使用相位作为传感参数检测裂纹宽度, 理论上可以达到 0.1 mm 的检测分辨率, 但实际的分辨率容易受阅读器与传感器之间的距离影响, 并且无法进行裂纹方向的检测。Marindra 等^[11]将圆形微带贴片天线作为检测裂纹传感器。当裂纹宽度在 0.6 mm 以上时, 传感器可识别 0°、90°、135° 裂纹方向, 但对于裂纹宽度的检测灵敏度较低。为提高裂纹方向与宽度的检测精度, Marindra 等^[12]重新设计了由交叉对角偶极子贴片和 L 形贴片组成的传感器, 在 2~6 GHz 频段内产生 6 个共振峰, 利用主成分分析法来识别不同宽度和方向的金属裂纹。Nouri 等^[13]则针对亚毫米级宽度的裂纹提出了三频带 CRFID 传感器, 实现了对 0°、60°、90° 的裂纹方向的检测, 裂纹宽度分辨率为 0.2 mm。董和磊等^[14]将矩形贴片的长和宽拆解成水平和垂直分量, 利用两频带检测裂纹的方向及宽度, 采用高温陶瓷基板传感器识别了 0°、45°、90° 等 3 个方向的裂纹, 但灵敏度仍然较低。李珊珊等^[15]设计了一种四频带双极化无芯片 RFID 传感器, 传感器为圆盘和双模圆盘贴片谐振器空间排布结构, 在 X 极化和 Y 极化方向激励下, 分别产生两组四位谐振, 可进行 0°、45°、90°、135° 方向裂纹的检测, 分辨率可达亚毫米级。但此种设计受限于需要复杂的贴片组合来实现金属裂纹的方向和宽度检测, 结构复杂、加工难度大。

综上所述, 以往相关研究工作表明, 多参数裂纹特征检测通常采用多个谐振器的组合来实现, 贴片结构复杂, 传感器加工工艺繁琐。并且在无线无源非理想化的实际工作环境中, 由于多谐振器结构间发生的电磁耦合现象会降低传感器多参数检测的能力, 从而导致传感器的可靠性降低^[16]。因此, 仅用单谐振结构实现金属裂纹多参数检测的传感器具有研究价值。本文设计了一款基于频率特征的 CRFID 传感器, 并应用于金属裂纹的识别和检测, 采用单一谐振结构实现了金属裂纹在 0°、90°、45°、135° 方向的识别, 且在各方向上实现了亚毫米级别的裂纹宽度检测。

1 金属裂纹 CRFID 传感器结构设计

1.1 CRFID 金属裂纹检测原理

金属裂纹 CRFID 传感检测系统的工作原理如图 1 所示。传感器被安装在待测的金属板上, 向其施加平面波激励

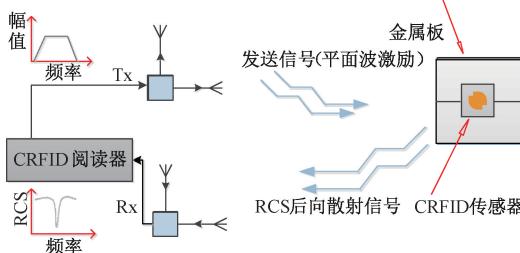


图 1 金属裂纹传感器工作原理

励信号, 入射的电磁波使传感器和被监测的金属结构产生后向散射信号。

由于待测的金属板直接被视为传感器的接地面, 因此金属板上的不同裂纹缺陷可以直接受到后向散射信号中, 使得阅读器接收到的雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 信号各异。对接收到的后向散射信号分析处理后, 可以根据频偏和振峰个数变化等特性判断金属裂纹方向及宽度等参数, 进行实时结构健康监测。

1.2 CRFID 传感器结构设计

与已有的金属裂纹 CRFID 传感器结构类似, 本文设计的传感器亦采用微带贴片作为基础结构^[17-18], 传感器由介质基板和顶层贴片两部分组成, 底层待测金属视作微带贴片天线中的接地板^[19]。由于影响传感器检测性能的主要因素是贴片谐振器结构, 因此本文对贴片谐振器的结构进行设计与改进。

设计的难点在于如何利用单个贴片谐振器实现金属裂纹宽度的高灵敏度检测, 同时还要兼顾裂纹方向的检测识别。考虑到圆形谐振器具有全方向检测金属裂纹的潜力, 选择圆形结构为基本结构^[11], 与两个方形结构组合交叠后, 经过中心对称式切角处理, 形成类似切角叶片形的拓扑结构, 如图 2 所示。新设计的贴片谐振器, 通过仿真优化贴片尺寸及切角大小, 改变传感器的传输线模式^[20-21], 使得 TM 模和 TN 模相同, 即引入了简并模式, 从而实现圆极化, 使设计的拓扑结构在提高检测灵敏度的同时, 还保留了圆形贴片所具有的全方向金属裂纹检测的优势。

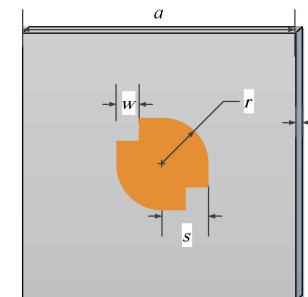


图 2 传感器结构图

初步设计中, 使传感器的工作频率 $f_c = 4.0$ GHz。由于圆形贴片具有边缘效应, 其有效半径 r_e 可使用式(1)计算得出^[22]。

$$r_e = r \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r r} \left[\ln \left(\frac{\pi r}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

其中, r 是中心圆形辐射贴片的半径, h 为介质基底的高, ϵ_r 是介质基底的介电常数。圆形贴片的谐振频率 f_r 可由式(2)计算得出。

$$f_r = \frac{1.8412c}{2\pi r_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

其中, c 是自由空间中电磁波的速度, ϵ_r 是介质基底的介电常数。

令叠加的切角方形的边长与圆形贴片半径 r 保持一致,组合后的谐振结构可通过改变方形贴片的缺口 w 进一步调节谐振频率。

传感器放置于高介电常数基板材料 Rogers RO3010 (介电常数 $\epsilon_r = 10.2$, 正切损耗角 $\tan\delta = 0.0035$), 基板厚度 $h = 1.27$ mm。利用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对谐振器尺寸进行优化后最终尺寸参数如表 1。

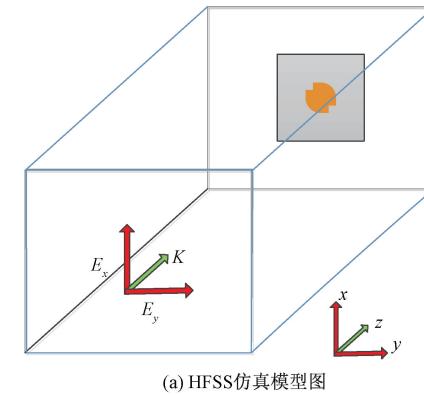
表 1 金属裂纹传感器尺寸优化参数

r	s	w	a	mm
6.5	6.5	3	40	1.27

2 单谐振结构检测金属裂纹双参数机理仿真

2.1 金属无裂纹时传感器谐振特性仿真

利用 HFSS 软件对设计的 CRFID 传感器模型进行仿真。如图 3(a) 所示, 传感器被放在一个尺寸 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 金属板表面, 其金属板电导率(σ)为 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$, 平面波激励将线性极化电磁波垂直照向传感器表面, 辐射贴片和金属板为理想导体边界, 对所有轴向进行辐射边界设置, 在 $3 \sim 5 \text{ GHz}$ 的频率范围内运行仿真。



(a) HFSS 仿真模型图

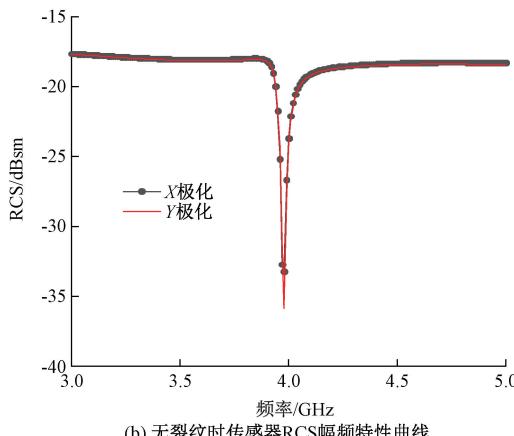


图 3 传感器仿真模型及 RCS 幅频特性曲线

为实现对 CRFID 传感器的标定, 首先仿真研究了无金属裂纹情况下传感器的初始 RCS 幅频特性, 图 3(b)是 X

极化与 Y 极化方向的 RCS 幅频特性曲线。当平面波激励传感器标签时, RCS 表现出频率选择行为, 在特定频率产生深陷波。形成凹口是因为标签结构使激励信号在某些频率下共振, 导致在这些频率下的一些能量在反射之前被吸收。如图 3(b)所示, CRFID 传感器标签在两个极化方向下均产生了一个谐振峰, 谐振频率均为 3.98 GHz 。

为了将产生的谐振频率与谐振器的金属裂纹检测能力联系起来, 图 4(a)、(b) 分别给出了谐振器表面和金属板表面在谐振频率(3.98 GHz)下的表面电流分布。

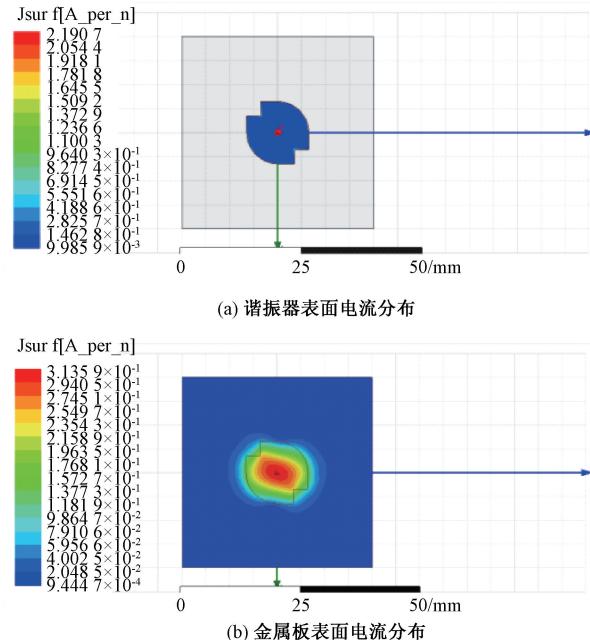


图 4 3.98 GHz 处传感器表面电流分布

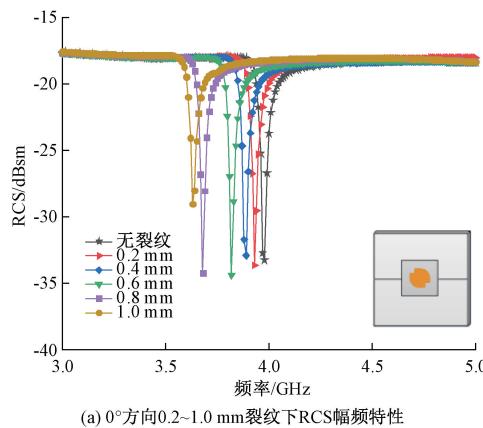
可以看出, 谐振器表面和金属板表面在同一谐振频率下感应出不同强度的表面电流。金属板上与谐振器对应的位置存在强电流, 因此确认金属板上的电流是由上层谐振结构感应而来。强电流更多地分布在金属板表面, 而不是谐振器表面, 因此可以基于表面电流分布来分析 RCS 频谱相对于底层金属的结构变化。

2.2 金属存在裂纹时传感器谐振特性仿真

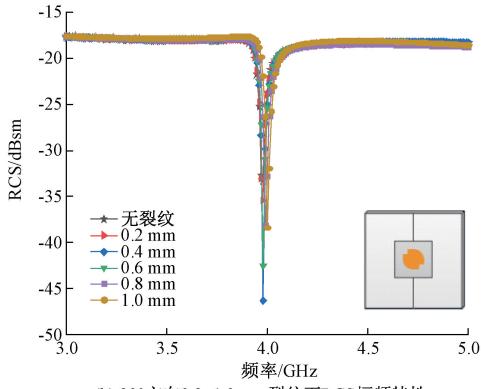
1) X 方向极化 RCS 幅频特性

在待测金属板上开沟凹槽状裂纹, 仿真获得不同裂纹方向和裂纹宽度的 RCS 频谱。由于传感结构位于金属表面的中心, 因此开沟的裂纹将穿过传感器贴片的背面。设置不同宽度的 0° 方向(水平裂纹)、 90° 方向(垂直裂纹)和 45° 、 135° 方向(斜向裂纹)的金属裂纹。对于每个裂纹方向进行参数扫描, 其中裂纹深度固定为 1 mm, 而裂纹宽度从 $0 \sim 1 \text{ mm}$ 以 0.2 mm 为步长变化。

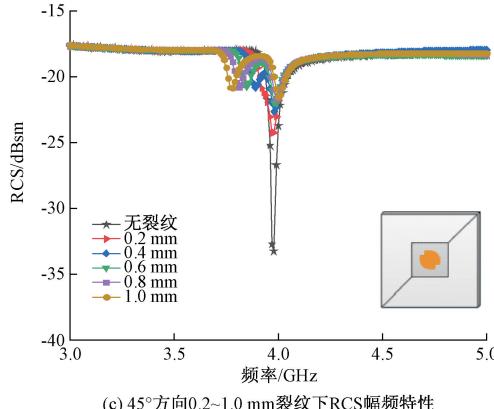
图 5 是 CRFID 传感器对不同方向和宽度的金属裂纹 RCS 响应的仿真结果。由图 5(a)可知, X 极化下检测水平方向的 0° 裂纹时, 谐振器谐振频率随裂纹宽度的增加逐渐向左偏移。图 5(b)表明 X 极化下检测竖直方向的 90° 裂纹



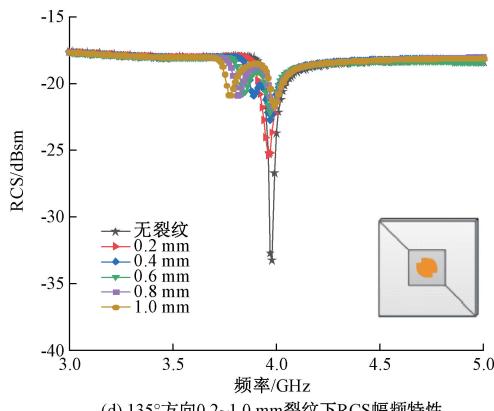
(a) 0°方向0.2~1.0 mm裂纹下RCS幅频特性



(b) 90°方向0.2~1.0 mm裂纹下RCS幅频特性



(c) 45°方向0.2~1.0 mm裂纹下RCS幅频特性



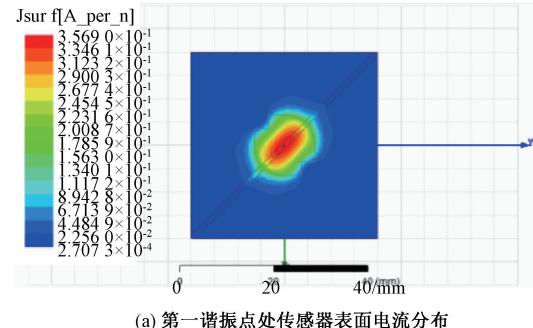
(d) 135°方向0.2~1.0 mm裂纹下RCS幅频特性

图 5 X 极化下各方向 0.2~1.0 mm 裂纹下 RCS 幅频特性

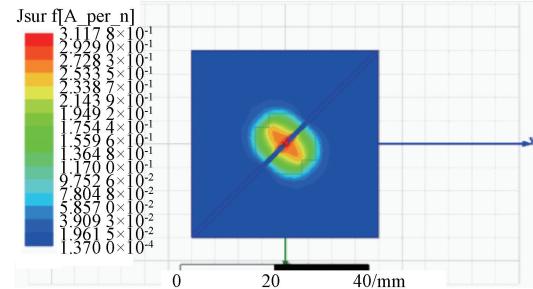
时，谐振频率几乎不发生偏移。造成这种差异的原因是 0° 裂纹与 X 极化方向垂直，改变了表面电流的等效电长度，裂纹越宽，电长度越长，谐振频率越向低频偏移。而 90° 裂纹与极化方向同向，对金属表面电流的等效电长度影响较小，因此谐振频率几乎不发生偏移。

由图 5(c)、(d) 可知，当斜向裂纹宽度为 0.2 mm 时，RCS 幅值急剧减小。裂纹宽度达到 0.4 mm 时，谐振峰个数由一个变成两个，其中第一谐振点随裂纹宽度的增加逐渐向左偏移。产生双谐振峰是由于斜向裂纹的存在会导致剖面积累斜向能量，导致原电流分布分解为互相垂直的两个电流分量（斜向及垂直斜向两个方向），对应两个谐振峰。

图 6 给出了两个谐振频率下传感器的表面电流分布，可以发现谐振是从贴片上对角流动的电流产生的场中获得的。



(a) 第一谐振点处传感器表面电流分布



(b) 第二谐振点处传感器表面电流分布

图 6 斜向裂纹传感器表面电流分布

综上所述，在 X 极化下，三类方向对应的 RCS 频谱图幅频特性各不相同。水平裂纹导致谐振器谐振频率向低频方向明显偏移，而竖直裂纹对谐振频率几乎不产生影响。相比上述两种情况，斜向裂纹会导致谐振峰个数由一个变成两个，其中第一谐振点随裂纹宽度的增加逐渐向左偏移。值得一提的是，宽度为 0.2 mm 的斜向裂纹虽仍保持单个谐振峰，但 RCS 幅值减小明显，同样可以达到裂纹宽度检测的目的。

2) Y 方向极化 RCS 幅频特性

同样以 0°、45°、90°、135° 方向的裂纹为例，待测金属板的裂纹缺陷与 X 方向极化时保持一致。对传感器 RCS 幅频特性进行仿真，Y 方向极化仿真结果如图 7 所示。

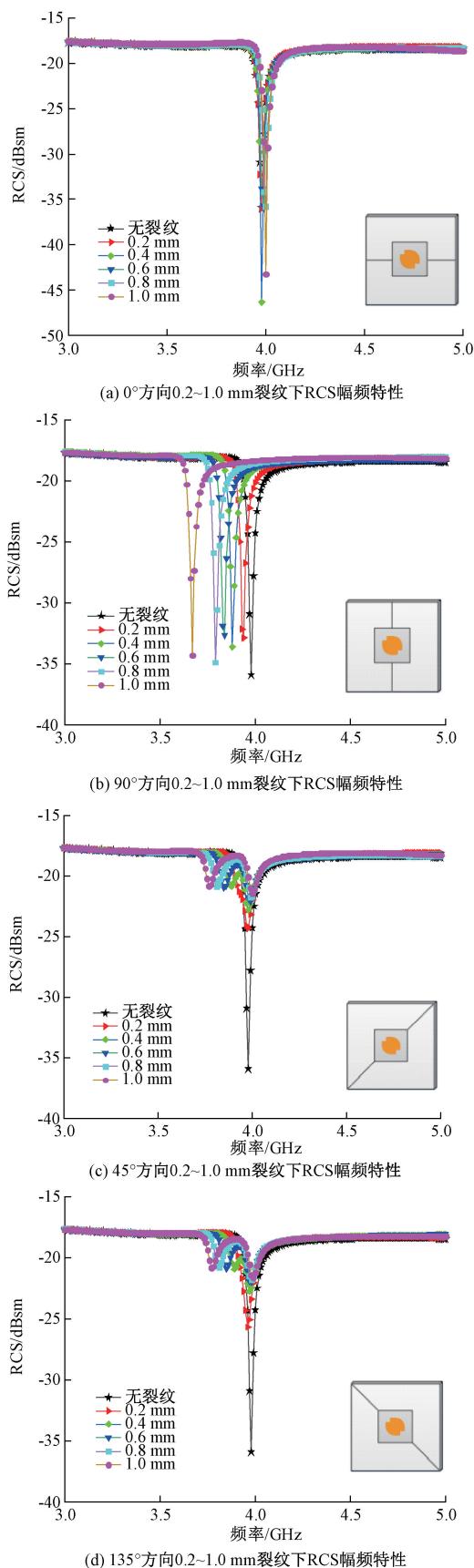


图 7 Y 极化下各方向 0.2~1.0 mm 裂纹下 RCS 幅频特性

图 7(a)、(b)表明,由于极化方向改变,Y 方向极化下的水平、竖直裂纹与 X 方向极化时的幅频特性完全相反。90°裂纹与 X 极化方向垂直,谐振频率的偏移受裂纹宽度变化的影响较为明显。不同宽度的裂纹对应不同的谐偏大小,可以被有效预测。由图 7(c)、(d)可知,Y 方向极化下斜向裂纹对应的幅频特性与 X 方向极化时基本保持一致。

为验证设计的单谐振结构传感器检测金属裂纹双参数的可行性,对其机理进行仿真研究,获得了传感器检测不同方向和宽度裂纹金属板时 RCS 幅频特性的差异特性。仿真结果表明,在不同的极化方向下,金属裂纹对传感器的 RCS 幅频特性具有不同的改变规律,通过将谐振点个数、频偏方向、频偏量等特征进行组合,可以实现对金属裂纹方向的识别和裂纹宽度的检测,为裂纹方向识别和宽度灵敏度分析提供了数据支撑。

3 传感器对裂纹方向识别和宽度灵敏度分析

3.1 金属裂纹方向识别

双极化下,当裂纹宽度不小于 0.4 mm 时,待测的 3 类裂纹方向 RCS 幅频特性各异。因此,设计的传感器可用于识别 3 类裂纹方向:0°水平裂纹、90°竖直裂纹、45°或 135°斜向裂纹。根据仿真结果总结的裂纹方向模态依据如表 2 所示。

表 2 金属裂纹方向模态表

裂纹方向	谐振点个数	X 极化下,左谐振点偏移方向	Y 极化下,左谐振点偏移方向
0°	1	向左	基本不偏移
90°	1	基本不偏移	向左
45°、135°	2	向左	向左

使用双极化下的 RCS 幅频特性的变化特征来识别裂纹方向。首先在 X 极化下进行检测,如果 RCS 频谱图中存在两个谐振点,则说明此时金属板存在斜向裂纹;仅存在单个谐振点则考虑是水平或竖直裂纹,需要进一步通过 Y 极化下的 RCS 幅频特性来辅助判断。

针对 0.4 mm 以下的裂纹,若存在幅值绝对值小于 30 dBsm 且谐振频率未发生明显偏移的单谐振点,则说明此时金属板存在斜向裂纹,而对于其他变化情况的单谐振点则对应水平或竖直裂纹,需要结合表 2 进行判断。

3.2 传感器检测金属裂纹宽度的灵敏度

1) 0°、90°金属裂纹宽度检测特性识别结果

针对 0°、90°方向的裂纹,由 RCS 幅频特性仿真结果可知,随着裂纹宽度的增加,谐振频率向低频偏移,以频偏的绝对值 Δf 作为检测裂纹宽度的灵敏度指标,图 8 为传感器 Δf 与裂纹宽度的关系曲线,采用线性拟合,两组拟合的相关系数分别为 0.949 和 0.956,表明传感器 Δf 与裂纹宽度高度线性相关。

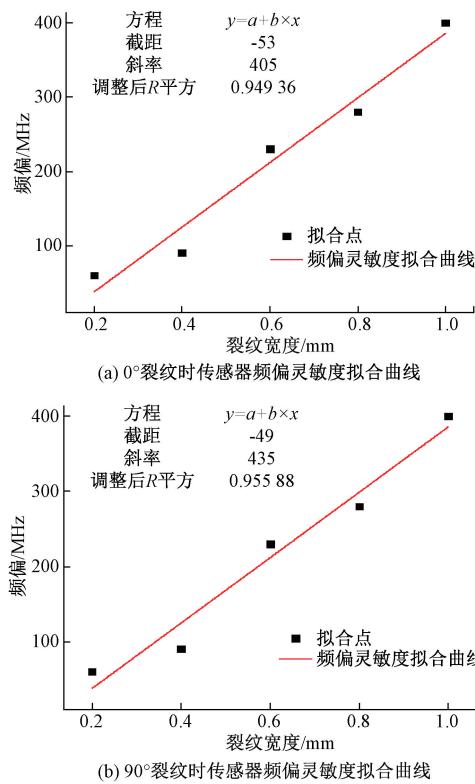


图 8 传感器检测 0°、90° 裂纹宽度频偏拟合曲线

根据拟合曲线斜率可得到 0° 方向和 90° 方向裂纹检测灵敏度分别为 40.5 MHz/0.1 mm 和 43.5 MHz/0.1 mm。

2) 45°/135° 金属裂纹宽度检测特性识别结果

以 45°/135° 方向为例, 对斜向裂纹的检测灵敏度进行分析。图 9 为传感器 Δf_r 与裂纹宽度的关系曲线, 同样采用线性拟合, 拟合的相关系数为 0.950。

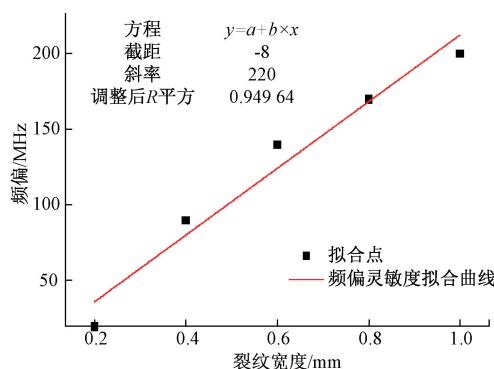


图 9 传感器检测 45°/135° 裂纹宽度频偏拟合曲线

根据拟合曲线斜率可得到 45°/135° 方向裂纹检测灵敏度为 22.0 MHz/0.1 mm。

3.3 与现有研究的对比

在现有的金属裂纹 CRFID 传感器研究中, 部分传感器仅对裂纹识别进行了定性分析, 未给出具体的检测灵敏度^[23-25]。针对已有传感器灵敏度的相关研究, 表 3 给出了性能对比。本文设计的传感器仅利用单结构谐振器即可实

现三类方向裂纹检测, 且对裂纹宽度的检测灵敏度明显高于所列研究工作, 其中 90° 方向的裂纹检测灵敏度高达 43.5 MHz/0.1 mm。

表 3 本文设计传感器的性能与已发表文献对比

谐振器 个数	传感器灵敏度 (MHz/0.1 mm)				实现三类 方向检测	参考 文献
	0°	90°	45°	135°		
1	6.67	15.30	13.40	—	✓	文献[11]
5	32.47	—	21.10	—	✗	文献[13]
5	40.71	26.04	11.28	15.19	✓	文献[15]
1	40.50	43.50	22.00	22.00	✓	本文

4 结 论

设计了单结构切角叶片型 CRFID 传感器, 通过仿真研究了金属裂纹的两个参数(方向和宽度)特征对传感器 RCS 响应的改变规律, 实现了利用单结构谐振传感器对金属裂纹方向和宽度的识别。

通过 HFSS 仿真优化完成了单结构切角叶片型 CRFID 传感器结构设计。

采用双极化方式, 对单结构谐振器检测金属裂纹双参数的机理进行仿真, 验证了传感器实现双参数检测的可行性。

定量分析了传感器对不同缺陷下的金属裂纹的 RCS 响应特征, 获得了传感器对金属裂纹方向识别的方法和对裂纹宽度检测的灵敏度。实现了金属裂纹不同方向(水平、竖直、斜向)及不同宽度(亚毫米级)的识别, 0°、90°、45°/135° 三个方向下的检测灵敏度依次是 40.5、43.5、22.0 MHz/0.1 mm。达到了传感器小型化和高灵敏度识别的目的。

参考文献

- [1] NOEL A B, ABDAOUI A, ELFOULY T, et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey [J]. IEEE Commun Surv Tutor, 2017, 19(3): 1403-1423.
- [2] MORENO G A, PEREZ R C A, DOMINGUEZ G A, et al. Sensors used in structural health monitoring[J]. Arch Comput Methods Eng, 2018, 25(4): 901-918.
- [3] MOLL J, ARNOLD P, MALZER M, et al. Radar-based structural health monitoring of wind turbine blades: The case of damage detection [J]. Struct Health Monit, 2018, 17(4): 815-822.
- [4] MENG X B, LU M Y, YIN W L, et al. Evaluation of coating thickness using lift-off insensitivity of eddy current sensor[J]. Sensors, 2021, 21(2): 18-24.
- [5] SOPHIAN A, TIAN G Y, TAYLOR D, et al.

- [1] Electromagnetic and eddy current NDT: A review[J]. *Insight*, 2001, 43(5): 302-306.
- [6] ZHU Y K, TIAN G Y, LU R S, et al. A review of optical NDT technologies[J]. *Sensors*, 2011, 11(8): 7773-7798.
- [7] 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.
- [8] MC GEE K, ANANDARAJAH P, COLLINS D. A review of chipless remote sensing solutions based on RFID technology [J]. *Sensors*, 2019, 19 (22): 4829-4879.
- [9] DEY S, SAHA J K. AND KARMAKAR N C. Smart sensing: Chipless RFID solutions for the internet of everything[J]. *IEEE Microw Mag*, 2015, 16(10): 26-39.
- [10] CAIZZONE S, DIGIAMPAOLO E. Wireless passive RFID crack width sensor for structural health monitoring [J]. *IEEE Sens J*, 2015, 15 (12): 6767-6774.
- [11] MARINDRA A M J, TIAN G Y. Chipless RFID sensor tag for metal crack detection and characterization [J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66(5): 2452-2462.
- [12] MARINDRA A M J, TIAN G Y. Multiresonance chipless RFID sensor tag for metal defect characterization using principal component analysis[J]. *IEEE Sens J*, 2019, 19(18): 8037-8046.
- [13] NOURI M A, KAZEMI R. A novel triple-band microwave chip-less sensor tag for structural health monitoring applications[J]. *Electromagnetics*, 2019, 39(7): 524-535.
- [14] DONG H, KANG W, LIU L. Wireless passive sensor based on microstrip antenna for metal crack detection and characterization [J]. *Meas Sci Technol*, 2019, 30(4): 0451031-0451037.
- [15] 李珊珊, 薛严冰, 宋智, 等. 双极化无芯片 RFID 金属裂纹传感器[J]. *微波学报*, 2021, 37(1): 37-43,49.
- [16] 池涛, 路厚文. 一种适用于 S 波段的多频微带天线的研究与设计[J]. *电子元件与材料*, 2019,38(9):82-86.
- [17] 陈蓬旭, 李建新. 一种带状线 L 型探针馈电的微带贴片天线设计[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(11): 28-32.
- [18] 陈佳慧, 杜宏宇, 任英杰, 等. 高频板材的复介电常数测量方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(6): 178-186.
- [19] COSTA F, GENOVESI S, MONORCHIO A. Chipless RFIDs for metallic objects by using cross polarization encoding [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2014, 62(8): 4402-4407.
- [20] 朱文强, 张爱军. 一种小型化超高频段 RFID 读写器天线设计[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(11): 142-146.
- [21] 王闯, 曹文权, 马文宇, 等. 基于结构复用的双频圆极化共口径天线设计[J]. *微波学报*, 2023, 39(1): 8-12.
- [22] KWAHA B J, INYANG O N, AMALU P. The circular microstrip patch antenna-design and implementation[J]. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 2011, 8(1): 86-95.
- [23] MARINDRA A M J, SUTTHAWEKUL R, TIAN G Y. Depolarizing chipless RFID sensor tag for characterization of metal cracks based on dual resonance features [C]. 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering(ICITEE) , 2018: 73-78.
- [24] KUMAR C S, PATRE S R. Array of chipless RFID sensor tag for wireless detection of crack on large metallic surface[C]. 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications(RFID-TA) , 2021: 142-144.
- [25] CHOMPOOSAWAT W, BOONPOONGA A, AKKARAEKTHALIN P, et al. Single-layer chipless RFID sensor for metal crack detection[C]. 2021 9th International Electrical Engineering Congress(IEECON) , 2021: 575-578.

作者简介

王帅,硕士,主要研究方向为微波无损检测传感技术。

E-mail:1925667073@qq.com

薛严冰(通信作者),教授,主要研究方向为智能传感器、嵌入式控制技术和电路设计。

E-mail:dlxyb@djtu.edu.cn