

基于互补型开环谐振结构的液体含水率研究

王未来 陈映竹 刘茂德 陈楠 王自强

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: 随着工业自动化的发展, 对实时、准确、高效的浓度测量需求日益增加, 而传统测量方法技术复杂, 对液体纯度有较高要求, 适应性差。论文提出了一种基于互补开环谐振结构 (CSRR) 的油水浓度传感器, CSRR 是一种常用于微波频段的电磁谐振器, 在测量时, 传感器无需直接接触液体, 仅通过电磁场相互作用来进行检测, 避免了液体污染或接触带来的问题。仿真结果表明, 所设计的传感器具备宽频率响应范围、尺寸紧凑、非接触式传感以及高选择性的特性, 这些优点使其在多功能传感器应用领域展现出巨大的应用潜力。

关键词: 微波; CSRR; 非接触式; 液体含水率

Research on Liquid Water Content based on Complementary Split-ring Resonator

Weilai Wang Yingzhu Chen Maode Liu Nan Chen Ziqiang Wang

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

Abstract: With the development of industrial automation, the demand for real-time, accurate, and efficient concentration measurement is increasing. However, traditional measurement methods are technologically complex, have high requirements for liquid purity, and have poor adaptability. This paper proposes an oil-water concentration sensor based on a Complementary Split-Ring Resonator (CSRR). CSRR is an electromagnetic resonator commonly used in the microwave frequency band. During measurement, the sensor does not need to directly contact the liquid but only detects through electromagnetic field interaction, avoiding problems caused by liquid contamination or contact. Simulation results show that the designed sensor has a wide frequency response range, compact size, non-contact sensing, and high selectivity. These advantages make it show great application potential in the field of multi-functional sensors.

Keywords: safety microwave; CSRR; non-contact; liquid moisture content

0 前言

在当今社会, 测量油水混合物浓度意义重大。于工业而言, 石油开采与精炼时, 精准的浓度数据可助力优化开采流程, 合理配置资源, 提升原油产出, 降低成本。化工生产中, 精确把控能保障产品质量达标, 减少次品率, 增强企业竞争力。聚焦生态领域, 污水处理厂凭借精准测量, 高效净化含油污水, 避免污染自然水体, 守护水域生态。海洋环境监测方面, 及时知晓油水浓度, 能迅速判断油污泄漏危害, 为抢险救灾提供关键依据, 保障海洋生态可持续, 其重要性不言而喻。

目前已研制出来的几种用于油水浓度测量的技术, 包括密度法、电导率法、光学法以及声波法。密度法通过测量油水混合物的密度, 利用油和水的密度差异来计算油水的比例, 但精度较低, 容易受到温度、压力等因素的影响^[1]。电导率法根据油、水电导率不同, 测量油水混合物的电导率, 能够间接推算油和水的比例, 可在线监测油水浓度, 但易受到其他溶解物质的干扰^[2]。光学法通过测量油水混合物的光透过率来判断油水浓度。油水混合物中油的浓度越高, 透光率越低。根据光的透过率与油水浓度的关系, 计算油水浓度, 能快速无损的测量, 但对样品颜色、浑浊度等要求较高^[3]。

声波法利用声波在不同物质中的传播速度、衰减系数和反射特性的不同来测量油水混合物的浓度, 采用非接触式测量, 可以精确分析浓度, 但设备成本较高, 且有专门的算法需要专业人员操作^[4]。

论文所提出的利用 CSRR 传感器测量油水浓度的方式具有显著优势, 一方面, 它能让被测样品与传感器无需直接接触, 便于更换, 提供精确、可靠的浓度检测结果; 另一方面, 该测量方式易于操作、可重复使用, 且传感器本身紧凑、低成本、易于制造。

1 理论

2004 年, F. Falcone 提出了 CSRR 结构, 它是 SRR 的衍生结构, 也是 SRR 的互补形式^[5], 如图 1 (a) 所示, 它是在金属平面上通过刻蚀工艺做出两个带有相对位置开口的缝隙。SRR 主要可以被认为是一个可以被轴向磁场激发的独立磁偶极子, 而 CSRR 本质上表现为一个可以被轴向电场激发的电磁力偶极子。CSRR 与 SRR 虽然结构不同, 但有着相同的电磁特性。而它们与微带线组合成平面谐振腔结构后, 所表现的耦合机理是不同的: SRR 为电耦合, CSRR 磁耦合。在微波器件中, CSRR 相比 SRR 有更强的束缚电磁场能力, 因而应用更加广泛。

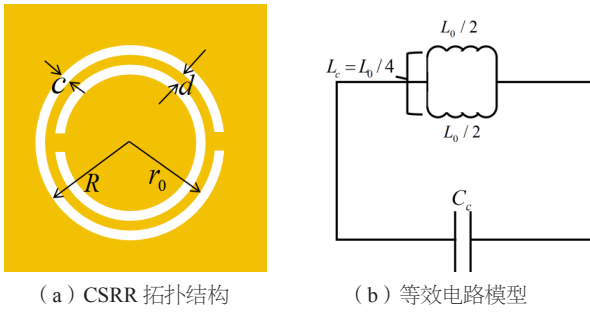


图 1 CSRR 结构及其等效电路模型

当电磁波入射到 CSRR 上时, 电场的变化会使得结构内外部金属上产生电场效应, 而内外金属之间的凹槽会产生电容耦合效应, 从而形成明显的电谐振效应, 因此 CSRR 可以用 LC 谐振电路来表示, 如图 1 (b) 所示为 CSRR 结构的等效电路模型。图中, L_0 可以表示为:

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

其中, L_{pul} 是环之间的每单位长度的电感。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, 分别表示为:

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

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

最后, CSRR 结构的谐振频率为:

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

2 传感器设计与分析

论文设计的 CSRR 传感器结构如图 2 所示, 其具体尺寸为长 $L=42\text{mm}$, 宽 $w=21\text{mm}$, 基板厚度为 $t_1=0.813\text{mm}$, 微带线宽为 $w_f=1.77\text{mm}$, 地铜厚度为 $t=0.035\text{mm}$, 传感器内圆环半径为 $r_1=1.26\text{mm}$, 外圆环半径为 $r_2=1.4\text{mm}$, 这三个圆环结构完全相同, 以其中一个为基准, 依次旋转 120° 的方式获得, 且三个圆心距离为 $d=3\text{mm}$ 。

如图 3 所示, 传感器下面是一层厚度为 0.1mm , 相对介电常数为 2.5 , 损耗正切为 0.003 的亚克力材料, 亚克力下面是高度为 5mm , 长宽都为 10mm 的油。

论文所描述方法在油水混合时可使用 AS7240B 超声波清洗器使油水混合超声波清洗器内部通常装有一个超声波换能器, 该换能器通过把电信号转化为高频机械波 (通常频率为 $20\sim 400\text{kHz}$), 产生超声波振动。当超声波作用于液体当中时会形成微小的气泡, 接着气泡会膨胀变大, 最后由于周围液体的挤压而破裂, 这个过程称为空化效应。空化效应既能使物体表面附着的无法剥离的污渍脱落, 也能够加速物质溶解, 甚至还能够将不相融的物质进行融合形成乳化。

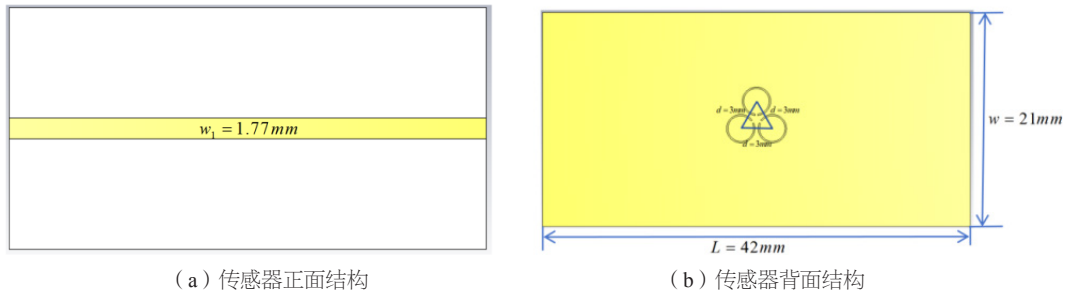


图 2 传感器结构

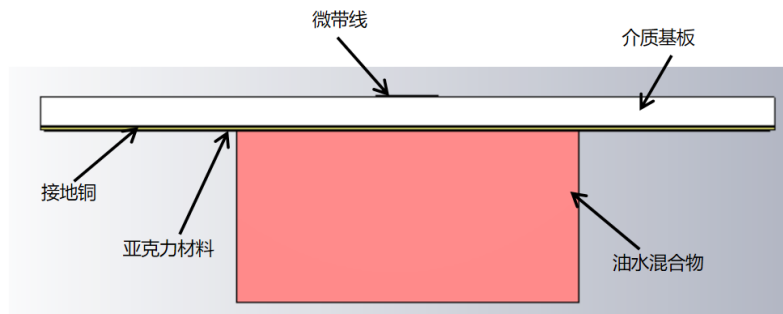


图 3 传感器待测物模型

测量不同含水率的反射系数模拟结果如图 4 所示，从结果中看出，在 8GHz 到 10GHz 中，含水率增加，相应的插入损耗 S₂₁ 越小，并且其变化趋势相对单调，测量效果更显著。利用这一结果，可以更好的测量和监测含水率的变化。

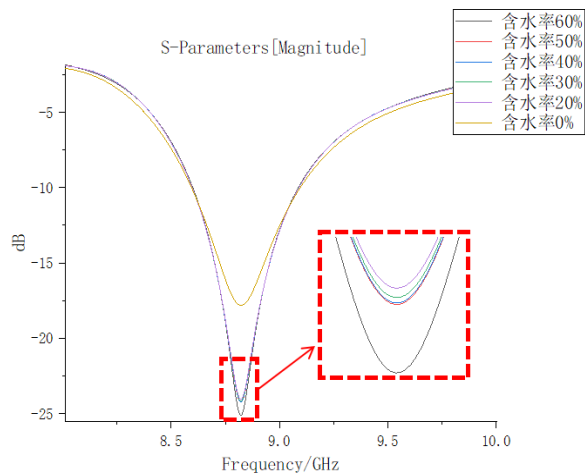


图 4 不同含水率的 S₂₁ 模拟结果

3 结论

在当今全球化进程加速、各领域紧密关联的背景下，精确测量油水混合物浓度有着多层面的关键意义。在工业范畴，石油开采与炼化作为经济支柱产业，精准的浓度数据非常重要。开采前期，依此优化钻井布局、筛选合适工艺，提升采收率；炼化时，精准调配确保油品质量，降低次品风险，为企业节约成本、增强市场竞争力。在环保领域，城市生活污水与工业废水含油量高，精确测量是污水净化处理的核心环节。它助力污水处理厂精准投药、高效分离油污，保障处理后水质达标排放，守护城市水生态。在海洋中，航运、近海石油开采偶发油污泄漏，及时测定油水浓度能迅速圈定污染范围、预估危害程度，为制定抢险方案提供资料，保护海洋生物繁衍生息，维系全球生态稳定。

论文模拟设计了一种互补开口环谐振器（CSRR）的二元混合物浓度传感器。通过 CST 软件仿照模拟检测了 6 种不同浓度的油水混合物，分析模拟数据中谐振频点或谐振点深度与混合物浓度的关系，得出所提出的传感器加载液体的方式，可以使被测样品不与传感器直接接触且便于更换，因此传感器可以短时间内进行多次测量。论文设计的液体浓度传感器，不仅具备小型化、非入侵性和高灵敏度的特点，而且易于操作、可重复使用，同时展现出紧凑、低成本且易于制造的优势，为传感器技术的发展提供了重要依据，展现出在未来传感领域巨大的应用潜力。然而论文的工作具有一定的局限性，该传感器谐振曲线的半波长带宽过宽导致相对品质因子相对较低，还需要对此传感器结构进行进一步改进。传感器系统的完整性不足，需要借助外界硬件设备和信号源才能实现对液体的测量，因此，需要对该研究进行进一步改进和深入研究。

参考文献：

[1] 牟亮.基于密度法原油含水率在线测量技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.

[2] 赵东亮.磁声耦合油水两相电流率测量激励方式研究[D].西安:西安石油大学,2022.

[3] 申守庆.能分辨油、水、气的光学传感器[J].石油机械,2000(7):65.

[4] 胡学梅.基于微波技术成品油含水率检测方法的研究[D].长春:吉林大学,2022.

[5] 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：王未来（1998-），男，硕士，助教，从事电子信息研究。

基金项目：校级大学生创新创业训练计划《用于成品油含水率检测的微波传感器研究》（项目编号：QM2024064）；校级大学生创新创业训练计划《基于人工蜂群膜算法的电力系统经济负荷分配系统》（项目编号：QM2024008）；四川省大学生创新训练项目《基于膜优化算法的梯级水光蓄互补发电能量优化系统》（项目编号：S202411116067）。