

DOI:10.11918/202402019

无源无芯片 RFID 的金属构件裂痕传感器

宋雅伦, 王博, 王柯, 曹盛力

(西安邮电大学 自动化学院, 西安 710121)

摘要: 为满足对大规模建筑群体的低成本、长期检测需求,并扩大传感器识别范围,提出一种基于无源无芯片射频识别技术的金属构件裂痕传感器。依据交叉极化和工作带宽等影响因素及前期在 HFSS 平台上的大量仿真数据,设计满足优良检测性能的传感器模型;构建水平、垂直、对角裂痕,利用平面波电磁激励,检验不同裂痕形状对传感检测的影响;改变各类裂痕位置,分析谐振腔电场、电流与响应幅值变化,确定传感器最优识别范围。结果表明:在超高频段下,传感器对结构损伤检测响应的平均幅值偏差为 5 dB;裂痕位置变化影响表面电流分布,进而改变响应幅值,而相较于无裂痕响应,结构损伤响应均呈现失谐状态,裂痕位置变化不影响其可检测性。该传感器可对物体表面任意位置的不同方向裂痕实现全范围检测,识别范围提高,且能够以较高分辨率对微小位置变化的裂痕进行实时监测。

关键词: 无芯片射频识别;金属表面裂痕;结构健康监测;超高频

中图分类号: TP212.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)03-0214-07

Passive chipless RFID-based crack sensor for metal components

SONG Yalun, WANG Bo, WANG Ke, CAO Shengli

(School of Automation, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to realize the demand for low-cost and long-term detection of large-scale building groups and to expand the identification range of the sensor, this paper proposed a metal crack sensor based on passive chipless radio frequency identification (RFID) technology. Based on the influencing factors such as cross-polarization and operating bandwidth and a large amount of simulation data on the HFSS platform in the early stage, the paper designed a sensor model with excellent detection performance. Horizontal, vertical, and diagonal cracks were constructed, and electromagnetic excitation of the plane wave was used to test the influence of different crack shapes on the sensing and detection. The position of various types of cracks was changed, and changes in the electric field of the resonant cavity, current, and response amplitude were analyzed to determine the optimal identification range of the sensor. The results show that the average amplitude deviation of the sensor's response to structural damage detection is 5 dB in the ultra-high frequency band. The change of crack position will affect the surface current distribution, which will change the response amplitude, while the structural damage response is detuned compared with the crack-free response, and the change of crack position does not affect the detectability of cracks. The sensor is capable of detecting cracks in different directions at any position on the surface of an object over a full range, improving the identification range and enabling real-time monitoring of cracks with small positional variations at a high resolution.

Keywords: chipless radio frequency identification; metal surface crack; structural health monitoring; ultra-high frequency

无源无芯片射频识别(radio frequency identification, RFID)是一种非接触式的自动识别技术,无须人工干预,适用于各种恶劣环境。无芯片传感器不含硅芯片,可整体打印,极大降低了生产成本^[1],且读取范围较大^[2]。

结构健康监测(structural health monitoring,

SHM)是 RFID 的一个重要应用领域。由于疲劳应力,各类建筑结构随时间会产生裂痕,而裂痕的萌生和扩展将对建筑结构造成严重破坏,引发巨大损失。因此实时监测裂痕萌生与扩展具有重要科学价值。当前多数裂痕检测依赖人工方式,检测效果差、成本高。无源无芯片 RFID 传感器弥补了人工检测的不

收稿日期: 2024-02-26; 录用日期: 2024-05-27; 网络首发日期: 2026-01-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20260129.1300.009>

基金项目: 国家自然科学基金(12204373); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023-JC-QN-0002)

作者简介: 宋雅伦(2004—),女,学士;王博(1986—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 王博, wangbo_chen@126.com

足,可预防灾难性故障,减少人工维护成本,为结构健康监测提供了新方向。

目前,国内外已有较多用于结构裂痕检测的无芯片 RFID 传感器研究。文献[3]提出一种能够以亚毫米分辨率监测疲劳裂痕扩展的天线传感器,基于谐振频率与电长度成反比的原理,验证了传感器谐振频率偏移随裂痕扩展呈线性关系。然而,由于同轴连接器安装的限制性,该传感器无法检测倾斜裂痕。文献[4]研究了一种由纤维素纸基板制作的裂痕传感器,可实现传感器应答与询问信号隔离,避免采用杂波抵消技术。然而,纸基板材料受环境影响较大,难以在 SHM 中部署应用。文献[5]提出一种由频率选择表面阵列制成的无芯片无源结构健康监测传感器,通过测量其反向散射信号来检测裂痕位置。该传感器的局限在于,只有谐振器被破坏时传感器才能做出响应,且模拟仿真中未包含待测物体。文献[6]报道了一种基于雷达散射截面(radar cross section, RCS)的圆形微带贴片天线传感器,利用谐振频移方向表征裂痕方向,谐振频移幅度与裂痕宽度呈线性关系。然而,传感器只能检测到谐振器背面中心位置的裂痕。即编码谐振器后方金属区域是盲区,且 RCS 最小可检测幅值仅为 -25 dB,分辨率较低。上述研究在恶劣环境适应性及检测范围方面仍有不足。因此,Shuvashis Dey 等^[7]研究了一种新型的“智能皮肤”传感器,由级联新型分裂谐振器耦合到基于共面波导(CPW)的传输线上,能够检测到多方向的裂痕,在实际应用场景的监控和部署方面迈出了重要一步。Kalansuriya 等^[8]提出基于 TDOA 技术的直、曲两种传输线表面裂痕检测方案。为便于制造,该研究在原型制备中使用直线传输线,验证了裂痕长度和方向与传感器反向散射信号的关系,实现了裂痕的定位检测。此外,该设计为实现低成本大规模部署,还引入了裂痕包络理论^[9]。然而,该传感器检测性能对阅读器位置与方向较为敏感,难以提取可识别的裂痕特征。

本文提出一种圆形和方形结构结合的无芯片 RFID 传感器,用于结构健康裂痕监测。设计的传感器可对待测物体表面 4 种典型的裂痕方向实现全范围有效、高灵敏度检测,打破裂痕检测范围局限性,实现结构健康的早期预警。

1 裂痕传感器的工作原理

图 1 为无芯片射频识别裂痕检测系统。阅读器发射特定电磁波,激励传感器表面的谐振器产生感应电流,感应电流引起感应磁场,将带有传感信息的信号反向散射回阅读器。无源 RFID 传感器通过阅

读者获取能量,完成信息交换。

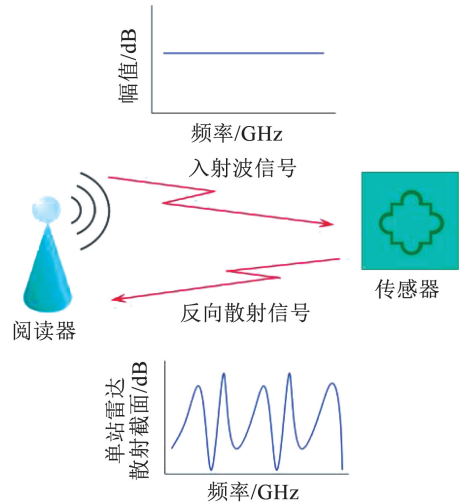


图 1 无芯片 RFID 裂痕检测系统

Fig. 1 Chipless RFID crack detection system

如图 2 所示,待测金属物体表面有一条裂痕,虽未破坏谐振器结构,但改变了传感器背面形成的谐振腔,腔内的电场、磁场分布发生变化^[10-12],导致电流路径不连续或发生位移。谐振器的电长度与电流路径发生改变,影响谐振器的内场电磁波特性及待测物体表面电流分布。基于无源无芯片 RFID 传感器,将裂痕物理参数转换为 RCS 幅值信号,当传感器背面待测金属产生结构应变时,RCS 幅值随之变化,谐振器的谐振幅度发生改变。由于传感器区域背面的任何缺陷都会改变待测物体及谐振器表面电流的形成,并重构 RCS 幅值,所以通过检测谐振器的谐振幅度变化,可有效、精准地识别裂痕的产生或改变^[13]。本文主要研究 4 种典型方向的裂痕及其识别范围,提出一种以 RCS 幅值变化作为裂痕表征特性的传感器。

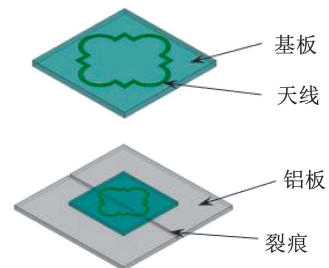


图 2 裂痕传感器结构

Fig. 2 Crack sensor structure

2 传感器设计

Adi Mahmud Jaya Marindra 等设计的圆形微带贴片天线(circular microstrip patch antenna, CMPA)谐振器在 0° 和 90° 方向裂痕检测中表现出明显差异。实验验证了几何对称的圆形结构可以检测不同方向的裂痕。与其他结构相比,方形天线在交叉极

化和工作带宽方面具有突出性能。因此,本文提出一种圆环与方形结构融合的传感器设计,如图 3 所示。天线蚀刻在介电常数为 3.8 的 Micarta G-10 玻璃/环氧薄膜上,传感器粘贴在带有 1 mm × 1 mm × 60 mm 裂痕的铝板上方,设计工作频率为 4.3 GHz、9.4 GHz。基于微带贴片天线设计原理,圆环的半径和天线的总宽度分别由式(1)~(3)获得。

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

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L_{oc} \quad (3)$$

式中, r 为圆环半径; f 为谐振频率; L 为天线总宽; $2\Delta L_{oc}$ 为辐射贴片长侧的等效辐射间隙长度; ϵ_r 和 d 分别为衬底的介电常数和厚度。考虑圆环天线的边缘效应,利用式(4)计算圆环的有效半径 a 。

$$a = r \left\{ 1 + \frac{2d}{\pi \epsilon_r r} \left[\ln \left(\frac{\pi r}{2d} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

经初步计算, L 的设计范围为 8.5 ~ 15 mm, a 的设计范围为 1.1 ~ 4.6 mm。为获得更优的传感器设计,在 HFSS 中进行模拟仿真。基于大量仿真数据,综合考量幅度差、谐振频率段、波形光滑度等因素,确定表 1 参数为最佳尺寸,后续以最佳尺寸进行三项代表性设计的仿真分析。

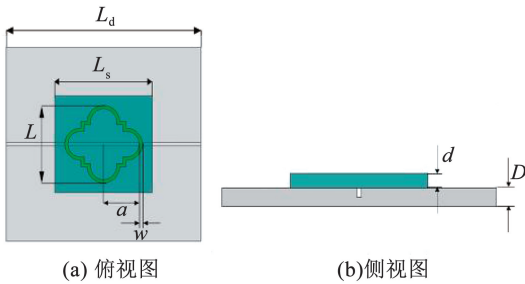


图 3 传感器结构图

Fig. 3 Sensor structure diagram

表 1 无芯片 RFID 传感器尺寸

Tab. 1 Chipless RFID sensor dimensions

参数	含义	取值/mm
w	天线线宽	0.4
L	天线总宽	12
a	天线圆弧半径	3.2
L_s	基板边长	30
L_d	铝板边长	60
d	基板厚度	1.6
D	铝板厚度	2

3 仿真分析

使用 HFSS 对设计的裂痕传感器进行模拟仿真,详细分析传感器对不同方向和不同位置裂痕的响应情况。为评估传感性能并使仿真更贴合实际,结合不同应用场景裂痕的危害性,归纳出 4 种典型裂痕方向—— 0° 、 45° 、 90° 和 135° ,这些方向对金属构件的结构危害最大。将 4 个方向的裂痕等间距平移,模拟 11 个位置的裂痕,以确定裂痕传感器的检测区间,并定量分析其稳健性。

3.1 中心位置的 4 个裂痕方向模拟

本节对待测铝板表面中心裂痕进行仿真,分析 4 个裂痕方向对传感器的影响。

图 4 为 4 个方向裂痕的模型,图 5 展示了 4 个方向裂痕在铝板中心位置的响应及其与无裂痕结构响应的差异。由图 5 可知,无裂痕结构在 4 ~ 6 GHz 频段内,RCS 最大幅值为 -46 dB;在 8 ~ 10 GHz 频段内,RCS 最大幅值达 -49 dB。品质因子(Q)反映传感器的谐振性能,谐振峰越尖锐,对应的 Q 值越大,传感器的灵敏度、分辨率越高。在超高频段,Q 值下降,但无论 4 ~ 6 GHz 还是 8 ~ 10 GHz,无裂痕结构均产生深凹陷尖锐的谐振峰。同时,4 个方向裂痕的 RCS 响应幅值均大于 -30 dB,最低可达 -49 dB,并且有裂痕与无裂痕结构 RCS 响应曲线间波谷幅值相差 1 ~ 4 dB,这说明本文设计的裂痕传感器可识别 4 个方向裂痕,传感器的灵敏度、分辨率较高。

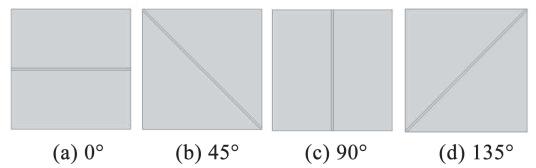


图 4 4 个方向的裂痕建模

Fig. 4 Modelling of the crack in 4 directions

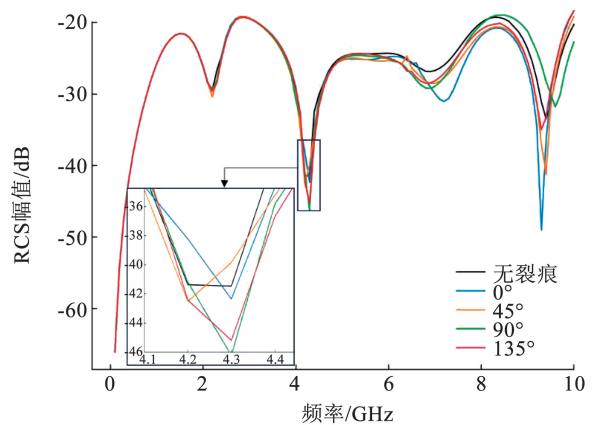


图 5 中心位置的不同方向裂痕的 RCS 响应

Fig. 5 RCS response of cracks in different directions at center position

3.2 4个裂纹方向的检测范围

为了深入研究传感性能,同时使仿真更贴合实际,本节通过改变4个方向裂纹的顶点坐标实现等间距平移,模拟11个裂纹位置,并从裂纹传感器表面的11个切割区域重点分析不同裂纹位置与方向对其的影响,以此确定裂纹传感器的检测区间并定量分析其稳健性。

图6展示了0°、45°、90°和135°裂纹在11个位置的等间隔排列及编号顺序,11个切割区域可全覆盖待测铝板。

1) 45°、90°、135°裂纹检测范围

45°、90°和135°裂纹相较于0°裂纹不常见,但均会影响结构的抗扭强度,对建筑结构造成严重危害,因此研究分析这些方向的裂纹检测至关重要。

铝板表面产生这3种方向裂纹时,裂纹迫使电流流过裂纹腔,导致电流分布不连续,电流路径改变,进而引起谐振器电长度变化,影响Q和RCS幅

值。由图7~9可知,在4~6 GHz和8~10 GHz频段内,45°、90°、135°裂纹11个位置的RCS响应波谷谐振峰尖锐,对应Q值较大,且相较于无裂纹响应产生明显信号偏移,表现出较好的传感识别性能。不同位置的裂纹导致电场分布变化,电流路径、电长度各不相同。因此,3个方向裂纹在11个位置的RCS响应均不相同。

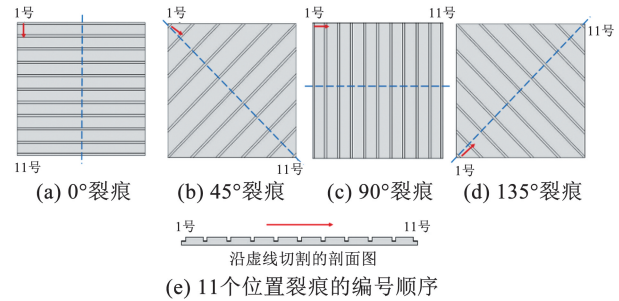


图6 4个角度11个位置的裂纹示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cracks at 4 angles and 11 positions

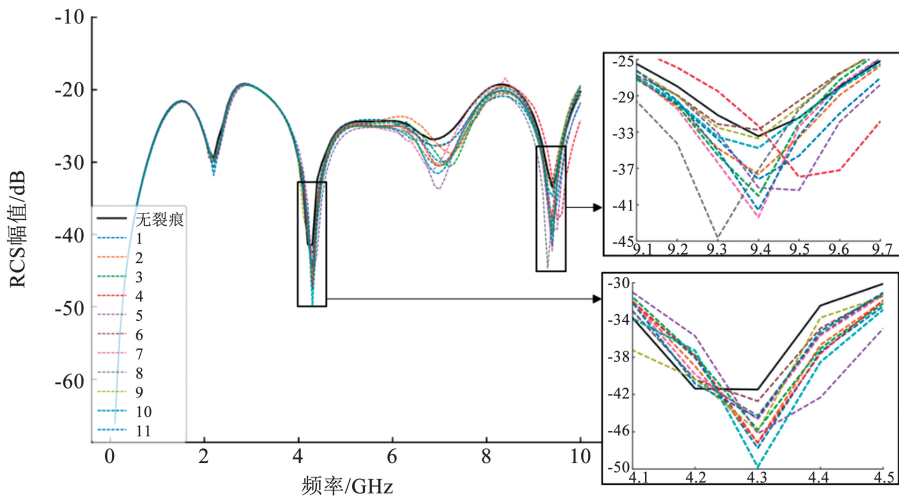


图7 45°裂纹11个位置与无裂纹RCS响应对比

Fig. 7 Comparison between RCS responses of 45° crack at 11 positions with no crack

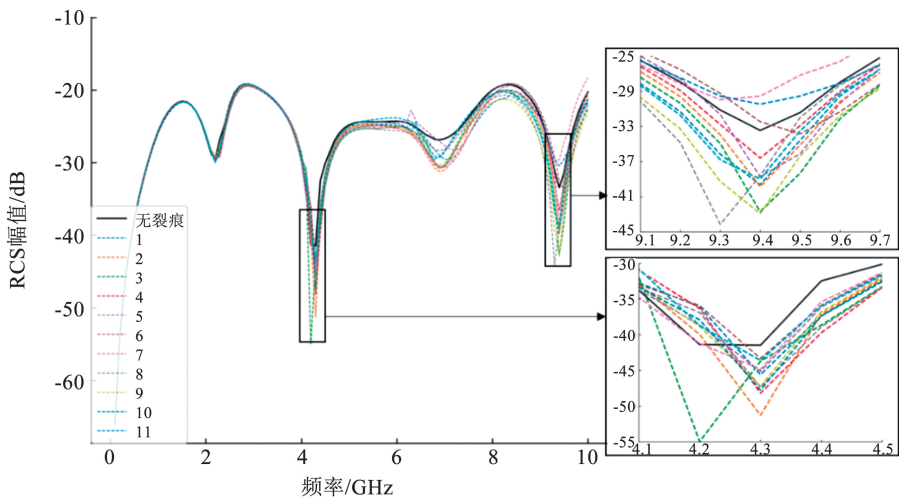


图8 90°裂纹11个位置与无裂纹RCS响应对比

Fig. 8 Comparison between RCS responses of 90° crack at 11 positions with no crack

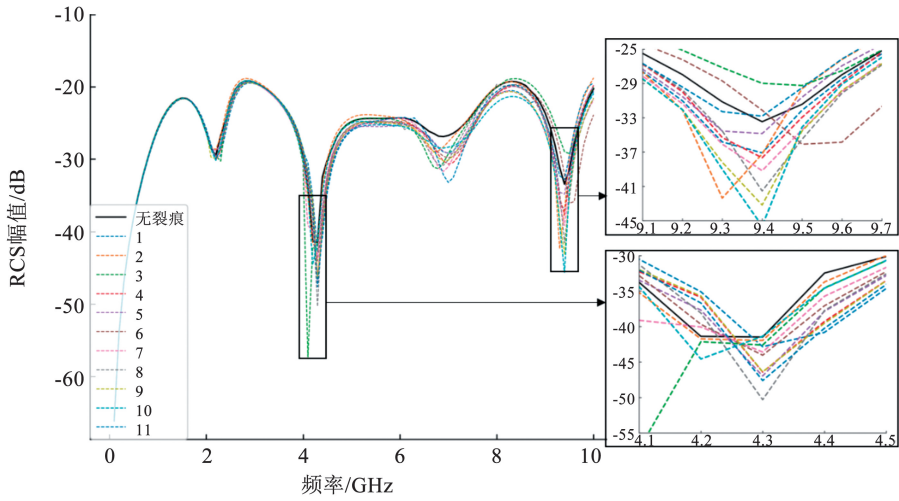


图 9 135° 裂痕 11 个位置与无裂痕 RCS 响应对比

Fig. 9 Comparison between RCS responses of 135° crack at 11 positions with no crack

2) 0° 裂痕检测范围

相比其他方向, 0° 裂痕最为常见且危害最大, 因其会减小结构横截面积, 降低承载能力。0° 裂痕对待测物体表面信号路径的改变较小, 对传感器电磁场的影响也较小^[14-16]。因此, 检测 0° 裂痕的变化意义重大。

图 10 展示了 11 个位置的 0° 裂痕 RCS 响应与无裂痕结构的对比。由图可知, 11 个位置裂痕的 RCS 响应几乎都小于 -30 dB, 在 4.3 GHz 及 9.2 ~

9.4 GHz 处均产生深凹陷尖锐的谐振峰, 与无裂痕响应相比, 幅值差为 1 ~ 13 dB。11 个位置所对应的幅值差均不相同; 在 8 ~ 10 GHz 频段内, 不同裂痕位置既存在幅值差变化, 又出现频率偏移。由于裂痕距传感器中心距离不同, 与垂直平面入射波的夹角各异, 导致谐振腔内整体电场与磁场分布发生变化, 表面电流分布也呈现差异。因此, 重点对工作于 4.3 GHz 的传感器背面谐振腔电场及表面电流展开分析。

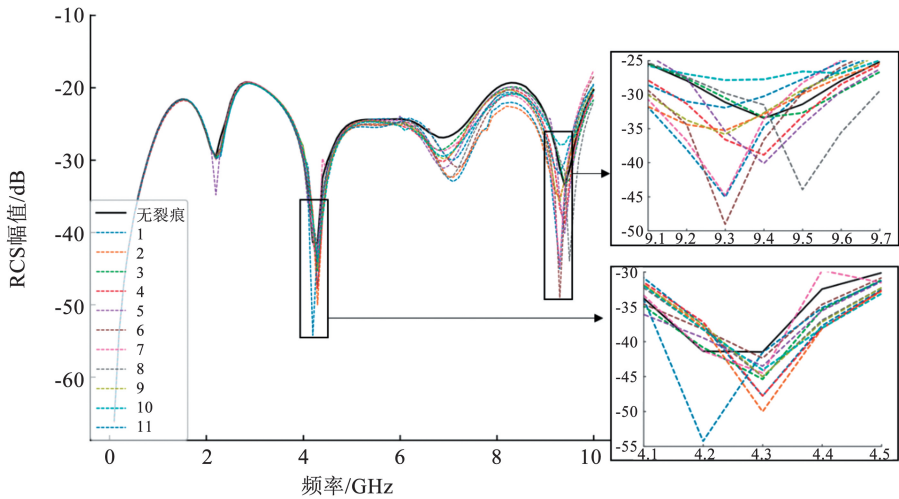


图 10 0° 裂痕 11 个位置与无裂痕 RCS 响应对比

Fig. 10 Comparison between RCS responses of 0° crack at 11 positions with no crack

如图 11 所示, 不同位置的 0° 裂痕导致谐振腔内电场分布不同, 进而影响铝板表面电流分布。铝板表面电流分布与谐振的产生相关, 当其发生改变时, RCS 水平与共振特性发生重构, 因此 11 个位置对应的幅值差均不相同。与其他方向的 RCS 响应相比, 图 10 中 0° 裂痕的幅值偏差更大、谐振峰更尖锐、Q 值更高、灵敏度更好。如图 12 所示, 0° 裂痕对待测物体表面信号路径改变较

小, 对电场分布影响较弱, 因此表现出更优的检测性能。

由图 7 ~ 9 和图 12 可知, 4 个裂痕方向对应的 44 种裂痕情况的频率特征都是失谐的, 即传感器能够识别整个 60 mm × 60 mm 待测铝板。以无裂痕结构的响应作为参照, 44 种裂痕情况均至少有 1 dB 幅值偏差, 大部分裂痕响应超过 6 dB 的幅值偏差, 变化明显, 响应衰减更快, 分辨率高。

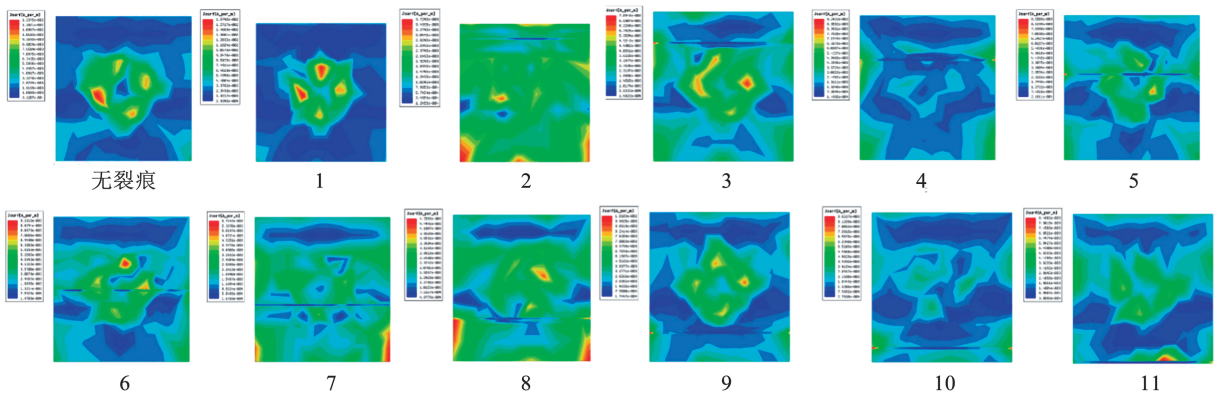


图 11 4.3 GHz 工作的 0° 裂纹 11 个位置的传感器表面电流分布

Fig. 11 Distribution of sensor surface currents at 11 positions of 0° crack for 4.3 GHz operation

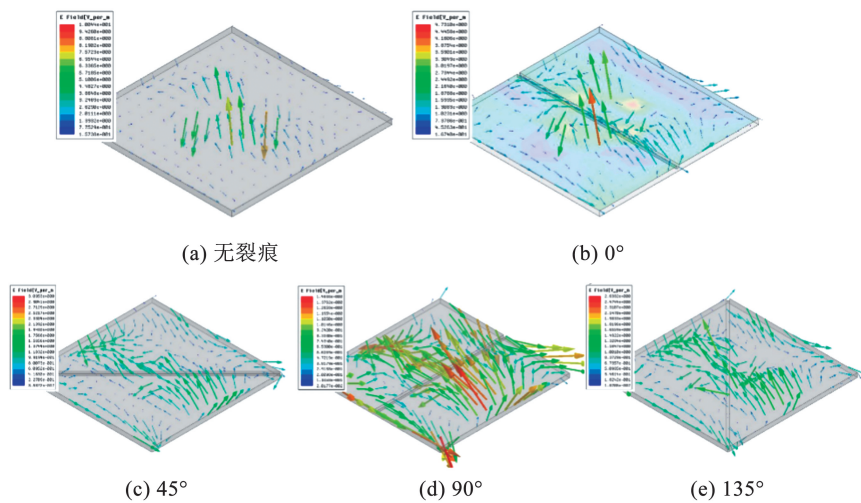


图 12 4.3 GHz 工作的 4 个方向裂纹及无裂痕传感器电场分布

Fig. 12 Electric field distribution of cracked and uncracked sensors in four directions for 4.3 GHz operation

3.3 待测铝板检测范围

为了探究传感器可识别的铝板范围及各传感器单元布局间隔,对铝板监测范围进行仿真研究。以 0° 中心裂纹为代表,将 60 mm × 60 mm 铝板尺寸缩小 10% (54 mm × 54 mm) 及扩大 10% (66 mm × 66 mm)、20% (72 mm × 72 mm)、50% (90 mm × 90 mm) 进行仿真分析。由图 13 可知,在 0.1 ~ 6 GHz 频段内,铝板尺寸增大时传感器谐振频率向低频偏移,尺寸缩小时向高频偏移,较大的金属表面会使谐振频率产生衰减偏移。在 6 ~ 10 GHz 频段内,当铝板尺寸为 54 mm × 54 mm 和 60 mm × 60 mm 时可以观察到谐振波谷;若铝板尺寸大于 60 mm × 60 mm,则无法观察到谐振波谷。原因是超高频段信号激励下,较大金属表面的反射信号通常会掩盖谐振器的吸收峰。结果表明,0.1 ~ 10 GHz,60 mm × 60 mm 是本文设计裂纹传感器的最佳可识别范围。

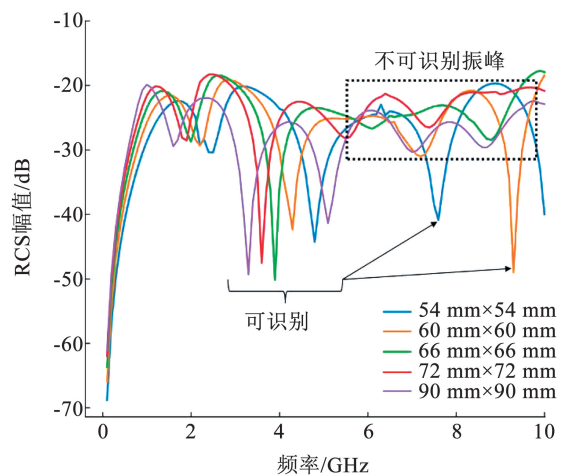


图 13 不同铝板尺寸中心裂纹 RCS 响应

Fig. 13 RCS responses of cracks at center of different aluminum plate sizes

因此,无论何种方向,本文设计的裂纹传感器可识别整个待测铝板范围内任意位置的裂纹,打破了仅能识别中心位置的裂纹以及检测传感器与待测铝板重叠区域裂纹的局限^[17-18]。

4 结 论

1) 不同角度与不同位置的裂痕响应均不相同, 其原因是传感器区域背面的缺陷会改变谐振腔内电场与电流分布以及待测物体表面电流的形成, 并重构 RCS 幅值, 使响应产生差异。

2) 基于 RCS 幅值变化, 传感器对 44 种裂痕响应均呈失谐状态, 且对结构损伤检测响应的平均幅值偏差为 5 dB, 最小可检测 RCS 幅值达 -58 dB。该裂痕监测传感器具备高灵敏度, 检测范围较大。

3) 即使裂痕不在基板区域背面, 幅值变化依然明显, 传感器性能稳定, 能够精确检测待测物体任意位置的不同方向裂痕, 解决了仅能检测固定位置裂痕的局限, 为随机裂痕的精准检测技术研究提供了可靠的方案与技术基础。

参 考 文 献

- [1] DEY S, SAHA J K, KARMAKAR N C. Smart sensing: Chipless RFID solutions for the internet of everything[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(10): 26. DOI: 10.1109/MMM.2015.2465711
- [2] PRERADOVIC S, KARMAKAR N C. Chipless RFID: Bar code of the future[J]. IEEE Microwave Magazine, 2010, 11(7): 87. DOI: 10.1109/MMM.2010.938571
- [3] MOHAMMAD I, HUANG H. Monitoring fatigue crack growth and opening using antenna sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(5): 055023. DOI: 10.1088/0964-1726/19/5/055023
- [4] PALAZZI V, MARIOTTI C, ALIMENTI F, et al. Demonstration of a chipless harmonic tag working as crack sensor for electronic sealing applications[J]. Wireless Power Transfer, 2015, 2(2): 78. DOI: 10.1017/wpt.2015.11
- [5] SHISHIR M D I R, MUN S, KIM H C, et al. Frequency-selective surface-based chipless passive RFID sensor for detecting damage location[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(12): e2028. DOI: 10.1002/stc.2028
- [6] MARINDRA A M J, TIAN G Y. Chipless RFID sensor tag for metal crack detection and characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(5): 2452. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2786696
- [7] DEY S, BHATTACHARYYA R, SARMA S E, et al. A novel "smart

- skin" sensor for chipless RFID-based structural health monitoring applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(5): 3955. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3026729
- [8] KALANSURIYA P, BHATTACHARYYA R, SARMA S, et al. Towards chipless RFID-based sensing for pervasive surface crack detection[C]//2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 46. DOI: 10.1109/RFID-TA.2012.6404565
- [9] DEY S, KALANSURIYA P, KARMAKAR N C. Novel chipless RFID high resolution crack sensor based on SWB technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(3): 2908. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3028296
- [10] MOHAMMAD I, GOWDA V, ZHAI H, et al. Detecting crack orientation using patch antenna sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 23(1): 015102. DOI: 10.1088/0957-0233/23/1/015102
- [11] 毛艳飞. 基于微带天线传感器阵列的钢结构裂纹扩展监测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019
MAO Yanfei. The study on crack propagation monitoring method of steel structure based on microstrip antenna sensor array[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2019.001118
- [12] MARINDRA A M J, TIAN G Y. Multiresonance chipless RFID sensor tag for metal defect characterization using principal component analysis[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 8037. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2917840
- [13] YAO Y, TUNG S T E, GLISIC B. Crack detection and characterization techniques—An overview[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(12): 1387. DOI: 10.1002/stc.1655
- [14] AZEMI S N, MUSTAFFA F H W, JAMLOS M F, et al. Frequency selective surface for structural health monitoring[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 318(1): 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/318/1/012033
- [15] BRUCIATI B, JANG S, FILS P. RFID-based crack detection of ultra high-performance concrete retrofitted beams[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1573. DOI: 10.3390/s19071573
- [16] DEIVASIGAMANI A, DALIRI A, WANG C, et al. A review of passive wireless sensors for structural health monitoring[J]. Modern Applied Science, 2013, 7(2): 57. DOI: 10.5539/mas.v7n2p57
- [17] DEY S, AMIN E M, SAHA J K, et al. A brief overview of chipless RFID sensors with EM transduction[C]//8th International Conference on Electrical and Computer Engineering. IEEE, 2014: 765. DOI: 10.1109/ICECE.2014.7027013
- [18] LYNCH J P, LOH K J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring[J]. Shock and Vibration Digest, 2006, 38(2): 91. DOI: 10.1177/0583102406061499

(编辑 丁晓清)