

# 一种基于 CSRR 传感器的金属管道缺陷检测方法

刘茂德 陈映竹 陈楠 李俊杰\*

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:** 金属管道是工业及日常基础设施, 负责输送流体、气体。长期高压、高温或腐蚀环境下, 管道表面易现裂纹、腐蚀坑、磨损, 影响强度和密封性, 可能导致泄漏、爆炸, 严重威胁安全。因此, 及时准确检测金属管道表面缺陷至关重要。检测能发现隐患、延长寿命、保障生产稳定。谐振法因非接触、高精度、快速响应等优势受青睐, 通过激励管道表面谐振识别缺陷。论文提出基于互补开口谐振环 (CSRR) 的微带传感器, 仿真中成功检测金属铜上 20~50 $\mu\text{m}$  缺陷。

**关键词:** CSRR; 传感器; 金属管道表面缺陷; 无损检测

## A Method for Detecting Defects in Metal Pipes Based on CSRR Sensors

Maode Liu Yingzhu Chen Nan Chen Junjie Li\*

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

**Abstract:** Metal pipes are industrial and daily infrastructure, responsible for transporting fluids and gases. Under long-term high pressure, high temperature or corrosive environment, the surface of the pipeline is prone to cracks, corrosion pits, wear, affect the strength and sealing, may lead to leakage, explosion, serious threat to safety. Therefore, timely and accurate detection of metal pipe surface defects is very important. Detection can find hidden dangers, extend life, and ensure stable production. The resonance method is favored for its advantages of non-contact, high precision and fast response, and defects can be identified by the resonance of the excitation pipe surface. In this paper, a microstrip sensor based on the complementary open resonant ring (CSRR) is proposed, which successfully detects 20 $\mu\text{m}$  to 50 $\mu\text{m}$  defects on copper in simulation.

**Keywords:** CSRR; sensor; surface defects of metal pipes; nondestructive testing

### 1 概述

金属管道在工业领域, 特别是城市供水、燃气及石油化工中至关重要, 其高强度、导热性、承压能力和维护便利性, 使其在高压、高温或特殊介质环境下稳定运行, 有效抵抗腐蚀, 展现结构稳定性。作为现代物流的关键, 金属管道提高了运输的安全性和精确性, 确保了介质的纯净度和安全。然而, 金属管道的安全维护同样关键, 表面的微小缺陷可能构成安全隐患, 直接关系到公共安全与环境保护。因此, 加强日常管理, 采用科学检测手段, 是确保金属管道安全高效运行的重点。

目前, 无损检测技术中, 非谐振法如漏磁检测、涡流检测、超声波检测和射线检测, 均能对金属表面缺陷进行检测, 但各有优缺点。漏磁检测易于自动化、可靠性高, 但受形状和提离值影响; 涡流检测非接触、扫描快, 但仅适用于表面缺陷, 需专业人员分析; 超声波检测穿透性强、定位准确, 但结果不直观、定量有偏差, 操作要求高; 射线检测灵敏度、检出快, 但不适用于放射性、磁性和易腐蚀材料, 对人体有害、操作难、成本高。

为了检测金属管道内部缺陷, 设计了基于 CSRR 结构的传感器进行谐振法检测。谐振法检测在金属管道缺陷检测中展现出显著优势, 不仅提供高精度数据, 准确识别微小缺

陷, 而且无需穿透材料, 避免材料损伤。此外, 谐振法检测灵活, 不受管道材质、形状和尺寸限制, 能应对各种复杂环境下的检测需求。结合先进的信号处理技术, 谐振法检测在金属管道缺陷检测领域更加实用和具有竞争力。

为了检测金属管道内部的缺陷, 设计了一种基于 CSRR 结构的传感器进行谐振法检测。谐振法检测在金属管道缺陷检测领域同样展现出显著优势。它不仅能够提供高精度的检测数据, 从而准确识别出管道内部的微小缺陷, 而且与超声波检测等方法相比, 无需直接穿透材料, 有效避免了因检测过程可能带来的材料损伤。此外, 谐振法检测具有极高的灵活性, 不受管道材质、形状和尺寸的限制, 能够应对各种复杂环境下的金属管道缺陷检测需求。在电学激励谐振器的检测系统中, 结合先进的信号处理技术, 可以进一步提升检测效率和准确性, 使得谐振法检测在金属管道缺陷检测领域更加具有实用性和竞争力。

谐振法和非谐振法相比, 谐振法拥有更高的测量精确度<sup>[1]</sup>。通常情况下只需要知道某一频点的材料特性, 所以谐振法是对材料介电常数进行测量的重要手段<sup>[2]</sup>。

论文提出了一种基于 S21 参数和互补开口谐振环 (CSRR) 的微波无损检测方法, 用于检测金属管道表面的微小缺陷。通过建模和仿真, 该方法成功地在铜金属表面检

测出了宽度范围为 20~50μm 的缺陷, 并发现随着缺陷宽度的增大, 谐振频率会显著向更高频率迁移, 其变化趋势相对单调, 展现了 CSRR 微波探测技术在金属管道缺陷宽度检测方面的良好发展前景。

## 2 CSRR 理论及其结构

2004 年, F.Falcone 提出了一种衍生结构——互补环形共振器 (CSRR), 其为环形共振器 (SRR) 的互补形式<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示。该结构通过在金属平面上刻蚀出两个具有相对位置开口的缝隙而形成。SRR 可被视为一个能够被轴向磁场激发的独立磁偶极子, 而 CSRR 则本质上表现为一个能够被轴向电场激发的电磁力偶极子。尽管 CSRR 与 SRR 在结构上存在差异, 但它们具有相同的电磁特性。当这两种结构与微带线结合形成平面谐振腔时, 其所表现出的耦合激励却有所不同: SRR 实现电耦合, 而 CSRR 则实现磁耦合<sup>[4]</sup>。在微波器件中, CSRR 相较于 SRR 展现出更强的束缚电磁场能力, 因此具有更为广泛的应用前景。

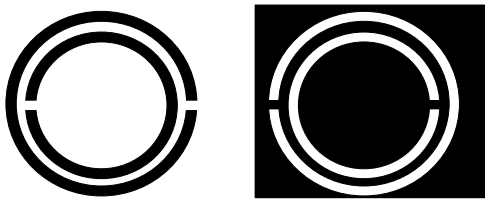


图 1 SRR 结构 (左); CSRR 结构 (右)

当电磁波照射到互补开口环谐振器 (CSRR) 上时, 电场的变动会在其内外金属部分诱发电感效应。同时, 位于内外金属之间的凹槽区域则会产生电容耦合效应, 这两种效应共同作用, 显著地形成了电谐振现象。因此, CSRR 可以通过一个 LC 谐振电路来进行等效表示。图 2 展示了 CSRR 结构的等效电路模型, 其中该电路中的电感分量为  $L_0$ , 其表达式为:

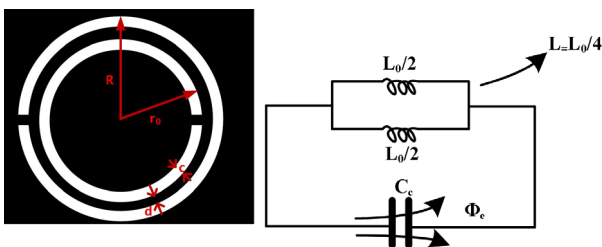


图 2 CSRR 结构及其等效电路模型

$$L_0 = 2\pi r_0 L_{pul} \quad (1)$$

其中,  $L_{pul}$  代表的是环与环之间, 每单位长度上所具有的电感值。而  $C_c$  的表达式为:

$$C_c = \frac{4\epsilon_0 L_s}{\mu_0} \quad (2)$$

$L_s$  表示 CSRR 对应的互补结构 SRR 的总等效电感, 它

为 SRR 双环固有电感  $L_p$  和双环之间的互感  $L_m$  之和,  $L_p$  和  $L_m$  表达式分别为:

$$L_p = \mu_0 R \left( \log \frac{32R}{c} - 2 \right) \quad (3)$$

$$L_m = \mu_0 \left[ \left( 1 + \frac{3\xi^2}{4} \right) \log \frac{4}{\xi} - 2 \right] \quad (4)$$

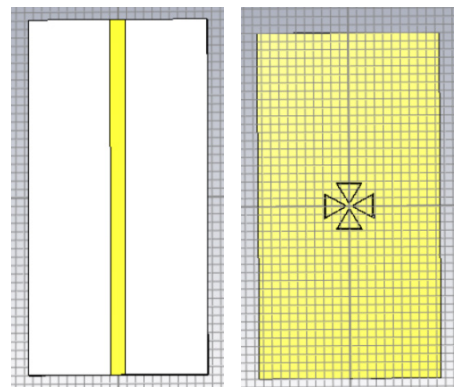
CSRR 的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (5)$$

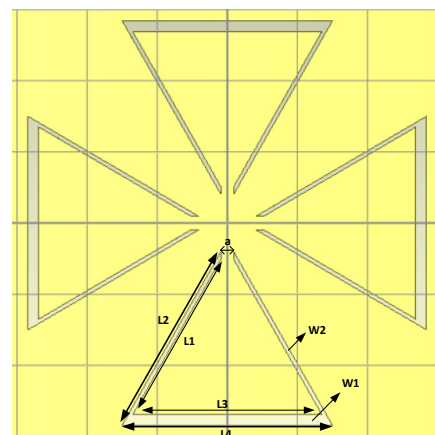
## 3 传感器设计与分析

基于 CSRR 谐振特性, 我们通过分析缺陷宽度与谐振频率的关系, 可推算缺陷宽度。本文设计的 CSRR 传感器基板采用 RogersRO4003C (介电常数=3.55, 厚度 0.813mm), 仿真软件计算得特征阻抗 50Ω 时, 微带线宽为 1.77mm。

如图 3 (b) 所示, 传感器的宽度  $w_1$  为 0.2mm,  $w_2$  为 0.05mm, 开口宽度  $a$  为 0.19mm, 边长  $L_1$  为 2.51mm,  $L_2$  为 2.81mm,  $L_3$  为 2.7mm,  $L_4$  为 3mm。这四个三角形的结构完全相同, 它们是以其中一个为基准, 依次顺时针旋转 90 度的方式获得的。



(a) 传感器俯视图 (左); 传感器仰视图 (右)



(b) 传感器结构图

图 3 CSRR 传感器结构模型

论文所设计的 CSRR 传感器表面的电场分布如图 4 所

示。仿真结果表明，电磁能量能够有效地被 CSRR 结构聚集于其周围，电场幅度的数量级达到五次方，从而有利于对金属表面缺陷的检测与测量。

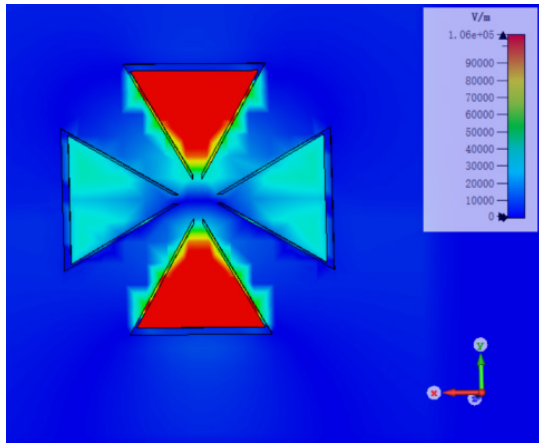


图 4 CSRR 传感器模型在频率 15.3GHz 时电场分布

如图 5 所示，为了检验传感器检测金属管道表面缺陷的能力，将一块材质为铜，电导率为  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，表面有裂隙的金属薄膜放到传感器下方，距离传感器 0.05mm。

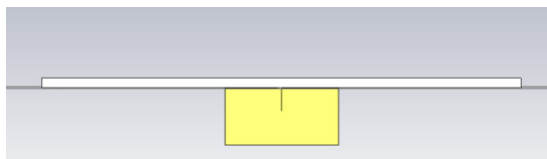


图 5 传感器和被测金属模型

测量所得不同缺陷情况下的反射系数模拟结果如图 6 所示，该结果表明，随着缺陷宽度从 0.02mm 到 0.05mm 的逐渐增加，谐振频率在 14.8~15.2GHz 显著向较低频率方向迁移，并且其变化趋势相对单调。利用这一结果，可以测量金属管道缺陷的宽度。

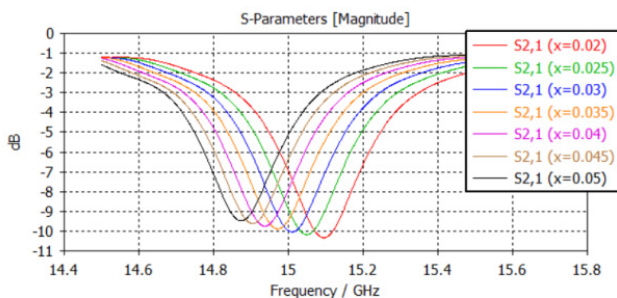


图 6 不同缺陷宽度下 S21 的模拟结果 (x 为缺陷宽度)

## 4 结论

金属管道缺陷的产生与多种因素有关，而缺陷的存在

与否及其程度在管道的安全性和运行效果上也起着至关重要的作用。在金属管道的制造或使用过程中，若存在微小的缺陷，如裂纹、夹杂物或腐蚀坑，这些缺陷很可能会加速管道的劣化过程，降低其使用寿命，甚至引发严重的安全事故，无法有效保障介质的输送。因此，对金属管道进行严格的缺陷检测，是确保管道系统安全可靠运行、预防事故发生的关键环节。

论文设计了 CSRR 测量传感器，经仿真分析，系统性检测了不同宽度金属表面缺陷，验证了 CSRR 结构的适用性。实验显示，传感器数据与缺陷宽度明确相关，能准确推导缺陷宽度，证明了传感器的精确度与可行性。该传感器可用印刷电子技术制造，优点包括高度集成、降低成本、柔性设计与制造，提高适应性和可靠性。印刷电子技术的高效低成本使大规模生产更可行，且传感器小巧便携。

论文提出了一种微波无损检测方法，利用 S21 参数反映的结果推测金属管道表面缺陷的宽度。通过建模对金属管道表面缺陷进行检测研究，在铜金属表面切割出的缺陷宽度范围为 0.02~0.05mm，随着缺陷宽度的增大，谐振频率显著向更高频率迁移，其变化趋势相对单调。基于 CSRR 微波探测技术对缺陷宽度的检测展现出良好的发展前景。然而，在实验中发现，当被测物体中含有较多杂质时，传感器的检测效果受到一定影响，亟需开展进一步的研究。值得指出的是，本实验仅为初步研究，所得结论为后续更深入研究奠定了基础，并积累了一定的经验。后续实验将着重改进缺陷宽度的检测方法。

## 参考文献:

- [1] 刘勇,陈昌明,高睿.基于芯片集成波导的湿度传感器设计[J].传感器与微系统,2018,37(2):89-91.
- [2] 赵文强,武鑫磊,景辉辉,等.基于芯片集成波导加载开口环的介电测量传感器[J].传感器与微系统,2024,43(1):107-110.
- [3] F Falcone, T Lopetegi, J D Baena, et al. "Effective negative-stop-band microstrip lines based on complementary split ring resonators," IEEE Microw[J]. Wireless Compon. Lett.,2004, 14(6):280-282.
- [4] 甘宏伟.基于互补开口谐振环(CSRR)的高性能、小型化平面式微波传感器设计[D].杭州:杭州电子科技大学,2021.

作者简介: 刘茂德 (2003-), 男, 本科。

通讯作者: 李俊杰 (1976-), 男, 本科, 讲师, 从事电气工程教学与研究。

基金项目: 四川省大学生创新训练项目 (项目编号: S202411116055), 校级大学生创新创业训练计划 (项目编号: QM2024020、QM2024064)。