

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407828

# 微波近场同轴探头液体浓度检测研究

刘薇<sup>1</sup> 叶鸣<sup>1</sup> 陶冶<sup>1</sup> 杨放<sup>1</sup> 王纯<sup>1</sup> 谢拥军<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院 西安 710055; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:**液体浓度检测广泛应用于食品、环境、生物医学等领域。基于微波法,设计并实现了一种谐振式同轴探头液体浓度检测装置。首先,选取不同浓度的乙醇-水混合溶液作为测试对象,仿真分析耦合间隙、探头浸没深度及探头导体材质对检测灵敏度的影响。为验证装置对不同液体浓度检测的适用性,以0%~75%乙醇-水溶液和0%~50%葡萄糖-水溶液为对象进行了实验验证。实验结果表明,该探头能够精确测量液体浓度,并且通过调整耦合间隙,可优化不同浓度范围内的检测灵敏度。此外,综合谐振频率、 $S_{11}$ 幅度最小值和品质因子3种电磁参数,构建了溶液浓度的定量反演模型,与仅使用谐振频率单一参数的传统方法相比,检测乙醇-水溶液和葡萄糖-水溶液的相对误差分别从5.79%和3.34%降低至2.19%和1.36%。探头还能够有效区分多种透明液体,如乙醇溶液、葡萄糖溶液、盐水、自来水和去离子水等,表现出良好的识别能力和数据重复性,具有广泛的潜在应用前景。

**关键词:**液体浓度;微波检测;谐振式微波近场同轴探头;耦合间隙

**中图分类号:** TH89; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 530.14

## Research on liquid concentration detection based on microwave near-field coaxial probe

Liu Wei<sup>1</sup> Ye Ming<sup>1</sup> Tao Ye<sup>1</sup> Yang Fang<sup>1</sup> Wang Chun<sup>1</sup> Xie Yongjun<sup>2</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Liquid concentration detection is widely used in food, environment, biomedical and other fields. Based on the microwave method, a resonant coaxial probe liquid concentration detection device was studied, designed and realized. Firstly, ethanol-water solutions of different concentrations are selected as test samples, and the effects of coupling gap, probe immersion depth and probe conductor material on detection sensitivity are simulated and analyzed. To verify the feasibility of liquid concentration detection using the designed probe, ethanol-water solutions/glucose-water solutions with a volume concentration of 0%~75%/0%~50% are measured. The experimental results show that the probe is capable of accurately measuring the liquid concentration and the detection sensitivity in different concentration ranges can be optimized by adjusting the coupling gap. In addition, in this study, the quantitative inversion model of solution concentration is constructed by combining three electromagnetic parameters, namely, resonance frequency,  $S_{11}$  amplitude minima and quality factor. Compared with traditional method that only use resonance frequency as indicator, relative errors of liquid concentration of ethanol-water solutions/glucose-water solutions are suppressed from 5.79%/3.34% to 2.19%/1.36%, respectively. The probe is also able to effectively differentiate a variety of transparent liquids, such as ethanol solutions, glucose solution, salt water, tap water and deionized water, etc., showing good recognition ability and data reproducibility and thus shows a wide range of potential applications.

**Keywords:** liquid concentration; microwave sensing; resonant microwave near-field coaxial probe; coupling gap

## 0 引言

液体浓度检测,广泛应用于生物医学病理研究<sup>[1]</sup>、食品安全检测<sup>[2-3]</sup>、环境状况监控<sup>[4-6]</sup>等各个领域。浓度作为评估溶液中溶质含量的关键物理量,是定义溶液特性的主要参量之一。它在工业制造、农业生产以及科研实验中扮演着至关重要的度量角色。在日常生活中,液体的物理或化学属性一般受浓度的影响,浓度过高还是过低均有潜在的风险,可能会影响最终产品的质量。目前,液体浓度检测的常见方法包括电磁探测法、X 射线探测法、电化学和生物仿生探测法等几大类。其中,引人关注的电磁探测法又可进一步划分为微波法<sup>[7-9]</sup>和光学检测法<sup>[10]</sup>。尽管这些方法各自具有一定的优势,但在实际应用中暴露出一些局限性。例如,光学法主要适用于透明包装液体的检测;X 射线方法存在辐射风险,对人体有潜在危害;电化学法测量过程较为耗时且成本较高;而生物仿生方法在检测精度方面仍存在一定的提升空间。近年来,随着通信、雷达等技术及其应用的迅猛发展,微波频段液体检测与感知领域的研究逐渐成为热点方向<sup>[11-14]</sup>。

Merih 等<sup>[15]</sup>设计了一种检测乙醇-水溶液介电常数的 2.45 GHz 微波传感器,优点是体积小、成本低、可重复使用;Tseng 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于微波锁频环的液体检测传感器,并以乙醇-水溶液和葡萄糖-水溶液为例开展了实验,所得结果与商用介电探头结果吻合;Li 等<sup>[17]</sup>使用低成本的开放式同轴探头和便携式微波分析仪在 2~20 GHz 频率范围内测量白酒。研究表明,微波技术为确定酒精含量提供了一种有效的解决方案;Mavrovic 等<sup>[18]</sup>介绍了一种新的开放式同轴探头,适用于 L 波段频率(1~2 GHz)下现场雪水含量测量,精度为 $\pm 1\%$ ,探头探测体积小,能够量化薄渗透积累层的雪水含量。以上研究表明,微波法可以用于液体浓度/含水量的检测,具有成本低、可重复使用的优点。

然而,上述工作提出的微波传感器大多只研究谐振频率等单个参数与液体浓度之间的定量关系。因此,利用一种谐振式微波同轴探头开展液体浓度检测研究,其优势在于与传统的非谐振式同轴探头相比,研究通过优化耦合间隙实现了探头在空载条件下的临界耦合, $S_{11}$  幅度可达 -50 dB 左右,从而提升了液体浓度检测的灵敏度;融合谐振频率、 $S_{11}$  幅度最小值( $|S_{11}|_{\min}$ )和品质因子 3 种电磁响应参数实现了液体浓度的反演,使得液体浓度检测精度和液体类型识别能力相较于传统方法有一定提升。因此,所提出的液体浓度检测方法为进一步改进和提高现有微波液体检测装置的性能提供了借鉴。

## 1 微波近场探头液体浓度检测原理

微波近场探头液体浓度检测装置如图 1 所示。核心器材由同轴转接器和半波长同轴谐振探头组成,两者之间存在一个空气间隙以实现能量耦合,探头的开路结构可在探针末端的形成局部电磁场分布。探头与网络分析仪相连,末端浸没在液体中,空气介质转变为液体介质,进而引起电磁参数的变化。由于空气与液体的电磁特性差异,探头的  $S_{11}$  参数、谐振频率以及品质因子将发生相应变化。通过监测这些电磁响应参数的变化,能够实现对待测液体浓度的精准检测。

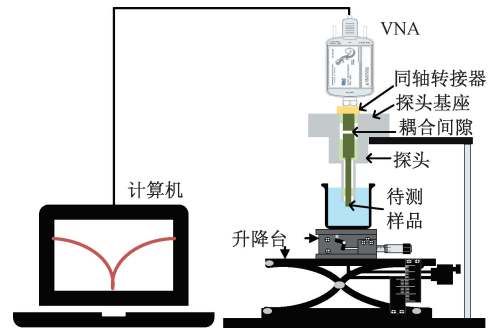


图 1 浓度检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the concentration detection system

图 2 所示为液体浓度检测的电路,探头  $S_{11}$  可表示为:

$$S_{11, \text{dB}} = 20 \log \left| \frac{Z_{\text{total}} - Z_0}{Z_{\text{total}} + Z_0} \right| \quad (1)$$

式中: $Z_0$  为系统特征阻抗;总阻抗  $Z_{\text{total}} = Z_c + Z_{\text{in}}$ ,  $Z_c$  为耦合电容对应的阻抗,阻抗  $Z_{\text{in}}$  代表了谐振器阻抗  $Z_{\text{resonator}}$  及待测液体阻抗  $Z_{\text{dut}}$  的并联。

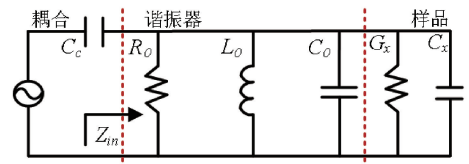


图 2 液体浓度检测等效电路

Fig. 2 Liquid concentration detection equivalent circuit diagram

$$Z_{\text{total}} = \left( \frac{1}{Z_{\text{resonator}}} + \frac{1}{Z_{\text{dut}}} \right)^{-1} \quad (2)$$

谐振器阻抗为:

$$Z_{\text{resonator}} = \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0 \right)^{-1} \quad (3)$$

待测样阻抗  $Z_{\text{dut}}$  可表示为:

$$Z_{\text{dut}} = (G_x + j\omega C_x)^{-1} \quad (4)$$

式中： $C_0$ 、 $R_0$  和  $L_0$  为半波长开路同轴谐振探头等效电路参数； $\omega$  为角频率；电容  $C_x$  与待测液体介电常数实部正相关；并联电导  $G_x$  与待测液体介电常数虚部正相关，液体浓度的变化会导致其介电常数的实部和虚部发生相应变化。因此，浓度变化时会导致并联电导  $G_x$  与液体电容  $C_x$  发生变化，进而导致  $Z_{\text{dnt}}$ 、 $Z_{\text{in}}$ 、 $Z_{\text{latol}}$ 、 $S_{11,\text{dB}}$  发生变化，最终可以建立起待测液体浓度与  $S_{11,\text{dB}}$  之间的定量关联性，通过测量  $S_{11}$  参数，实现液体浓度的间接检测。以不同体积分数的乙醇溶液为例，随着液体浓度的增加，其复介电常数的实部降低，虚部升高。这表明待测液体的相对介电常数减小，损耗正切增大。此时，谐振频率随液体浓度的增加向高频方向偏移，品质因子降低。

## 2 仿真分析

### 2.1 微波近场同轴谐振探头液体浓度检测仿真设计

图 3 (a) 所示为液体检测开路半波长谐振器，图 3 (b) 所示为侧视图。在探头的上端放置了波导端口，以便获取反射系数。探头的下端是探头末端，即液体检测时的感知区域。如无特别说明，仿真使用 1.8 GHz 同轴探头，内导体由两块聚四氟乙烯 (PTFE) 介质环固定，同轴内导体和外导体材质均设置为铝。电磁仿真采用 CST Studio Suite 软件，采用的电磁边界条件为 Open (add space)，背景材料类型设置为真空，网格剖分为自适应细化。探头具体尺寸如表 1 所示。

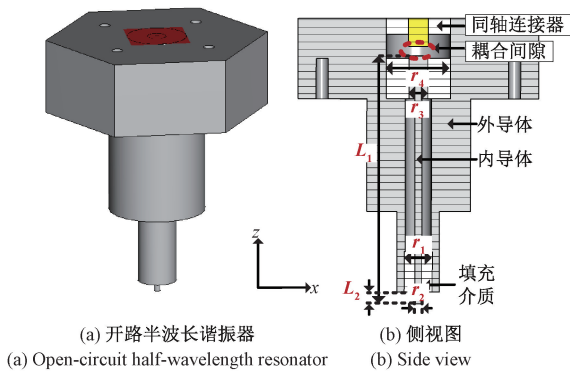


图 3 谐振器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a resonator

表 1 谐振器尺寸

Table 1 Resonator dimensions

参数符号	取值/mm	参数符号	取值/mm
$L_1$	61.72	$L_2$	3
$r_1$	7	$r_2$	1.7
$r_3$	4.7	$r_4$	16

探头谐振频率  $f \approx nc/2\sqrt{\epsilon_r\mu_r}L$ ，特征阻抗  $Z \approx 60$

$\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \ln(r_2/2)/(r_1/2)$ 。其中， $n$  为模式数 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )， $c$  为真空中光速， $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为填充介质的相对介电常数和相对磁导率。

首先，以不同体积分数乙醇溶液为例进行仿真分析。通过设置液体的介电参数，构建不同体积分数乙醇-水溶液的模型。在 1.2~1.8 GHz 频段内，不同体积分数乙醇溶液的复介电常数数据参考文献 [19]。通过式 (5) 和 (6) 进一步计算，得到不同浓度溶液的相对介电常数  $\epsilon_r$  和损耗正切  $\tan\delta$ 。具体计算结果如图 4 所示。

$$\epsilon_r = \epsilon' \tag{5}$$

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \tag{6}$$

式中： $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  分别为 25 °C 下不同浓度乙醇溶液复介电常数的实部和虚部。通过对不同浓度的乙醇溶液进行建模仿真，得到探头输入端口的反射系数  $S_{11}$ ，并从中提取谐振频率、 $S_{11}$  幅度最小值 ( $|S_{11}|_{\text{min}}$ ) 及品质因子。基于上述参数与待测溶液浓度的关联性，实现液体浓度的反演。将反演结果与仿真模型中预设的浓度进行对比，以验证建模与仿真方法的准确性与可靠性。

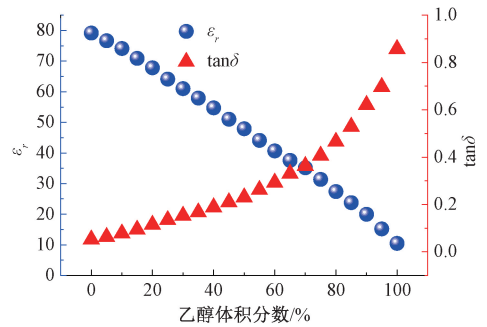


图 4 不同体积分数乙醇-水溶液在 25 °C 下的介电参数  
Fig. 4 Dielectric properties of ethanol-water solutions at various volume fractions at 25 °C

### 2.2 耦合间隙对液体浓度检测性能的影响

与现有的商用微波液体检测同轴探头相比，所设计探头的独有设计参数——耦合间隙，使得同轴探头由反射型演变为谐振型 (亦即开路半波长同轴传输线谐振器)，进而实现检测灵敏度的提升。因此，首先通过电磁仿真系统性地研究探头耦合间隙对液体检测性能的影响。以 0%~100% 乙醇-水混合溶液为例，探头浸没深度为 6 mm。改变同轴连接器与探头内导体之间的耦合间隙，以探头浸没 20% 乙醇溶液的耦合状态为基准，分别设置耦合间隙为 0.09 mm (过耦合)、0.65 mm (欠耦合) 和 0.37 mm (临界耦合)，并针对这 3 种耦合状态进行仿真。提取对应浓度的品质因子、谐振频率、 $S_{11}$  幅度最小值 ( $|S_{11}|_{\text{min}}$ )。乙醇浓度检测灵敏度  $S_E$  可表示为：

$$S_E = \Delta S/\Delta E \tag{7}$$

式中： $\Delta S$  表示微波参量的变化值； $\Delta E$  表示乙醇体积分数

的变化值。图 5 所示为探头不同耦合状态下的仿真结果。可以观察到,探头的  $S_{11}$  参数随液体浓度变化呈现出规律性变化。基于品质因子、谐振频率及  $|S_{11}|_{\min}$  计算的灵敏度结果如图 6 所示。

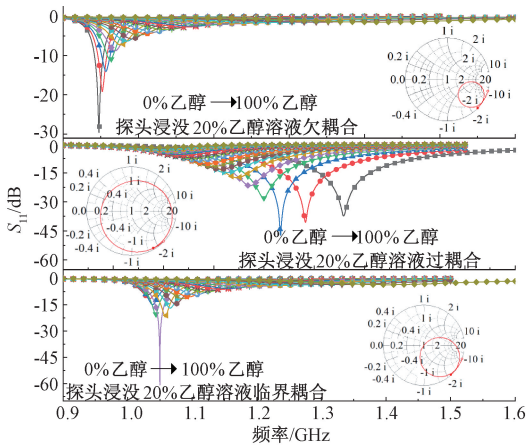


图 5 不同耦合状态仿真结果

Fig. 5 Simulation results for different coupling states

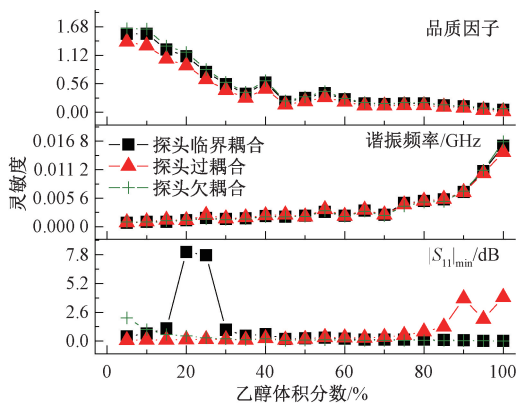


图 6 不同耦合状态灵敏度

Fig. 6 Sensitivity of different coupling states

可知探头耦合状态对使用谐振频率和品质因子检测浓度灵敏度的影响较小。当乙醇浓度从 15% 变化至 20% 时,探头在临界耦合状态下的  $|S_{11}|_{\min}$  变化显著,达到了 40 dB 左右,浓度检测灵敏度为 8.05。在过耦合状态下,  $|S_{11}|_{\min}$  变化较小,仅为 0.68 dB,检测灵敏度降低至 0.13。欠耦合状态下,  $|S_{11}|_{\min}$  变化为 2.27 dB,检测灵敏度为 0.45。这表明当使用  $|S_{11}|_{\min}$  检测浓度时,耦合间隙的优化设计有助于提高液体浓度检测灵敏度。实际上,探头浸没液体后,其耦合状态朝欠耦合方向变化。因此,若探头空载时为过耦合状态,则有望在浸没液体后达到临界耦合状态,从而获得最优的液体浓度检测灵敏度。基于上述现象可知,调节耦合间隙,探头可在不同浓度范围内优化液体浓度检测的灵敏度。当探头浸没于特定浓度液体并达到临界耦合状态时,浓度检测灵敏度最高。

### 2.3 探头浸没深度对液体浓度检测性能的影响

浸没深度直接影响探头与液体的相互作用,从而影响探头对液体介电特性变化的响应强度和检测精度。改变探头浸没液体的深度,仿真研究探头浸没深度对液体浓度检测性能的影响,以 0%~100% 乙醇-水混合溶液为研究对象。根据 2.2 节的结论,临界耦合状态可显著提升液体浓度检测的灵敏度。因此,以浸没 20% 乙醇溶液接近临界耦合为基准,分别在探头浸没液体 3、6 和 10 mm 3 种深度下进行仿真,对应的耦合间隙分别为 0.375、0.37 和 0.35 mm。图 7 所示为不同浸没深度下的  $S_{11}$  仿真结果。

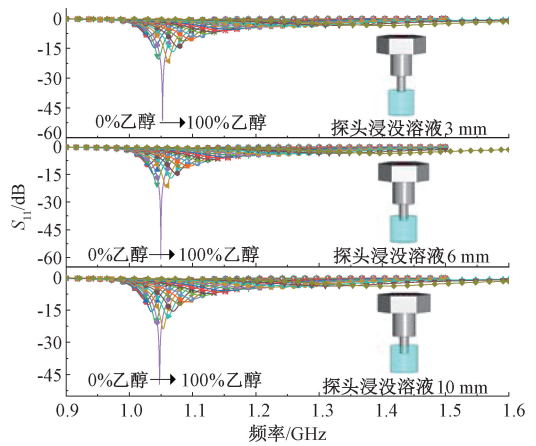


图 7 不同浸没深度仿真结果

Fig. 7 Simulation results for different immersion depths

提取品质因子、谐振频率、 $|S_{11}|_{\min}$  并计算灵敏度,结果如图 8 所示。探头浸没溶液的的深度对谐振频率、品质因子以及  $|S_{11}|_{\min}$  拟合计算液体浓度灵敏度的影响均较小。对于探头的耦合状态而言,实现完全的临界耦合存在一定难度,探头往往处于轻微的欠耦合或过耦合状态。因此在检测接近 20% 的溶液浓度时,耦合状态的差异会导致不同浸没深度下使用  $|S_{11}|_{\min}$  检测浓度的灵敏度存在差别。综上所述,当探头浸没深度处于 3~10 mm 范围内(液位低于探头底部介质环顶端)时,若探头达到临界耦合状态,则浸没液体深度对溶液浓度检测灵敏度的影响可忽略不计。

### 2.4 探头内外导体材质对液体浓度检测性能的影响

同轴探头常用的导体材质包括银、铜、铝等,其材质特性对液体浓度检测性能具有潜在影响。为探究导体材质的影响,以 0%~100% 乙醇-水混合溶液为研究对象。耦合间隙以浸没 20% 乙醇溶液接近临界耦合状态为基准,探头内外导体材质设置为银、黄铜和铝,对应的耦合间隙分别为 0.37、0.36 和 0.37 mm。图 9 所示为不同导体材质探头的  $S_{11}$  仿真结果。

3 种材质探头的液体检测灵敏度计算结果如图 10 所示,可以看出不同材质探头的检测灵敏度几乎一致。

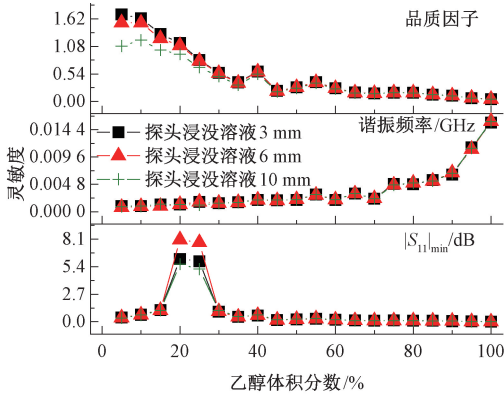


图 8 不同浸没深度灵敏度

Fig. 8 Sensitivity to different immersion depths

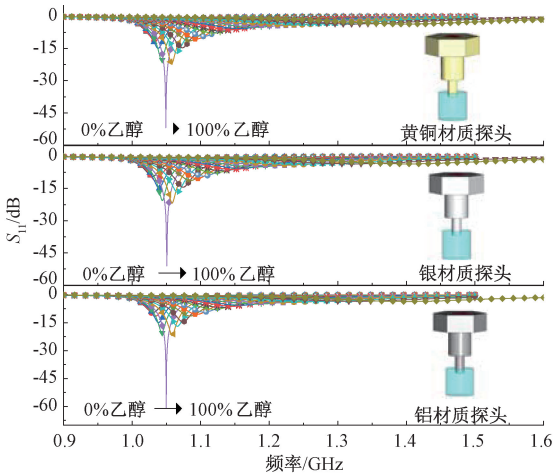


图 9 不同材质探头仿真结果

Fig. 9 Simulation results of probes made of different materials

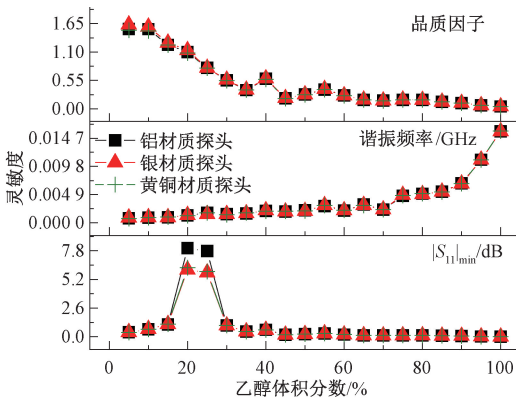


图 10 不同材质探头灵敏度

Fig. 10 Probe sensitivity for different materials

因此,探头内外导体材质对液体检测性能的影响是次要因素。在低浓度时,银探头的品质因子略高于黄铜探头。这表明尽管液体损耗是决定探头品质因子的主要因素,但导体损耗仍对探头的总品质因子有一定贡献,且该贡献随液体浓度的增加而逐渐减小。当乙醇浓度超过 20% 时,3 款探头的品质因子趋于一致。

### 3 实验测量

#### 3.1 实验仪器

主要实验装置如下:R60 单端口矢量网络分析仪(购自南京舜特科通信技术有限公司)、1.8 GHz 微波近场同轴探头(内外导体为铝合金材质)、同轴转接器、升降台、25 ml 烧杯、0%~75%乙醇-水溶液(体积分数)、0%~50%葡萄糖溶液(质量分数)、去离子水、3%盐水、自来水、雪碧。

#### 3.2 实验步骤

1) 搭建基于微波近场同轴探头的液体检测装置如图 11(a)所示。探头  $S_{11}$  参数测试采用 R60 单端口矢量网络分析仪(测试前进行单端口校准)。

2) 使用 75%乙醇溶液与去离子水配制 0%~75%(体积分数)乙醇-水混合溶液;使用葡萄糖粉末与去离子水配置 0%~50%(质量分数)葡萄糖溶液。

3) 装有待测液体的烧杯置于探头正下方,使用升降台控制探头浸入溶液的深度,探头浸没液体细节如图 11(b)所示。

4) 每测试一种溶液,使用 75%乙醇溶液清洗探头,待探头残留液体挥发后,测试下一组液体。

5) 观察网络分析仪的  $S_{11}$  变化,记录数据并进行数据分析和绘图处理,由图 11(c)可以看出探头空载时的  $S_{11}$  仿真和实测数据吻合较好。

由于环境温湿度可能对探头电磁响应或液体介电特性有影响,进而引起测量误差。因此,在实验过程中对环境温湿度进行了监控:在测量乙醇溶液浓度时,实验环境温度约为 23℃,湿度范围为 29%~31%;在测量葡萄糖溶液浓度时,实验环境温度约为 24℃,湿度为 53%。

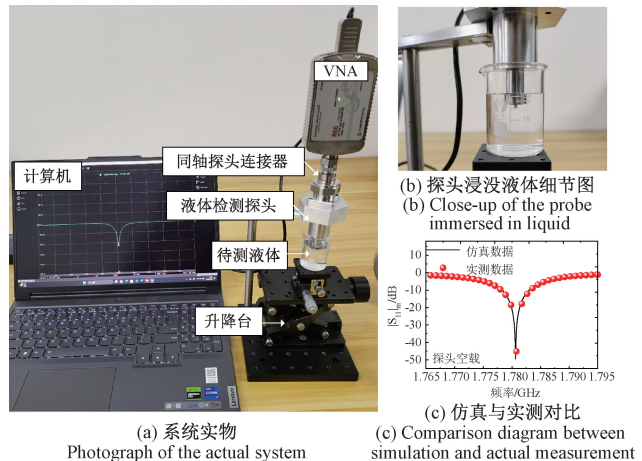


图 11 系统测试实物图及仿真实测对比

Fig. 11 Comparison of system test drawing and simulation measurement

## 4 实验结果及分析

### 4.1 乙醇-水溶液浓度检测

根据第 2 节的仿真分析结果可知,探头处于临界耦合状态时,检测灵敏度最高。实验中,通过调整升降台将探头浸入液体的深度固定为 6 mm,以探头浸没 20%乙醇溶液时临界耦合状态为基准设置耦合间隙。为验证实验的可重复性,对 0%~75%体积分数的乙醇-水溶液进行了 3 次连续测试,结果表现出良好的一致性。 $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率、品质因子的 3 次测试数据标准偏差分别为 0.022~0.084 dB、0.000 2~0.000 7 GHz、0.03~0.33。 $|S_{11}|_{\min}$  数据的标准偏差略大,是由于探头接近临界耦合时信噪比降低所致。图 12(a)~(d)所示为乙醇-水样品的电磁响应随乙醇浓度变化的趋势。

随着乙醇浓度的增加,品质因子逐渐降低,谐振频率逐渐增大,而 $|S_{11}|_{\min}$ 先减小后增大。这一现象与第 1 节关于微波近场探头检测液体浓度原理的分析结论以及第 2 节的仿真结果一致。

相对误差结果如图 13 所示,其数据处理方法如下: 1) 分别依据乙醇溶液的 3 种电磁参数拟合得到液体浓度(为避免随机误差,每组测试重复 3 次,以其均值作为测试结果); 2) 将 3 种电磁参数各自提取得到的乙醇浓度取平均,作为乙醇浓度的最终测量结果。图 13 中将仅依据谐振频率提取得到的浓度检测相对误差作为对比。基于 3 种电磁参数反演的乙醇浓度相对误差小于 2.19%,传统方法仅利用谐振频率单一参数进行液体浓度测量,其相对误差小于 5.79%。本文通过综合多种电磁参数进行浓度反演,可以降低相对误差,提升测量精度。与传统方法相比,相对误差降幅达 3.6%,验证了本文方法在乙醇浓度检测中的高灵敏度和可行性。

### 4.2 葡萄糖-水溶液浓度检测

对 0%~50%质量分数葡萄糖溶液进行浓度检测,通过精确调整升降台,将探头浸入液体的深度恒定为 6 mm,并根据探头浸没 20%葡萄糖溶液时临界耦合状态设定探头耦合间隙。为确保实验结果的重复性和可靠性,对每种浓度的葡萄糖溶液进行 3 次重复测量。所得 $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率、品质因子的 3 次测试数据标准偏差分别为 0.013~1.036 dB、0.000 1~0.000 2 GHz、0.005~0.21,具有良好的可重复性。

图 14(a)~(d)所示为探头测量得到的葡萄糖溶液质量分数与电磁参数之间的变化关系。 $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率以及品质因子随葡萄糖质量分数的变化趋势与不同体积分数乙醇溶液的变化趋势相似。这一现象可归因于两种溶液的浓度检测均主要反映液体中的水分含量,而混

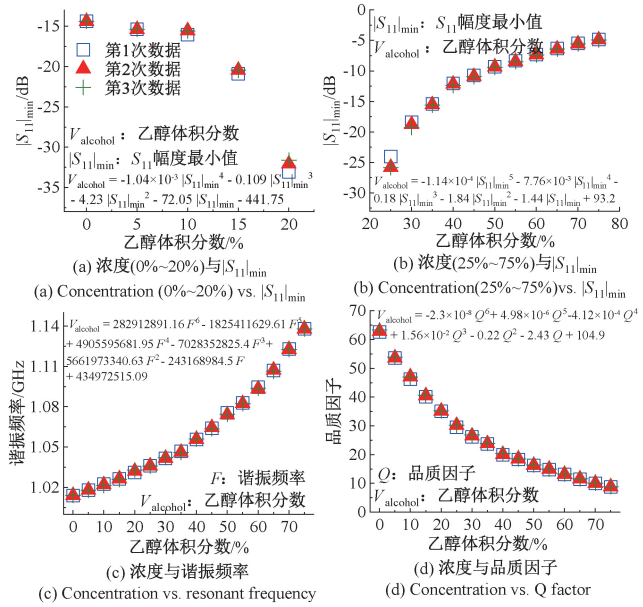


图 12 乙醇溶液体积分数与电磁参数的关系

Fig. 12 Relationship between the volume fraction of ethanol solution and electromagnetic parameters

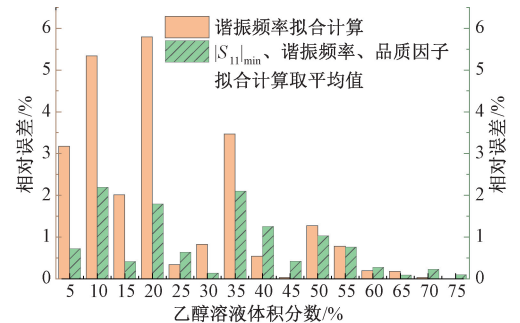


图 13 乙醇浓度测量相对误差

Fig. 13 Relative error of ethanol concentration measurement

合溶液的介电特性主要由水的介电特性决定。

按照与前述乙醇溶液数据处理相同的方法,对葡萄糖溶液的测试数据进行了处理。如图 15 所示,综合 3 种参数的拟合计算浓度的相对误差不超过 1.36%,而仅使用谐振频率单一参数反演浓度的相对误差为 3.34%,所提出的方法使相对误差降低了 1.98%。

### 4.3 不同种类溶液检测

对 20%葡萄糖溶液、20%乙醇溶液、3%盐水、去离子水、自来水、雪碧 6 种无色透明液体进行检测。调节升降台确保探头浸入液体的深度维持在 6 mm,探头的耦合间隙以浸没 20%葡萄糖溶液临界耦合状态为准。每种液体同样进行 3 次测试,结果显示一致性良好, $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率、品质因子 3 次测试数据的标准偏差分别为 0.004~1.685 dB、0.000 1~0.000 4 GHz、0.003~0.095。不同溶

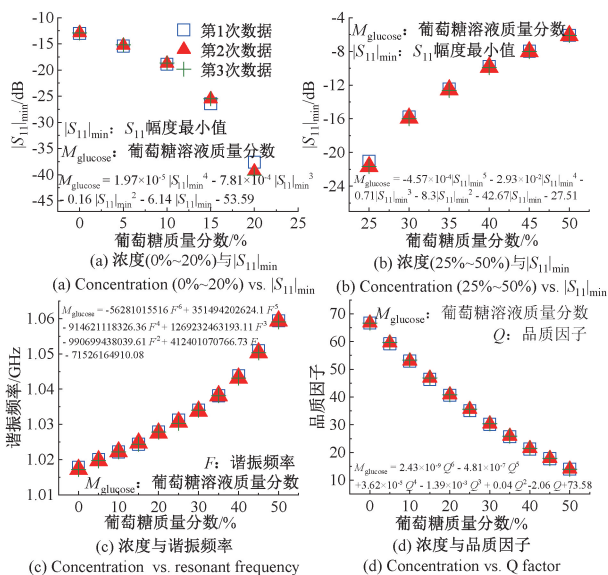


图 14 葡萄糖溶液质量分数与电磁参数的关系  
Fig. 14 Relationship between the mass fraction of glucose solution and electromagnetic parameters

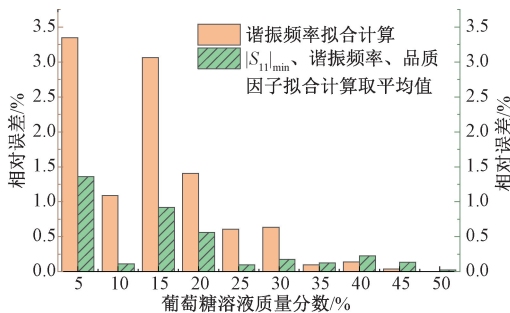


图 15 葡萄糖浓度测量相对误差

Fig. 15 Relative error of glucose concentration measurement

液对应的典型  $S_{11}$  测试结果如图 16 所示,初步表明了该探头具有辨识不同溶液的能力。

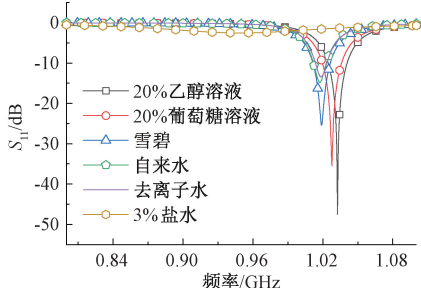


图 16 不同溶液  $S_{11}$

Fig. 16  $S_{11}$  parameters of different solutions

提取不同溶液的  $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率以及品质因子,结果如图 17 所示,进一步表明了探头具有识别液体种类

的潜力。由图 16、17 可知,探头对于自来水和去离子水表现出不同的电磁参数,意味着探头可以感知到自来水中含有的微量矿物质、盐分及其他溶解物质,表明了探头的高灵敏度特性。如何建立电磁参数与液体种类之间的关联性,将是后续研究的重点之一。总之,所使用的微波近场同轴探头不仅可以检测不同浓度的溶液,还可以识别不同种类的液体,潜在应用领域广泛。

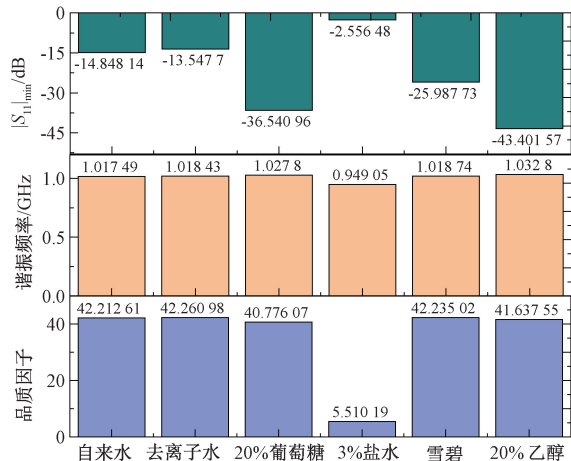


图 17 不同溶液电磁参数

Fig. 17 Electromagnetic parameters of different solutions

与现有液体浓度检测方法进行比较,如表 2 所示,所采用的微波同轴探头方法在液体浓度检测中表现出显著的优势。首先,该方法能够检测的液体种类较为广泛,包括 0%~75% 的乙醇-水溶液、0%~50% 的葡萄糖-水溶液的浓度检测以及盐水、去离子水、自来水等无色透明液体的种类识别,显示了其良好的适用性。其次,本文方法综合利用了  $|S_{11}|_{\min}$ 、谐振频率和品质因子 3 个参数,液体浓度测量误差范围在 3.6% 和 1.98% 以内,能够提供更为精确的液体浓度测量结果。因此,所采用的微波近场同轴探头方法在液体浓度检测领域具有明显的优势,能够满足高精度和高可靠性的检测需求。

## 5 结论

本文研究了基于微波近场同轴探头的液体浓度检测技术,提出了基于多个参数的液体浓度检测方法。引入了耦合间隙用于提高探头的检测灵敏度。通过系统仿真,研究了耦合间隙、探头浸没深度和探头材质对检测灵敏度的影响,并以不同浓度乙醇-水混合溶液和葡萄糖-水溶液为例进行了实验研究。结果表明,谐振频率、品质因子和  $S_{11}$  幅度最小值均可以作为定量检测液体浓度的参数。且通过改变耦合间隙,可以提高不同范围内的液体浓度检测灵敏度。对比使用谐振频率单个参数进行浓度检测的方法,综合使用 3 种参数测量乙醇和葡萄

表 2 与其他液体浓度检测方法比较

Table 2 Compared with other liquid concentration detection methods

方法	检测方法	检测液体	测量参数	相对误差/%
文献[20]	微带天线	0%~100%乙醇-水溶液、甘油	$S_{11}$	$\leq 5$
文献[21]	微波锁频环传感器	0%~90%乙醇-水混合物	复介电常数	$\leq 2.6$
文献[22]	生物传感器	0%~40%葡萄糖-水溶液		$\leq 3.8$
		5%~80%葡萄糖-水溶液	谐振频率、 $S_{11}$ 幅度	$\leq 12$
本文	微波近场同轴探头	0%~75%乙醇-水溶液	谐振频率对应的 $S_{11}$ 幅度、	$\leq 3.6$
		0%~50%葡萄糖-水溶液	谐振频率、品质因子	$\leq 1.98$

糖溶液浓度,相对误差分别降低了 3.6%和 1.98%。此外,不同种类的无色透明液体,如葡萄糖溶液、乙醇溶液、自来水和去离子水等,也可以通过本探头进行有效识别。后续可结合实际场景开展探头参数优化、数据后处理、自动化检测等方面的研究。

### 参考文献

- [1] CHENXI Y, XIA X, MIN H, et al. Non-invasive microwave blood glucose monitoring based on the diffusion limited aggregation earlobe model [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(12): e23443.
- [2] 张玮,傅霞萍. 便携式荧光成像检测系统开发及应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 169-175.
- ZHANG W, FU X P. Development and application of a portable fluorescence imaging detection system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(9):169-175.
- [3] BAI X, NI L, DENG J, et al. Quantitative determination of wheat moisture content based on microwave detection technique combined with multivariate data analysis [J]. Journal of Stored Products Research, 2024, 105: 102237.
- [4] RUIZHOU C, MING K, PENGCHENG J I, et al. Design of intelligent agricultural greenhouse environment monitoring system[J]. Instrumentation, 2023, 10(2): 40-48.
- [5] HOON F W, WEE H F, YEW S B, et al. Dielectric properties measurement and ph analysis for drinking water[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 864(1): 012162.
- [6] 李欣芯,王义程,赵王昱斐,等. 液体样本重金属离子检测微流控传感器与系统[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 86-98.
- LI X X, WANG Y CH, ZHAO W Y F, et al. Microfluidic sensor and system for detecting heavy metal ions in liquid samples [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(6):86-98.
- [7] 吴文敬,彭亮. 一种基于交指电容裂环谐振器的差分微波传感器研究与设计(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(10): 126-138.
- WU W J, PENG L. Research and design of a differential microwave sensor based on ICS-SRR(Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10): 126-138.
- [8] 谷林硕,肖夏,熊杰. 基于微波扰动技术的亚硝酸盐浓度自动监测系统[J]. 传感技术学报, 2023, 36(9): 1484-1490.
- GU L SH, XIAO X, XIONG J. Automatic monitoring system of nitrite concentration based on microwave perturbation technology [J]. Journal of Transduction Technology, 2023,36(9):1484-1490.
- [9] 熊杰,肖夏,李桥. 基于谐振微扰技术的 PAM 溶液浓度测量方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(2): 356-363.
- XIONG J, XIAO X, LI Q. Measurement method of PAM solution concentration based on resonance perturbation technology[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2022, 58(2): 356-363.
- [10] 司赶上,刘家祥,李振钢,等. 基于新型样品池的液体拉曼光谱增强方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023,43(3):712-717.
- SI G SH, LIU J X, LI ZH G. Raman signal enhancement for liquid detection using a new sample cell [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023,43(3): 712-717.
- [11] ALI L, WANG G, MENG F, et al. MXene-coated planar microwave resonator sensor for ultrasensitive humidity monitoring [J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2023, 33(11): 1572-1575.
- [12] LOUTCHANWOOT P, HARNSOONGNOEN S. Microwave microfluidic sensor for detection of high equal concentrations in aqueous solution [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(2): 244-251.
- [13] GOCEN C, PALANDOKEN M. Machine Learning assisted novel microwave sensor design for dielectric parameter characterization of water-ethanol mixture[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(3): 2119-2127.



- [14] BERIA Y, DAS GS, BURAGOHAAN A, et al. Highly sensitive miniaturized octagonal DS-CSRR sensor for permittivity measurement of liquid samples [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [15] MERIH P, CEM G, TAIMOOR K, et al. Novel microwave fluid sensor for complex dielectric parameter measurement of ethanol-water solution[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(13): 14074-14083.
- [16] TSENG C H, YANG C Y. Novel microwave frequency-locked-loop-based sensor for complex permittivity measurement of liquid solutions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(10): 4556-4565.
- [17] LI Z, HAIGH A, WANG P, et al. Dielectric spectroscopy of Baijiu over 2–20 GHz using an open-ended coaxial probe[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(6): 2513-2524.
- [18] MAVROVIC A, MADORE J B, LANGLOIS A, et al. Snow liquid water content measurement using an open-ended coaxial probe (OECF)[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 171: 102958.
- [19] EBRAHIMI A, SCOTT J, GHORBANI K. Ultrahigh-sensitivity microwave sensor for microfluidic complex permittivity measurement [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(10): 4269-4277.
- [20] 戴雄英,朱泽豪,孙杰,等. 基于微带天线的溶液浓度的测量[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2023, 33(4): 38-43.
- DAI X Y, ZHU Z H, SUN J, et al. Measurement of solution concentration based on microstrip antenna [J].

Journal of Hunan Institute of Engineering ( Natural Science Edition), 2023, 33(4): 38-43.

- [21] TSENG C H, YANG C Y. Novel microwave frequency-locked-loop-based sensor for complex permittivity measurement of liquid solutions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(10): 4556-4565.
- [22] EBRAHIMI A, SCOTT J, GHORBANI K. Microwave reflective biosensor for glucose level detection in aqueous solutions[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 301: 111662.

## 作者简介



**刘薇**, 2022年于潍坊科技学院获得学士学位,现为西安建筑科技大学硕士研究生,主要研究方向为微波液体检测。

E-mail: lwei0309@163.com

**Liu Wei** received her B. Sc. degree from Weifang University of Science and Technology in 2022. She is now a M. Sc. candidate at Xi'an University of Architecture and Technology. Her main research interest includes microwave liquid detection.



**叶鸣**(通信作者), 2014年于西安交通大学获得博士学位,现为西安建筑科技大学信息与控制工程学院教授,主要研究方向为微波传感与测量及其应用。

E-mail: yeming@xauat.edu.cn

**Ye Ming** (Corresponding author) received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2014. He is now a professor at the Collgeg of Information and Control Engineering at Xi'an University of Architecture and Technology. His main research interest includes microwave sensing and measurements and their applications.