

文章编号: 2096-1618(2024)06-0649-05

一种应用于探测混合液体媒质微小介电变化的实验系统

孙俊阳¹, 黄何平²

(1. 河南工程学院土木工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 西南民族大学电子信息学院 电子信息工程国家民委重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:随着微波非侵入式测量技术的高速发展,微波平面谐振电路因其具有高可靠性、高性能等特点被广泛应用于液体组分精确测量领域。提出一种基于微带结构的对称型射频电路,该电路包括一对正面开口环谐振器(SRR)、多交指电容(IDC)和背面蚀刻的互补开环谐振器(CSRR),在微带线电场强度最大的区域刻蚀 CSRR,从而提高测量灵敏度,并基于该电路设计了材料介电特性微小变化非侵入式测量实验系统。为进一步解决常规平面传感器载物台结构复杂、测量需要精确控制液体体积等问题,提出一种3D打印溶液装载结构,利用微流体控流装置实现待测溶液的精确控制和便捷更换。通过对该检测电路加工测试,利用不同浓度的乙醇水溶液标准检测液实时非侵入式测量,并利用神经网络算法对不同浓度的乙醇溶液进行测量,结果与文献值吻合的很好,相对误差可控制在5%以内。证明该微波电路对混合溶液材料浓度微小变化探测的高灵敏度和可靠性。

关键词:微波非侵入式测量;开口环谐振器;3D打印

中图分类号: TN92-34

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.001

0 引言

众所周知,微波在不同材料的传播过程中的损耗和反射都不同,根本原因就是不同材料的复介电常数存在差异。材料介电特性是材料在电磁环境中的基本属性,其中介电常数由实部和虚部构成:实部主要描述材料对电磁能的储存能力,虚部描述材料对电磁能量的吸收能力。液体材料对高频电磁信号的响应取决于材料的复介电常数,测量液体的介电常数对于生物医学、保健、食品、饮料、化工和药品质量控制等领域具有很高的应用价值^[1-2]。例如,精确的介电常数测量有助于获得化学工业中混合有机液体的浓度^[3]。在药理学中,可以通过测量生物组织的介电常数随时间的变化趋势来监测其培养状况^[4]。因此,对于常见介质材料及化工流体的质量评估和精确监控急需一种快速、准确的合适测量技术。

在诸多溶液浓度检测技术中,利用电磁(EM)波入射和反射方法引起了人们极大的兴趣。国内外关于物质(固态、液态、气态)介电常数测量的微波电路主要基于微带、共面波导以及同轴传输线等射频电路设计加工而成,采用的测量方法主要分为谐振和非谐振法^[5-10]。谐振法的优点是利用特别设计的谐振电路单元,激发电磁波与待测材料在特定位置的相互作用强度,并通过矢量网络分析仪测量电路的谐振频率偏移和幅度值,从而提取材料的介电常数。该方法优点是

可以进行窄带、高损耗材料介电常数测量。非谐振法是将待测样品及测量装置等效为多端口微波网络参数,利用传输法、空间反射法等方法测量待测材料的介电特性,该方法具有宽频带测量特性,不足之处是对于低损耗物质,准确性无法进一步提高。同时,针对以上两种检测方法,基于波导等结构的检测电路往往尺寸较大,且整体加工价格较高,无法大规模应用。而基于平面传输线的微波测量传感器由于其成本低、重量轻、可兼容性强等优点,近年来国内外研究较多。Ansari等^[11]提出一种基于互补开环谐振器(CSRR)的设计方法,通过对电磁谐振器频率响应的变化实现了对材料介电变化的实时检测分析。Ansari等^[11]还提出由两个同心环组的CSRR,在相对位置引入两个间隙,并蚀刻在微带线的接地平面上,以实现阻带滤波特性。在此技术中,将被测材料(MUT)放置在被激发CSRR的高场强区域内,从而改变谐振频率的响应。Lee等^[12]提出一种工作频带为2~4 GHz的方形CSRR传感器,利用谐振频率偏移量测量多层固体介质介电常数实部,并且证明优化传感器的几何尺寸可提高测量分辨率。Chuma等^[13]提出一种工作频率为2.4 GHz的矩形CSRR微波液体介电常数传感器,该传感器将微流体通道作为样品容器垂直穿过传感器中央,将测量样品置于玻璃毛细管内,通过替换载有新样品的毛细管,可快速分析液体的介电性能。Ebrahimi A等^[14]提出一种基于超材料单元激励微波传感器的矩阵模型方法,传感器主要部分由微带线耦合CSRR构成,采用微流体通道加载被测液体水平置于CSRR表面。可同

时测量被测液体的复介电常数实部和虚部。Withawat 等^[15]提出一个基于单开口环谐振器和基于介质集成波导(SIW)结构,用于检测液体样品介电特性,该系统可以有效地提高电磁场与待测样品之间的相互作用强度,最终实现对不同浓度乙醇水溶液的复介电特性参数表征。

然而现有的技术仍存在以下问题:随着测量频率的提高、波长的缩短,相应的测量技术也面临着新的挑战,如测量装置尺寸更小使得实际操作困难,装置更易受到测量环境的影响而导致灵敏度不高等。针对以上问题,廖崇蔚等^[5]和晏晗等^[6]提出基于 SIW 谐振器的材料介电特性测量装置,通过在末端减少金属化过孔和缝隙以增加其电磁辐射,并与矢量网络分析仪构成测量系统,提升了测量灵敏度。

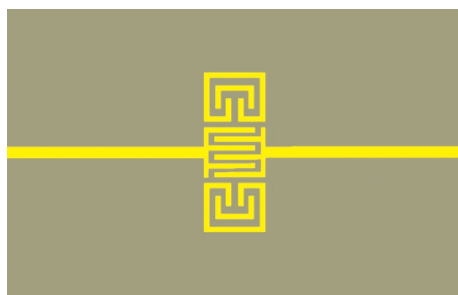
为进一步提高液体溶液介电特性的测量精度,本文提出一种基于微带结构的对称型射频电路,该电路包括正面的一对开口环谐振器(SRR)、多交指电容(IDC)和背面蚀刻的互补开环谐振器(CSRR),在微带

线电场强度最大的区域刻蚀 CSRR,从而提高灵敏度,并基于该电路设计材料介电特性非侵入式测量实验系统。通过对该检测电路加工测试,结合参考材料微小组分变化进行实时非侵入式测量,分析传感器结构中关键参数对传感系统测量性能的影响。

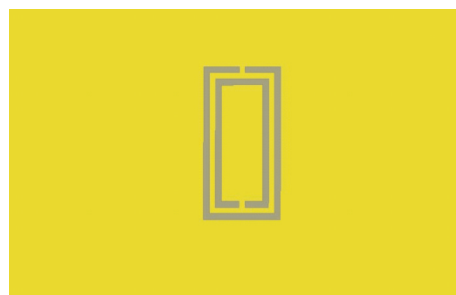
1 传感器结构与仿真性能分析

1.1 电路工作原理

基于缺陷地结构的微带型传感器包括正面开口环谐振器(SRR)、多交指电容(IDC)和背面蚀刻的互补开环谐振器(CSRR)。在电路垂直方向分别嵌入一对变形的 U 型环,实现开口环谐振特性。传感器的每个端口为 $50\ \Omega$ 。对称型测量电路结构如图 1 所示。该电路板材为 Rogers R3010 基板 ($\epsilon'_r = 10.20$, $\tan\delta = 0.0001$, 厚度 $h = 1.28\ \text{mm}$), 端口宽度和长度分别为 $1.20\ \text{mm}$ 和 $20.00\ \text{mm}$, 整体电路尺寸为 $30.00\ \text{mm} \times 46.00\ \text{mm}$ 。



(a) 正面



(b) 背面

图1 微波测量电路结构图

由集总元件 SRR、CSRR 和 IDC 组成的微波电路,其等效电路如图 2 所示。 C_R 代表 SRR 和 IDC 单元间的耦合电容, C_S 代表 CSRR 和 SRR、IDC 的耦合电容, L_R 代表 SRR 和 IDC 耦合电感, L_0 代表传输线电感。其中多枝节交指结构和 CSRR 和 SRR 水平方面耦合电容和上下耦合电容将被视为介电特性的敏感区域。根据谐振理论并考虑对称结构的射频信号对消原理,其工作原理基于微扰理论,由 SRR、CSRR 和 IDC 单元的等效串联电容可以用作电磁场敏感区域,实现更高的灵敏度。该射频电路谐振频率和品质因数可分别由式(1)~(4)给出。

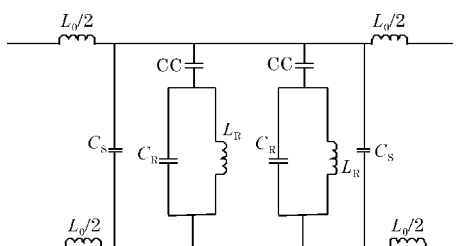


图2 等效电路

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 \left(\frac{C_R + C_C + C_R \times C_C}{C_S + C_C} \right)}} \quad (1)$$

$$C_S = C_{S0} + \epsilon'_r C_{MUT} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (3)$$

$$f_0 = F_1(\epsilon'_r, \epsilon'_r) \quad (4)$$

$$Q = F_2(\epsilon'_r, \epsilon'_r)$$

上述讨论表明,当被测材料(MUT)放置在传感区域上时,样品的有效介电常数值的变化会导致 SRR 单元附近等效电容发生变化,进而导致材料介电特性的对应变化。通过将两个电容耦合 CSRR 和 IDC 单元引入强耦合结构,实现材料介电特性的高灵敏度非侵入式测量。将待测材料的样品覆盖并尽可能接近 CSRR,相当于在原等效电路上并联一个电容,此时,将待测材料样品的电容用 C_{MUT} 表示。因此,令 $C_S = C_{S0} + C_{MUT}$, C_{S0} 为没有放置待测物样本时 CSRR 的固有电容。一旦传感器的结构确定,其等效电容、固有电感、耦合电容等均为

固定值,谐振频率只与待测样本的电容 C_{MUT} 有关。对传感器测量区域进行高频电磁仿真,分析其电磁分布特性。通过不同浓度乙醇水溶液研究滴入不同体积组分样品对测量结果的影响。此外,通过对不同液体谐振频率及其反射系数的重复测量。

1.2 实物制作与测量

基于设计的模型尺寸,测量装置制作在介电常数为10.2、厚度为1.28 mm的 Rogers 板材上。该射频传感电路选用 R3010。实验测量系统主要由非侵入式测量电路和矢量网络分析仪组成 (Rohde & Schwarz ZVB20) 组成。具体实验装置如图3所示。

测量实验中,借助 R&S ZNB20 矢量网络分析仪对文中射频电路测量装置的散射参数进行测量。矢量网络分析仪的端口1和端口2通过传输线分别与射频电路两端的 SMA 接口相连,测量前对矢量网络分析仪进行了双端口校准。然后用同轴线将测量装置的两个端口与矢量网络分析仪的端口对接。在一定的温度和湿度下将被测混合溶液放入3D打印的塑料腔体中,即可测量得到系统的散射参数。

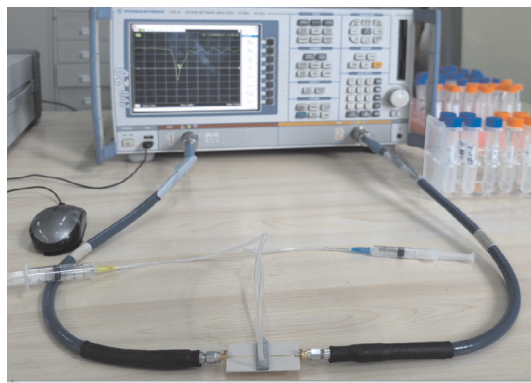
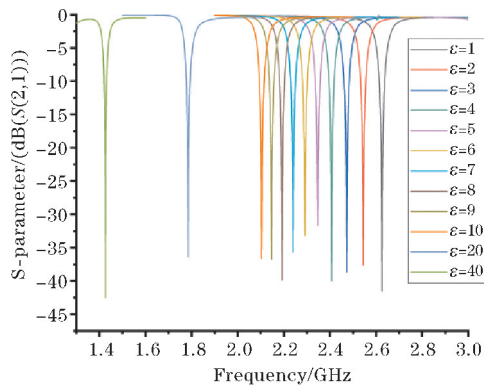
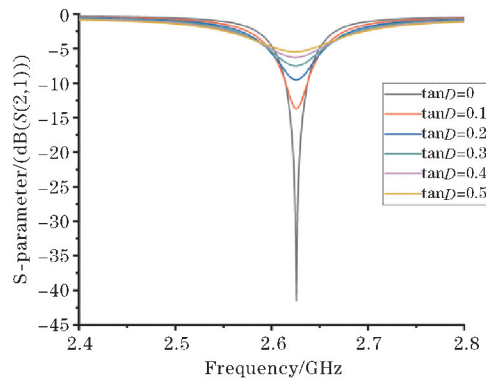


图3 溶液浓度检测电路实验系统

为证明提出的被测液体的表征方法,并获得选定频率下的散射参数与被测材料复介电常数之间的关系,采用相对介电常数从1~40连续变化,损耗从0~0.5连续变化,仿真结果如图4所示。图4(a)可以看出当检测材料的相对介电常数从1~40变化时,谐振点位置逐渐向左偏移(逐渐减低),而损耗基本不变。当实部保持不变,材料的介质损耗角正切不断增大时,谐振点处的谐振频率基本不变,而输入回波损耗不断增大,证明电路针对微小介电变化的探测能力。基于该电路,设计了用于材料介电特性非侵入式测量的实验系统。



(a) S_{21} 不同实部对比



(b) S_{21} 不同虚部对比

图4 基于 IDC 结构的对称型电路 S 参数仿真测量值对比

2 实验及结果分析

实验过程使用矢网记录 S_{21} 的谐振频率和幅度数据的相对变化。为保证测量准确性,所有测试板材在室温25℃、相对湿度为25%条件下进行,同时,所有测量数据进行多次测量求平均值,以保证最小误差。图5显示样品材料的介电常数变化时反射系数的变化。待测溶液区域采用3D打印长方体容器,容器采用 PDMS 材质,长方形容器左右两端打孔并连接微流体出入口,实现溶液简单可控进出。进一步简化测量过程。为证明所提出的被测液体的表征方法,并获得选定频率下

的散射参数与被测液不同组分间的关系,在测试实验前,为确保测试结果的准确性,对测试仪器进行校准。准备好去离子水、乙醇和空容器等试验样品,分别测量它们的散射参数,测量频带为2.0~3.0 GHz。实验采用10%~90%的去离子水/乙醇混合溶液,分别测量液体样品,不同样品的乙醇之间浓度步长为10%。测量结果如图5所示。

图5展示的是设计的传感器加载不同浓度的水/乙醇溶液后的传输响应曲线 S_{21} 。随着去离子水的相对体积比增加(0%~100%),传感器的工作频率逐渐向左偏移,产生了约200 MHz的频率偏移,而低浓度溶液相对谐振频率变化较小。同时,不同浓度溶液对应衰

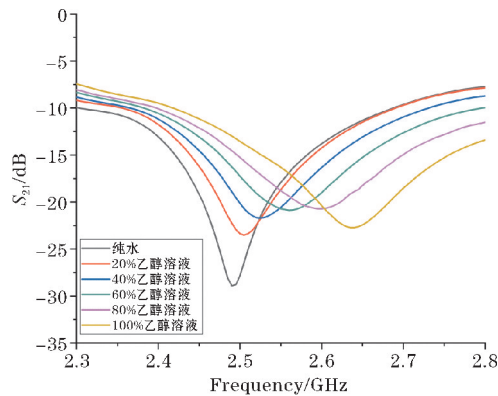


图 5 不同浓度乙醇水溶液的 S 参数测试结果

减特性也随之规律性增大,原因为浓度越大,乙醇水溶液的损耗也越大,导致衰减随溶液浓度增加。

3 介电常数提取

通过仿真和实验数据对新型传感器的分析和不同浓度乙醇溶液的测量,该射频测量系统可以有效地探测出介电常数的微小变化。其介电常数可以从测量得到的待测物的散射参数中提取。通过对输入输出变量进行大量的训练,神经网络可以对新的输入信息给出正确的预测。因此对于介电常数重建问题可以运用神经网络方法解决。具体过程如下:(1)运用新型传感器,结合计算电磁学的有限元方法计算不同材料的散射参数,完成神经网络训练所需大量的输入输出样本集;(2)依据获得的样本集完成提取介电常数的实部与虚部的神经网络的训练,并对满足精度要求的网络的权值与网络结构进行存储;(3)运用新型传感器对待测物质的散射参数进行测试;(4)将测试得到的散

射参数输入到存储好的神经网络中,该网络将在很短的时间内通过测量的散射参数得到材料的介电常数。本文在获得大量的输入输出样本集后,对样本集进行预处理;在对 BP 神经网络的训练过程中,是针对介电常数的实部与虚部两个网络分开训练的,训练的误差都设定为0.001,如前所述,2 个网络的输入参数都是传输参数的幅度与频率偏移,对存储网络的训练和检测结果进行 5 次检验,以避免一次结果造成的随即误差;对待测物的散射参数测量保证在 5 次以上;对神经网络的输出结果与相关文献比对以验证结果的正确性,其流程如图 6 所示。利用设计的新型传感器,在测量区放上不同浓度的乙醇溶液,在传感器的工作频率(2.45 GHz)测量这些待测物的两端口散射参数。然后把这些测量结果输入到训练好的神经网络中,最终获得这些材料的介电常数,结果表明不同浓度的乙醇溶液的反演结果与相应的文献值的相对误差可控制在 5% 以内。其最终提取的不同浓度的乙醇溶液介电常数如表 1 所示^[18]。

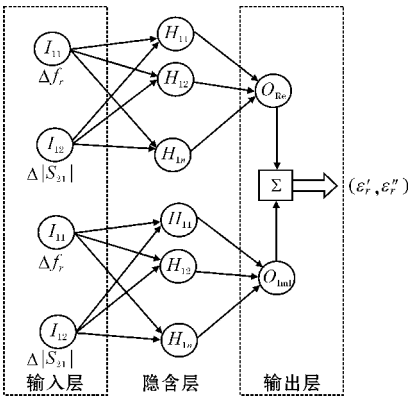


图 6 用于乙醇水溶液介电常数提取的神经网络结构图

表 1 测量的不同浓度的乙醇溶液介电常数

乙醇浓度	介电常数的实部			介电常数的虚部		
	测量值	参考值 ^[16]	相对误差/%	测量值	参考值 ^[16]	相对误差/%
0.20	41.55	40.58	2.4	19.31	18.73	3.1
0.40	28.12	27.35	2.8	16.94	16.37	3.5
0.60	13.82	13.35	3.5	11.49	11.04	4.1
0.80	10.99	10.55	4.2	9.67	9.41	2.9
1.00	6.97	6.65	4.8	6.64	6.41	4.0

4 结束语

介绍一种基微带结构的对称型射频电路,并应用于液体浓度微小变化精确检测领域。该电路包括正面开口环谐振器(SRR)、多交指电容(IDC)和背面蚀刻的互补开口环谐振器(CSRR),在微带线电场强度最大的区域刻蚀CSRR,从而提高灵敏度。进一步解决常规平面传感器载物台结构复杂、测量需要精确控制液体体积等问题。提

出一种 3D 打印溶液装载结构,利用微流体控流装置实现待测溶液的精确控制和便捷更换。通过该检测电路加工测试,利用不同浓度的乙醇水溶液标准检测液行实时非侵入式测量,运用神经网络算法对不同浓度的和乙醇溶液进行测量,结果与文献值吻合得很好,相对误差可控制在 5% 以内,证明该微波电路对混合溶液材料浓度微小变化探测的高灵敏度和可靠性。本测量装置不但可以实现低成本加工,而且测试过程更为简便,装置的测量精度满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] Liu P, Li Z, Fu W, et al. Complementary split-ring resonators in microwave filters: A review and focus on structural progress[J]. IEEE Microwave Magazine, 2022, 23(9): 70–84.
- [2] Boybay M S, Ramahi O M. Material characterization using complementary split-ring resonators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(11): 3039–3046.
- [3] Sekar V, Torke W J, Palermo S, et al. A self-sustained microwave system for dielectric-constant measurement of lossy organic liquids[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(5): 1444–1455.
- [4] Gabriel S, Lau R W, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz[J]. Physics in medicine & biology, 1996, 41(11): 2251.
- [5] 廖崇蔚, 蒋龙凯, 瞿强, 等. 一种基片集成波导终端加载结构的复介电常数测量传感器[J]. 应用科技, 2021, 48(6): 13–17.
- [6] 晏晗, 陈倩, 黄卡玛, 等. 一种基于基片集成脊波导的介电常数测量研究[J]. 真空电子技术, 2021(6): 87–91.
- [7] 赵锐, 陈超婵. 传输/反射法测量固体复介质材料介电常数[J]. 上海计量测试, 2020, 47(3): 43–45, 48.
- [8] 王韧, 孙浩然, 敬守钊, 等. 5G频段下材料非侵入式测量传感装置设计[J]. 成都信息工程学院学报, 2022, 37: 1.
- [9] 王依超, 郭高凤, 王娟, 等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺, 2014, 1: 025.
- [10] 刘君, 许卫东, 刘珩, 等. 基于微波反射率波动特性的混凝土介电常数测量方法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(1): 141–146.
- [11] Ansari M A H, Jha A K, Akhtar M J. Design and application of the CSRR-based planar sensor for non-invasive measurement of complex permittivity[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 7181–7189.
- [12] Lee C S, Yang C L. Thickness and permittivity measurement in multi-layered dielectric structures using complementary split-ring resonators[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(3): 695–700.
- [13] Chuma E L, Iano Y, Fontgalland G, et al. Microwave sensor for liquid dielectric characterization based on metamaterial complementary split ring resonator[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(24): 9978–9983.
- [14] Ebrahimi A, Withayachumnankul W, Al-Sarawi S, et al. High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(5): 1345–1351.
- [15] Withayachumnankul W, Jaruwongrungrsee K, Tuantranont A, et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013(189): 33–237.
- [16] Mashimo S, Umehara T, Redlin H. Structures of water and primary alcohol studied by microwave dielectric analyses[J]. The Journal of chemical physics, 1991, 95(9): 6257–6260.

An Novel Experimental System for Detecting Small Dielectric Changes in Mixed Liquid Media

SUN Junyang¹, HUANG Heping²

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. College Key Laboratory of Electronic Information Engineering, State Ethnic Affairs Commission, College of Electronic Information, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610225, China)

Abstract: With the rapid development of microwave nondestructive testing technology, microwave planar resonant circuits are widely used in the field of precise measurement of liquid components due to their high reliability and better performance. A symmetrical radio frequency circuit based on a microstrip structure is proposed, which includes a pair of front split ring resonators (SRR), multiple interdigitated capacitors (IDC) and complementary split ring resonators (CSRR) etched on the back. The CSRR is etched in the region with the largest electric field intensity of the strip line, so as to improve the measurement sensitivity. Further, a nondestructive detection experimental system for small changes in the dielectric properties of materials is designed. In order to solve the problems including the complex structure of the conventional planar sensor stage, the volume of the tested liquid solution is difficult to control, a 3D printing solution loading structure was proposed, using a microfluidic flow control device to achieve precise control and convenient replacement of the solution to be tested. Through the processing and testing of the detection circuit, the real-time non-destructive detection of the standard detection solution of ethanol aqueous solution with different concentrations proves the high sensitivity and reliability of the microwave circuit for the detection of small changes in the concentration of the mixed solution material.

Keywords: microwave nondestructive testing; split ring resonators; 3D printing