

基于微波技术的 SRR 谐振结构检测金属表面微缺陷传感器

王自强 刘茂德 侯梓越 刘宣晨 唐亚南*

成都工业学院, 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 论文设计了一种基于微波技术的 SRR 双圆环结构金属表面缺陷检测传感器。该传感器利用 SRR 具有将电场集中的能力, 通过测量谐振频率偏移参数实现对金属表面缺陷的检测。结果表明, 该传感器对深度为 2mm、宽度分别为 100 μ m 和 200 μ m 的微小缺陷能够实现 1GHz 以上的谐振频率偏移, 表现出较高的灵敏度和精度的检测性能, 具有亚毫米级裂纹无损检测的潜力, 同时在材料传感与表征等领域也具有广泛的应用价值。

关键词: 微波技术; SRR; 无损检测; 微波近场检测

Microdefect Detection Sensor of Metal Surface based on SRR Resonant Structure of Microwave Technology

Ziqiang Wang Maode Liu Ziyue Hou Xuanchen Liu Yanan Tang*

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract: This paper designs a metal surface defect detection sensor based on microwave technology with a SRR doubling structure. The sensor utilizes the ability of SRR to concentrate the electric field and achieves the detection of metal surface defects by measuring the resonant frequency shift parameter. The results show that the sensor can achieve a resonant frequency shift of more than 1 GHz for micro-defects with a depth of 2 mm and widths of 100 μ m and 200 μ m, demonstrating high sensitivity and accuracy in detection performance. It has the potential for non-destructive testing of sub-millimeter cracks and also has broad application value in fields such as material sensing and characterization.

Keywords: microwave technology; SRR; non-destructive testing; microwave near-field detection

0 前言

随着工业技术的飞速发展, 金属材料因其卓越的性能, 在航空航天、汽车制造、机械工程等诸多关键领域扮演着不可或缺的角色。金属零部件的质量直接关系到产品的使用寿命、结构强度与安全性。以航空航天领域为例, 飞行器金属零部件表面的微小缺陷, 如裂纹、凹坑等, 虽然极其微小, 但可能导致部件结构强度的降低, 进而危及航天器的整体安全性和可靠性, 甚至造成安全事故^[1]。因此, 精准、高效地检测金属表面缺陷, 对于保障工业产品质量与安全运营至关重要。

传统的金属表面缺陷检测技术, 如磁粉检测技术(MT)、射线检测技术(RT)和超声波检测技术(UT), 有着各自的优点, 但也存在着一定的局限性。磁粉检测技术依赖于在铁磁性工件上施加磁场并撒布磁粉, 通过观察磁粉在漏磁区域形成的可见指示来判定缺陷, 能够直观可视化缺陷轮廓, 但检测精度具有局限性, 且易对样品造成污染^[2]。超声波检测技术通过声波在金属表面缺陷处的反射与散射特性, 接收器将接收到的声信号转换为电信号以实现缺陷检测, 这种技术灵敏度较高, 但在检测过程中需要添加耦合剂存在样品污染的潜在风险^[3]。射线检测技术利用 X 射线或伽马射线穿

透金属材料, 依据射线衰减程度来探测表面缺陷, 虽检测精度尚可, 但高能辐射源的使用成本较高, 还伴随着一定的辐射安全风险^[4]。微波检测技术应运而生, 为金属表面缺陷检测提供了新的检测思路。这种技术巧妙地利用微波的入射、折射、透射等物理特性, 通过精准测量幅度、相位变化以及频率偏移等关键参数, 实现对材料内部结构的深度检测与评估。其独特的优势在于可远程非接触式检测, 有效规避了接触式测量可能给物体带来的损伤, 且检测过程不依赖于物理接触, 适用范围广泛^[5,6]。

论文提出的一种创新的基于微波技术的 SRR (Split Ring Resonator, 分裂环谐振器) 双圆环结构金属表面缺陷检测传感器, 探究其设计原理、检测性能及实际应用潜力, 旨在提升金属表面微小缺陷检测的精度和效率, 为无损检测领域提供新的检测思路。

1 SRR 结构的微波特性分析

SRR 结构的谐振频率是其核心性能指标之一, 与结构的几何尺寸紧密相连。经理论推导, 外环半径的增大将导致谐振频率降低; 反之, 间隙宽度的减小则会使谐振频率升高^[7]。从传感器的等效集总参数电路进行分析可以得出, SRR 结

构的谐振频率由等效电感 (L) 和等效电容 (C) 参数主导, 几何尺寸的细微调整会直接影响这些关键参数, 进而改变谐振频率的数值, 遵循公式:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

以论文设计的传感器为例如图 1 所示, 其具体结构参数如下: 传感器结构尺寸 $d_1=d_2=0.15\text{mm}$, $R=3\text{mm}$, $r=2.7\text{mm}$; 微带线长 64.8mm、宽 1.6mm、高 0.035mm; 介质基板选用 RogersRo4350B 材质, 尺寸为长 64.8mm、宽 32.4mm、高 0.762mm; 接地面尺寸与介质基板一致, 长 64.8mm、宽 32.4mm、高 0.035mm。其中, 黄色部分代表铜材质, 空白区域则是通过蚀刻铜层形成的特定结构。如图 2 所示, 该设计下的传感器谐振频率在 10GHz 左右, 且品质因数 Q 值较高, 产生的波形选择性良好。

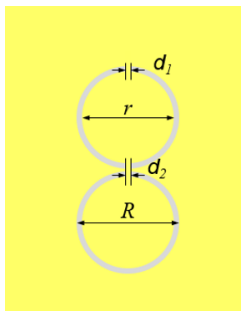


图 1 传感器结构图

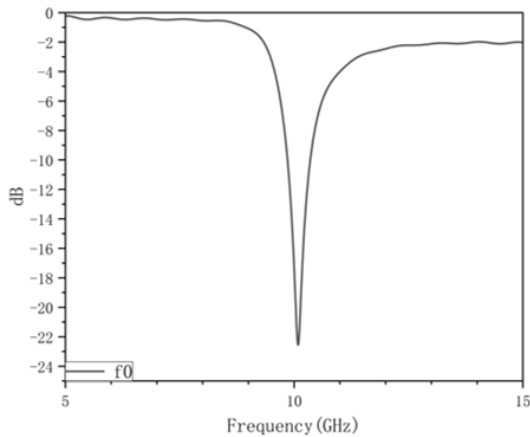


图 2 传感器谐振波形

2 电磁场分布仿真探究

应用电磁仿真软件 CST Studio Suite 2021, 论文对传感器内部及其周边区域的电磁场强度分布进行了深入的仿真分析。如图 3 所示, 仿真结果清晰地显示了在两个圆环相接之处, 电磁场强度呈现出显著的增强效应, 这一区域正是传感器检测金属表面缺陷的关键作用区域。在这些电磁场强度增强的区域, 其强度可稳定维持在 1000A/m 以上, 为微小缺陷的精准探测提供了坚实的理论基础, 确保了传感器在高灵敏度检测方面的性能。

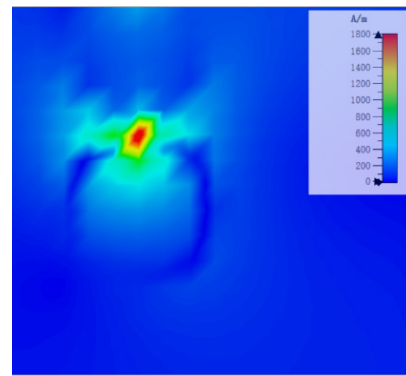


图 3 传感器电场分布

为进一步深入剖析传感器的电磁特性, 论文将所设计的传感器在高频电路下等效为集总参数电路模型, 如图 4 所示, 该模型由三个关键部分构成: 第 1 部分为高频传输线在工作频段下的等效电感元件; 第 2 部分为传输线与接地面之间形成的等效电容元件; 第三部分则由双圆环结构所构成的等效 LC 谐振电路结构。通过对传感器进行电路等效处理, 能够数值化的揭示传感器在高频工作状态下的电磁响应机制, 为后续的研究开展提供理论基础。

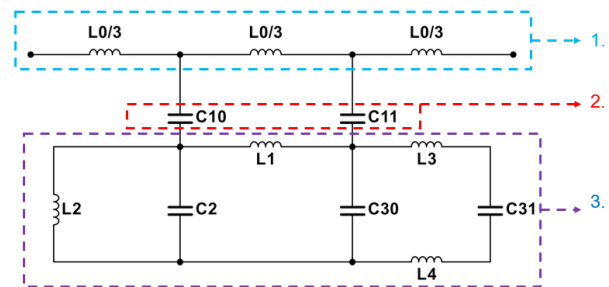


图 4 传感器等效电路

通过在 CST 仿真软件中对完整金属样品进行仿真, 获取参考谐振频率如图 5 所示, 以此为基准, 对比有缺陷样品的检测数据。如图 6 所示, 当传感器下方放置无缺陷金属样品时, 谐振频率出现约 1GHz 的偏移, 这源于等效电路结构的改变, 新增的电容 C4 (由传感器与金属块表面积、介电材料及间距共同决定) 使总电容增大。集总参数等效电路优化策略深入剖析传感器的集总参数等效电路后发现, 减小等效电容是提升传感器谐振频率、增强检测灵敏度的关键^[8]。论文创新性地采用非对称排布的双环结构, 并引入一条贯穿一侧圆环的金属条带。这种设计有效拓展了感应电流的流通路径, 进而降低等效电路中的电容值, 显著提高传感器的灵敏度, 使其在微小缺陷检测领域更具实际的检测性能^[9]。

仿真验证电场分布仿真在仿真软件中精准模拟传感器在金属物块表面产生的电场分布情况, 结果表明电场在两个圆环交汇处高度聚集。这一电场聚集特性赋予传感器敏锐的感知能力, 使其能够精准捕捉金属物块的微小变化, 进而引发传感器谐振频率、幅值、相位等关键物理量的显著变化, 为缺陷检测提供了有力依据。

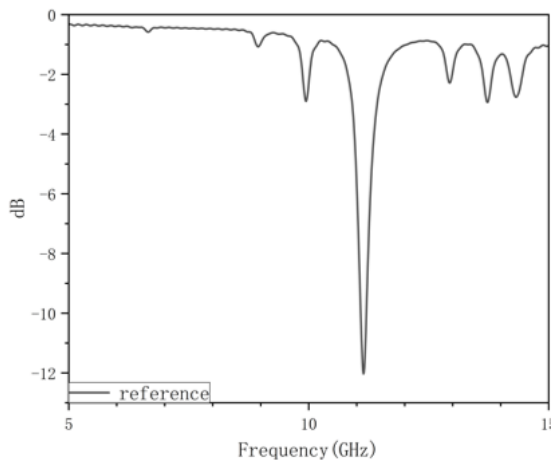


图 5 传感器参考频率

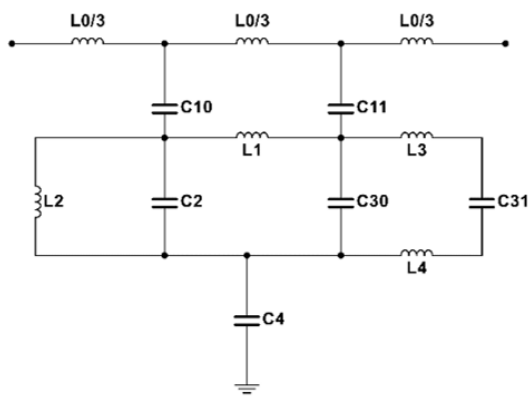


图 6 加入金属物块后的等效电路

缺陷检测仿真借助 CST 仿真软件，对金属样品执行相减操作，模拟出不同尺寸的缺陷。以深度 2mm、宽度分别为 300 μm 、400 μm 和 500 μm 的缺陷为例，如图 7 所示，仿真结果显示谐振频率偏移均在 1GHz 以上，充分证明该结构传感器能够精准分辨出不同缺陷宽度，且对 100 μm 的微小宽度变化也能灵敏的检测到。这主要归因于待测金属表面缺陷尺寸的改变，直接导致等效电容 C4 的大小发生变化，从而引起谐振频率的相应变化。

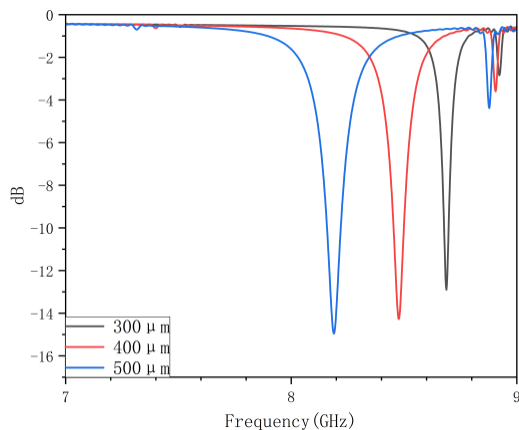


图 7 较大宽度缺陷的仿真结果

为深入评估所设计传感器对更小尺度缺陷的检测能力，继续设计并实施了针对深度为 2mm、宽度分别为 100 μm 和 200 μm 的微小尺寸缺陷的检测仿真实验。仿真结果清晰地表现了传感器在针对此类微小缺陷时的检测性能，其检测精度与灵敏度均维持在较高水平。如图 8 所示，该传感器能够精准地识别并分辨出这些微小缺陷的宽度差异，且在检测过程中所记录的频率偏移量稳定保持在 1GHz 左右，这一显著的频率变化为微小缺陷的准确检测提供了可靠的信号依据，进一步验证了传感器在高精度缺陷检测领域的应用潜力。

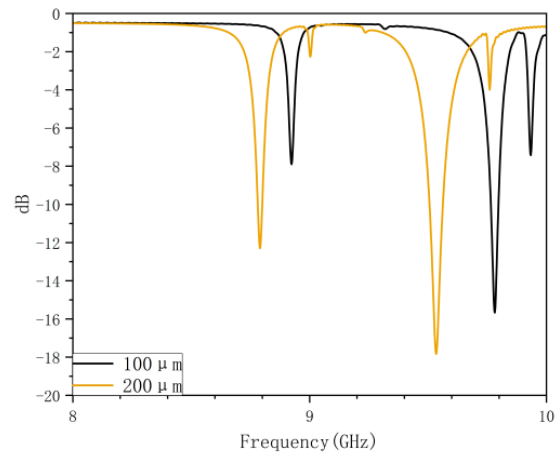


图 8 小尺度缺陷的仿真结果

3 结语

论文设计并实现了一种新型近场微波传感器，其核心结构基于接地平面缺陷。该传感器的设计严格遵循物理模型，以降低传感器整体的有效电容并相应提升谐振频率为主要目标。在制造工艺方面，该传感器采用成本相对较低且易于获取的印刷电路板 (PCB) 技术进行制备，确保了其在实际应用中的可行性。

在对深度为 2mm、宽度变化为 100 μm 的微小裂纹进行的检测仿真中，该传感器有着较为不错的性能，能够实现 1GHz 的谐振频率偏移。这一结果不仅凸显了传感器在高灵敏度检测方面的可行性，而且也证实了其亚毫米级裂纹无损检测的潜力。此外，该传感器的高灵敏度特性使其在材料传感与表征等相关应用领域同样具有广泛的应用价值，为相关科学研究和工业应用提供技术支持。

参考文献:

- [1] Hui Li. Effects of different structural parameters on the 7075-T651 aluminum alloy lug structure fatigue life[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2022.
- [2] 李路明. Magnetic Flux Leakage Testing Methods for Cast Iron Lids[J]. JOURNAL OF TSINGHUA UNIVERSITY(SCIENCE AND TECHNOLOGY), 2002.
- [3] 朱娟花, 吴昂, 何辅云. 一种对超声波连续检测系统中回波信号处

- 理的新方法[J].工业计量,2005,15(5):3.
- [4] Ai Yibo. A Defect Detection Method for the Surface of Metal Materials Based on an Adaptive Ultrasound Pulse Excitation Device and Infrared Thermal Imaging Technology[J]. Complexity,2021(1):1-9.
- [5] Albishi A M, M S Boybay, O M Ramahi. Complementary split-ring resonator for crack detection in metallic surfaces[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters,2012,22(6):330-332.
- [6] 黎鹏.基于微波透射法的复合绝缘子硅橡胶老化状态检测方法[J].电工技术学报,2023,38(23):6503-6513.
- [7] Gao Peng, Zhang Chunmin. Resonant frequency of triangle split resonant rings[J]. Optical Engineering,2012(51):1.
- [8] Yu Shumin. Reduction of the Noise Level in Mutual Inductive Magnetic Sensors with a Magnetic Circuit Differential[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2022(56):169776.
- [9] Albishi Ali M, Omar M Ramahi. Microwaves-based high sensitivity sensors for crack detection in metallic materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2017,65(5):1864-1872.

作者简介:王自强(2004-),女,本科。

通讯作者:唐亚南(1988-),女,博士,讲师,从事电力系统、电子信息方向的研究。

基金项目:成都工业学院省级大学生创新创业训练计划(项目编号:202411116070):基于微波技术的金属材料微小缺陷检测研究。