

# 基于微波谐振技术的润滑油含水率 在线检测装置研发及应用

张涛<sup>1</sup>, 蒋勤<sup>1</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 丁子建<sup>1</sup>, 胡雪梅<sup>2</sup>, 韩冰<sup>1</sup>

(1. 吉林大学物理学院, 长春 130012; 2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130061)

**摘要:** 针对目前润滑油含水率检测技术仪器设备昂贵、在线测量技术较少的不足, 基于微波谐振技术设计了一种在线检测装置。该装置由微控制器单元、谐振腔、同轴传输线、压控振荡器、对数检波器、PC 机组成。结合有限元仿真软件 HFSS, 设计了微波谐振腔, 并仿真水油均匀及不均匀分布状态下的  $S$  参数响应曲线, 得到谐振频率与含水率的关系。试验搭建检测装置, 在含水率为 0~1.2% 时, 测得谐振频率与含水率的关系, 试验结果与仿真结果相符。在 16~30 °C 内进行温度补偿, 提高了检测精度。最后, 将检测装置接入油液管路中进行在线测量, 结果证明了检测装置的有效性。

**关键词:** 电磁测量; 润滑油; 微波谐振; 含水率; 水油分布

**中图分类号:** TN98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-1923-08

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230960

## Development and application of online measurement device for water content of lubricating oil based on microwave resonance technology

ZHANG Tao<sup>1</sup>, JIANG Qin<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, DING Zi-jian<sup>1</sup>, HU Xue-mei<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>1</sup>

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. College of Instrument and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** In view of the shortcomings of the current lubricating oil water content detection technology with expensive equipment and few online measurements, an online measurement device based on microwave resonance technology was designed. It consists of resonator, microcontroller unit, coaxial transmission line, voltage-controlled oscillator, logarithmic detector and PC. Combined with the finite element simulation software HFSS, a microwave resonator was designed, and the  $S$ -parameter response curve was simulated under the state of uniform and non-uniform distribution of water and oil, and the relationship between resonant frequency and water content was obtained. In the experiment, the measurement device was fabricated to measure the relationship between resonance frequency and water content in the range of 0~1.2%, and the results are consistent with the simulation. Temperature compensation was carried out within 16~30 °C to improve the measurement accuracy. Finally, the device was connected to the oil pipe

收稿日期: 2023-09-09.

基金项目: 中国航空研究院航空科学基金项目(201934034001).

作者简介: 张涛(1964-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 电磁测量方法, 微波技术应用. E-mail: zhangt@jlu.edu.cn

通信作者: 韩冰(1980-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 电磁测量方法, 磁电功能材料应用. E-mail: han@jlu.edu.cn

for on-line measurement, and the results prove the effectiveness of the measurement device.

**Key words:** electromagnetic measurement; lubricating oil; microwave resonance; water content; water-oil distribution

## 0 引言

润滑油在工业生产中发挥着重要的作用,它可以减少机械设备磨损、加速器件散热,确保工业生产安全。润滑油的含水率对其品质有很大影响。常见润滑油含水率换油标准的分辨率为 0.1%,我国润滑油最大换油标准为含水率 > 1.0%(汽轮机油)。为实时了解使用过程中润滑油含水率的变化,要求测量装置精度达到 0.1%、能够在线检测、量程高于 1.0%。目前,含水率检测方法有很多,如声波法<sup>[1]</sup>、光谱成像法<sup>[2]</sup>以及电磁法<sup>[3]</sup>等。但油液中低含水率检测方法较少,主流检测方法有蒸馏法、卡尔费休法、红外光谱法、密度法、微波谐振腔法等。其中,蒸馏法<sup>[4]</sup>为人工采取部分油样进行检测,该方法取样准确性不高,结果误差较大;卡尔费休法<sup>[5]</sup>是行业普遍的分析方法,但其需要离线采样,具有滞后性,并且测定样品操作烦琐;基于傅里叶红外光谱仪方法<sup>[6]</sup>所涉及的分析仪器复杂昂贵,不易普及;密度法<sup>[7]</sup>通过水与油的密度差异确定含水率,该方法受温度和环境影响较大,并且原油所含水分中有大量矿物质成分,会严重影响测量精度。

微波技术是检测含水率的高效无损检测技术。应用微波检测油液含水的方法可分为微波空间波投射法<sup>[8]</sup>、反射法<sup>[9]</sup>和谐振腔法<sup>[10]</sup>。其中,谐振腔法的原理是当谐振腔内电介质的介电常数<sup>[11]</sup>发生微小变化时,通过检测系统谐振相关参数以反映含水率的变化。目前,采用微波谐振法测量油液含水率的装置多针对含水率较高的应用场景,且检测精度较低(>5%)<sup>[12,13]</sup>。针对测量润滑油低含水率,以及含水率升高引起的油水分布不均匀现象的研究较少。

综上所述,针对目前润滑油含水率检测技术存在设备昂贵、检测步骤烦琐、精度不高、少有线测量的问题,本文设计了一种润滑油低含水率检测装置,利用有限元仿真软件 HFSS 设计了谐振腔,该谐振腔受水油不均匀分布影响较小,能够有效检测润滑油液中 0~1.2% 的含水率,工作频率为 8.88~9.33 GHz,并可通过温度补偿提高检

测的准确性。该检测装置在润滑油生产、运储、应用领域都具有广阔的应用前景。

## 1 含水率检测装置

### 1.1 谐振腔工作原理

谐振腔作为检测装置的核心部分,检测时谐振腔充满油液,用不同高频信号激励,当激励信号波长与谐振腔匹配时,会产生谐振。谐振腔工作原理涉及微扰理论,即介质介电常数发生微小的变化,都会影响腔的谐振状态。润滑油液的介电常数在固定温度、压力条件下只与其含水量有关,当腔内润滑油液的含水率发生变化时,腔的谐振频率也发生变化。假定腔内的电磁场变化很小,可近似为零。微扰公式可近似表示为<sup>[14]</sup>:

$$\frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{\int_V (\Delta\epsilon_{\text{mix}} |E|^2 - \Delta\mu_{\text{mix}} |H|^2) dV}{\int_V (\epsilon_{\text{mix}} |E|^2 - \mu_{\text{mix}} |H|^2) dV} \quad (1)$$

式中: $f_1$ 和 $f_2$ 为腔体微扰前、后的谐振频率; $\epsilon_{\text{mix}}$ 和 $\mu_{\text{mix}}$ 分别为腔内含水油液的介电常数和磁导率, $\epsilon_{\text{mix}} = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,其中 $\epsilon_0$ 为自由空间的介电常数, $\epsilon_r$ 为相对介电常数; $E$ 和 $H$ 分别为腔内的电场和磁场; $V$ 为整个腔体的体积; $\Delta\epsilon_{\text{mix}}$ 和 $\Delta\mu_{\text{mix}}$ 分别为腔内油液介电常数和磁导率的变化量,因为油液是非磁性介质,则 $\mu_{\text{mix}} \approx 1, \Delta\mu_{\text{mix}} = 0$ 。

由式(1)可知,腔内介质的谐振频率 $f$ 随介质的介电常数 $\epsilon_{\text{mix}}$ 变化而变化。

### 1.2 油水混合物的介电常数模型

目前,有较多用于油水含水率检测的混合物介电模型,如 Maxwell-Garnett 模型<sup>[15]</sup>、Bruggeman 模型<sup>[16]</sup>等。本文测量的油液为微量含水,混合物是油包水状态,更符合 Bruggeman 模型。基于 Bruggeman 模型计算可得到油液的含水率为:

$$\beta = 1 - \frac{\epsilon_{\text{mix}} - \epsilon_{\text{water}}}{\epsilon_{\text{oil}} - \epsilon_{\text{water}}} \left( \frac{\epsilon_{\text{oil}}}{\epsilon_{\text{mix}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为油液混合物的含水率; $\epsilon_{\text{water}}$ 、 $\epsilon_{\text{oil}}$ 、 $\epsilon_{\text{mix}}$ 分别为水、油、油水混合物的介电常数。

结合式(1)(2)可以得到:随着含水率的增大,混合物的介电常数增大,谐振频率减小。

### 1.3 检测装置结构

整个检测装置由谐振腔、压控振荡器(Voltage-controlled oscillator, VCO)、对数检波器模块(AD8317)、温度传感器以及微控制单元(Microcontroller unit, MCU)组成,如图 1 所示,MCU (STM32H7)通过 D/A 转换器为 VCO 提供模拟电压信号,VCO 根据输入的电压线性输出扫频微波信号给谐振腔,对数检波器将检测的射频信号转换为电压信号。同时,温度传感器实时监测谐振腔内的油液温度。MCU 控制采集对数检波器以及各传感器的信号,发送给 PC 进行分析处理并得到结果。

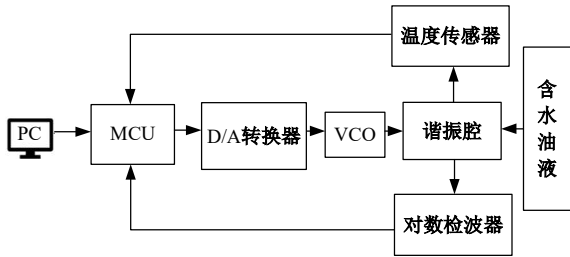


图 1 含水率检测装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of moisture content detection device

## 2 谐振腔的设计及仿真

### 2.1 谐振腔的设计

本文使用有限元仿真软件 HFSS 辅助设计圆柱形谐振腔,圆柱腔具有制造简单、易于激励、与管线匹配等优点。谐振腔的两端加有带孔的盖子,方便匹配安装管道,并使油液能自由流通,可实现在线检测。谐振腔如图 2 所示,其内半径为 10 mm,腔壁厚度为 8 mm;高度为 25 mm。整个谐振腔使用紫铜,两端的盖使用黄铜;微波探针用镀金铜质材料,长度为 4 mm、直径为 0.5 mm 且伸入腔体 2.5 mm,孔洞直径为 4 mm。两个探针位于谐振腔电场最强处且两探针呈 90°,探针通过 SMA(SubMiniature version A)口连接到腔外壁,一端接到对数检波器,一端接到 VCO。

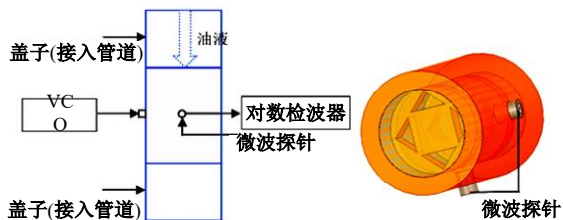


图 2 谐振腔结构

Fig. 2 Resonant cavity structure

S 参数是谐振腔传输信号的重要参数之一,又被称为散射系数。S21 为正向传输系数<sup>[17]</sup>,其值反映的是输出功率与输入信号的比值。谐振腔的工作模式为 TE211,与其他模式相比,TE211 模式具有合适的尺寸、探针在侧面激励、易于在线检测设计的优点,可降低成本且便于安装;其插入损耗也略微降低,可用于高精度检测;同时,探针可放在圆柱腔壁外侧,方便实现在线检测。通过仿真求解本谐振腔 Q 值为 14 867, Q 值较高,可实现高精度检测。仿真求解谐振腔内充满纯油时频率与透射系数 S21 的关系曲线,即 S21 响应曲线,如图 3 所示,该响应曲线在极值点处对应的  $f$  为谐振频率(9.23 GHz),曲线形状尖锐,谐振响应好。

图 4 为 TE211 模式谐振状态下圆柱腔的电场分布,可以看出,谐振腔壁的中心电场强度最大,因此,探针放置在谐振腔壁的中心位置。

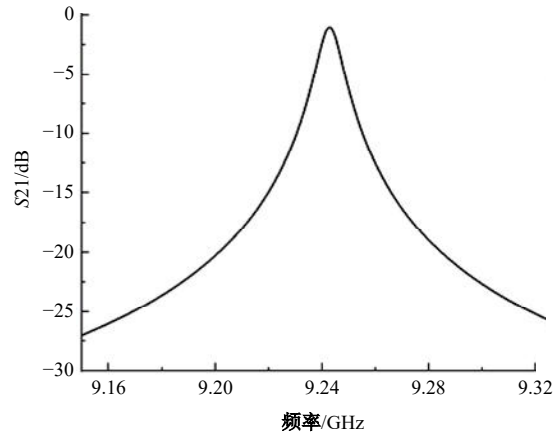


图 3 纯油的 S21 仿真响应曲线

Fig. 3 S21 Response curve of the resonator filled with pure oil under simulation

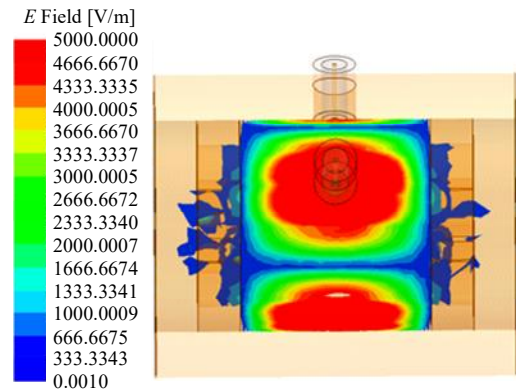


图 4 谐振腔电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of the resonant cavity

## 2.2 不同介质分布

润滑油中的微量含水,在不同环境或不同时刻,水的分布均匀状态不同。利用 HFSS 求解模拟不同条件下谐振腔的频率响应。将扫描频率设置为 8.860 GHz 到 9.370 GHz,间隔为 0.133 MHz,扫频采样速率为 1.33 MHz/s。

### 2.2.1 理想均匀分布

当水均匀分布在油中,仿真求解含水率为 0.0%~1.2%,间隔为 0.1% 的油液 S21 曲线,结果如图 5 所示,并作出其中含水率与谐振频率的关系曲线,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,在理想均匀分布下,油液含水率与谐振频率的关系为线性,斜率为 -0.124,表示含水率(体积百分比)每增加 1%,谐振频率下降 0.124 GHz,即灵敏度为每 0.1% 含水率变化谐振频率间隔达 12.4 MHz。

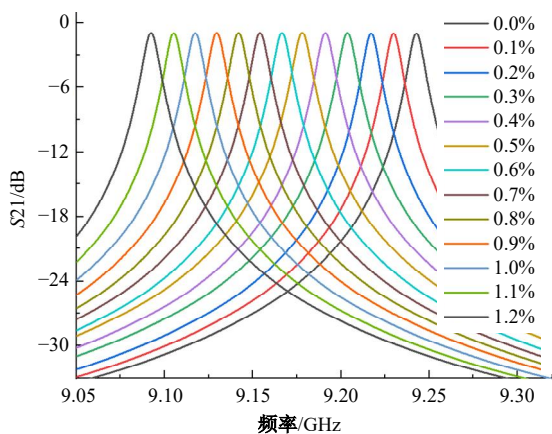


图 5 水油均匀状态下不同含水率的 S21 曲线

Fig. 5 S21 curves of different water content under uniform state of water and oil

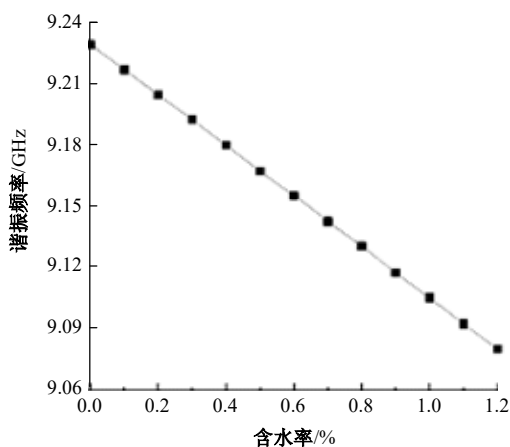


图 6 水油均匀谐振频率与含水率的关系

Fig. 6 Relationship between resonant frequency and water content of uniform water-oil mixture

### 2.2.2 油水混合不均匀

当水含量升高时,水会随着时间慢慢下沉,下部含水会变多。为了简化模型,仿真中把谐振腔体积等分为 A、B 两个区域,上区域 A 含水率变低,下区域 B 含水率变高,如图 7 所示,在腔的 A、B 区域分别设置不同的含水油液,A 区域含水率为  $X-Y$ ;B 区域含水率为  $X+Y$ 。其中, $X$  为平均含水率, $Y$  为由区域 A 下沉到区域 B 的水分。若以 0.1% 间隔进行仿真, $Y$  可分别取值 0.0%, 0.1%, 0.2%, ...,  $X-0.1%$ 。例如,仿真含水率为 0.3% 的不均匀含水, $X=0.3%$ , $Y$  分别取值为 0.0%、0.1%、0.2%,则区域 A 含水率分别设置为 0.3%、0.2%、0.1%,对应区域 B 含水率分别设置为 0.3%、0.4%、0.5%。含水率为 0.3% 的仿真结果如图 8 所示,可见含水率为 0.3% 均匀分布和非均匀分布( $Y=0.1%$  和 0.2%) 的 S 参数曲线几乎重合,谐振频率一样,说明含水在此非均

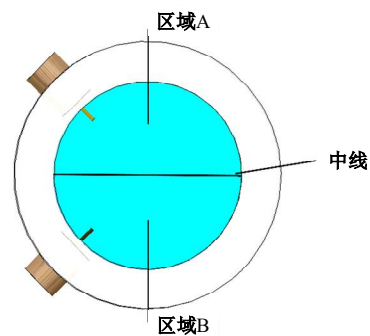


图 7 谐振腔水油混合不均匀模型

Fig. 7 Non-uniform model of water-oil mixture in resonator

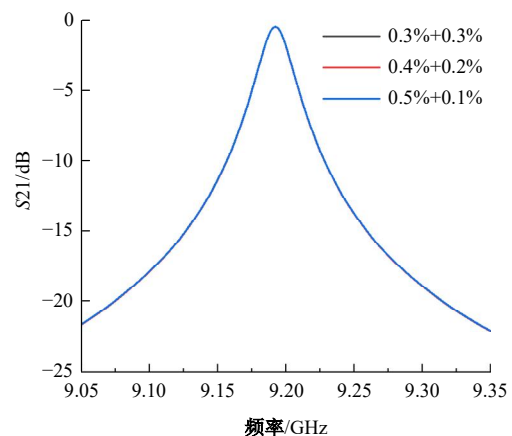


图 8 平均含水率 0.3%, 均匀与非均匀 S21 曲线仿真

Fig. 8 Average moisture content of 0.3%, S21 curve simulation of uniform and non-uniform mixture

匀分布状态下不影响检测结果。

具体仿真了含水率为 0.2%~1.2%、间隔为 0.1% 的润滑油,结果发现:0.2%~0.8% 区间内水油分布不均不会造成频率偏移,这是因为不均匀造成的频率偏移小于 HFSS 构建模型仿真求解的精度(0.1 MHz);0.8% 之后开始发生频率偏移,0.9% 的仿真结果如图 9 所示,随着含水率的升高频差开始变大,频差具体结果如表 1 所示。

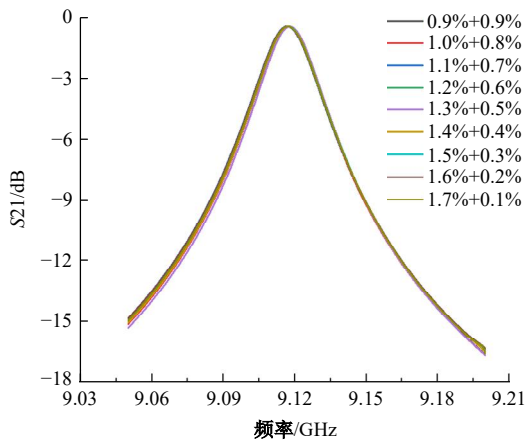


图 9 平均含水率 0.9%,均匀与非均匀 S21 曲线仿真

Fig. 9 Average moisture content of 0.9%, S21 curve simulation of uniform and non-uniform mixture

表 1 不同含水油液的谐振频率

Table 1 Resonant frequency of different aqueous oils

含水率/%	谐振频率/GHz	频率偏移/MHz	频率间隔/MHz
0.2	9.204 7	0.0	0.0
0.3	9.192 2	0.0	12.5
0.4	9.177 6	0.0	14.6
0.5	9.166 2	0.0	11.4
0.6	9.154 5	0.0	11.7
0.7	9.141 5	0.0	13.0
0.8	9.129 2	0.0	12.3
0.9	9.117 5	0.7	11.7
1.0	9.105 5	2.1	12.0
1.1	9.093 1	2.3	12.4
1.2	9.080 4	2.7	12.7

图 10 为含水率为 0.2%~1.2% 时,其与谐振频率的关系曲线。由图 10 可以看出,在不均匀分布下,油液平均含水率与谐振频率的关系近似为线性降低,斜率为 -0.123,含水率越高,最大偏差越大。在含水量为 0.2%~1.2% 时,每 0.1% 含水率谐振频率间隔为 12.3 MHz。这种分布情况与理想均匀分布情况得到的谐振频率几乎相同;由表 1 可以看出,最大的频率偏移为 2.7 MHz

(对应含水率最大误差为 0.022%),每 0.1% 谐振频率的平均间隔为 12.4 MHz,在仿真结果的最大频率偏移情况下,以 0.1% 含水率作为要求分辨率,当前含水率的结果不会偏移邻近 0.1% 含水率区间,对分辨含水率的影响很小。

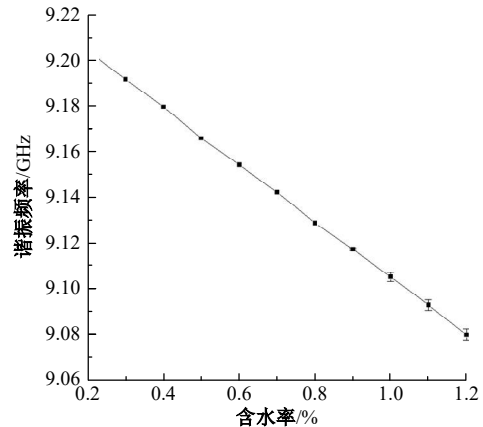


图 10 水油不均匀谐振频率与含水率关系

Fig. 10 Relationship between resonant frequency and water content of non-uniform water-oil mixture

### 3 谐振频率检测试验

#### 3.1 数据采集

根据图 1 搭建整个试验检测装置,如图 11 所示。该谐振腔横置放置在支架台上,两端铜质圆管端模仿实际油管连接端口,探针外端与 SMA 口相接;使用同轴线连接 VCO 和对数检波器,同轴线的驻波比  $\leq 1.15$ ,能够很好地传输信号;VCO 与对数检波器连接至 MCU。



图 11 试验检测装置

Fig. 11 Experimental detection device

试验用油为 68 号无水汽轮机润滑油,用去离子水配制容量为 50 mL、含水率为 0~1.2%、间隔为 0.1% 的油液样品,将配制好的油样放置在室

温下,等待其温度与室温(24℃)相同。之后,将样品缓慢倒入谐振腔,控制器开始扫频,从 8.990 GHz 到 9.270 GHz,间隔为 0.666 MHz,整个扫频时间为 40 s。

### 3.2 数据分析

重复多次试验,记录得到的谐振频率,将试验曲线与仿真曲线结合,如图 12 所示,当油液含水率增大时,3 条直线对应的谐振频率都是单调减小的;试验测得的谐振频率与含水率关系呈线性降低,斜率为 -0.106,表示含水率(体积百分比)每增加 1%,谐振频率下降 0.106 GHz,即检测灵敏度为每 0.1% 含水率变化谐振频率变化可达到 10.6 MHz;仿真的谐振频率与含水率的关系也呈线性递减。这是因为,随着油液中含水量的增加,电介质的介电常数增加,基于式(1)(2),介电常数增加会导致谐振频率减小,试验与理论及仿真结果基本吻合。应用数据处理软件 Origin 2021,得到试验结果拟合的谐振频率  $f$  与含水率  $\beta$  的关系式为:

$$f = 9.31984 - 0.10661\beta \quad (3)$$

式(3)的相关系数  $R^2 = 0.9979$ , ( $R^2 = 1$ ) 表示试验数据与拟合关系完全一致,均方根误差  $RMSE = 0.0021$ ,试验测量曲线为线性,含水率每增加 1%,谐振频率下降 0.106 GHz;当含水率变化 0.1% 时(常见润滑油含水率换油标准的分辨率为 0.1%,也是本装置要求的分辨率),谐振频率变化量  $\Delta f = 0.0106$  GHz,远大于仿真结果的最大频率偏移(2.7 MHz),表明该装置试验结果符合实际应用需要。

### 3.3 温度补偿

在实际工作环境中,很难像在实验室中那样精确地控制环境温度。温度  $T$  会在一定范围内浮动,影响  $\epsilon_{mix}^{[18]}$ ,进而影响谐振频率  $f$ 。为了消除温度影响,实现更精确的测量,装置需要进行温度补偿。

根据实际工作环境温度(从 16℃ 到 30℃),温度间隔设置为 2℃。分别测定含水率为 0.0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 的油液谐振频率,每个温度下试验测定 5 次,取平均值。之后,将温度  $T$ 、含水率  $\beta$  和谐振频率  $f$  的关系进行 3D 曲面拟合,结果如图 13 所示,当温度升高时,谐振频率随之升高。温度与谐振频率的变化曲线呈线性增加。温度  $T$ 、含水量  $\beta$  和谐振频率  $f$  之间关系的表

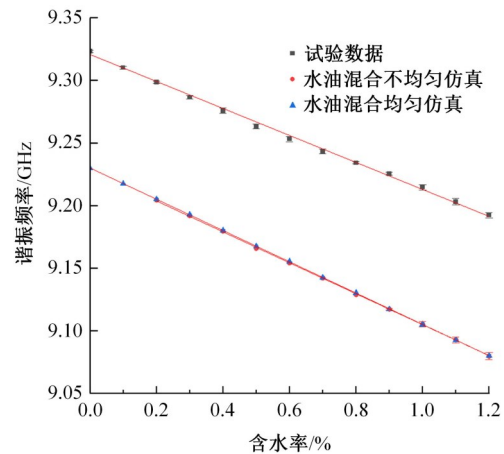


图 12 试验与仿真谐振频率与含水率的关系曲线  
Fig. 12 Relationship between resonance frequency and water content in the simulation and experiment

面图,其形状呈平面。拟合关系式为:

$$f = 9.28604 - 0.11616\beta + 0.00153T \quad (4)$$

式(4)的相关系数  $R^2 = 0.9995$ ,均方差根  $RMSE = 0.0005$ 。结果表明:温度为 16~30℃ 时,温度每升高 1℃,油液的谐振频率增大 1.5 MHz;在给定温度  $T$  和谐振频率  $f$  的平面方程下,可以确定油液含水率  $\beta$ ;在任意一温度下,谐振腔的灵敏度都能达到 0.1%,且相邻频率之间频率间隔都能达到 11.6 MHz。

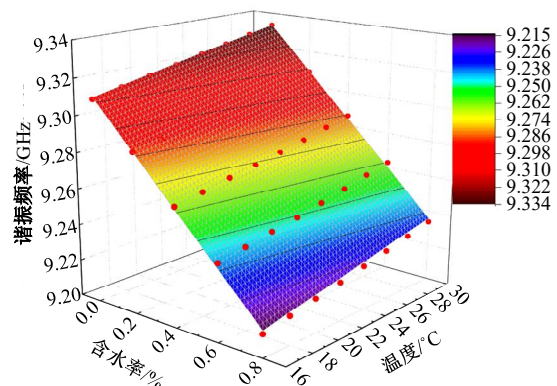


图 13 温度、谐振频率、含水率拟合关系曲面  
Fig. 13 Temperature, resonant frequency, moisture content fitting relation surface

将测量装置接入油液管道中进行在线测量,如图 14 所示。为验证装置测量的有效性,使用装置测得油液温度  $T$  和谐振频率  $f$ ,代入式(4)得到测量含水率  $\beta$ 。以卡尔费休法(精度为 0.001%)测得的含水率作为标准进行多次对比试验,检测结果如表 2 所示。



图14 谐振腔在线检测

Fig. 14 Resonant cavity online measurement

表2 实际在线测量与标准对比

Table 2 Comparison of online measurement and standard

标准含水率/%	温度/℃	检测数据/%	误差/%
0.227	30	0.209	0.018
0.233	26	0.212	0.021
0.217	23	0.202	0.015
0.242	20	0.231	0.011
0.235	16	0.221	0.014
0.717	30	0.721	0.004
0.726	26	0.693	0.033
0.707	23	0.688	0.019
0.689	20	0.671	0.018
0.692	16	0.681	0.011
1.227	30	1.205	0.022
1.223	26	1.235	0.012
1.207	23	1.221	0.014
1.191	20	1.209	0.018
1.204	16	1.215	0.011
0.174	30	0.188	0.014
0.523	30	0.504	0.019
0.012	26	0.019	0.007
0.421	26	0.397	0.024
0.329	23	0.367	0.038
0.609	23	0.612	0.003
0.431	20	0.422	0.009
0.835	20	0.848	0.013
0.921	16	0.944	0.023
1.106	16	1.119	0.013

由表2可见:检测误差最大为0.038%,小于检测要求的分辨率0.1%,表明该装置能有效检测润滑油的含水率,满足实际在线检测要求。

## 4 结论

(1)设计了一种谐振腔,利用HFSS仿真了不同均匀状态下的水油分布,结果表明:含水率与谐振频率的关系呈线性递减。

(2)基于微波谐振腔法搭建了检测装置,由

微控制器单元、谐振腔、同轴传输线、VCO、对数检波器模块以及PC组成。

(3)温度补偿修正结果表明:在含水率为0.0%~1.2%时,检测装置的分辨率为0.1%,水油不均匀分布导致的最大检测误差为0.038%,试验结果与仿真结果趋势一致。

## 参考文献:

- [1] 孙永海,何小平,孙瑜. 基于声波的玉米含水量测定[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(3): 726-731.  
Sun Yong-hai, He Xiao-ping, Sun Yu. Corn moisture measurement based on acoustic analysis[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 726-731.
- [2] 赵茂程,陈加新,邢晓阳,等. 叶片含水率推扫式高光谱成像去条纹标定法优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 212-220.  
Zhao Mao-cheng, Chen Jia-xin, Xing Xiao-yang, et al. Method of de-stripe calibration applied in water content spatial visualization in ginkgo leaf on spectral imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 212-220.
- [3] 盛庆元,张西良,杨越,等. 高低频双频激励土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 228-234.  
Sheng Qing-yuan, Zhang Xi-liang, Yang Yue, et al. Design and experiment of soil moisture sensor based on dual frequency excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 228-234.
- [4] 张敏,何海洋,郭琼艳. 蒸馏法测定原油含水率准确性探讨[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(12): 130.  
Zhang Min, He Hai-yang, Guo Qiong-yan. Discussion on the accuracy of determination of water content of crude oil by distillation method [J]. China Chemical Trade, 2019, 11(12): 130.
- [5] ASTM D6304—20. Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric karl fischer titration[S].
- [6] Voort F R V D, Sedman J, Cocciardi R, et al. An automated FTIR method for the routine quantitative determination of moisture in lubricants: an alternative to Karl Fischer titration[J]. Talanta, 2007, 72(1): 289-295.
- [7] 任磊,陈祥光,刘春涛,等. 基于模式分类的油水混

- 合物含水率测量方法[J]. 化工学报, 2008, 59(4): 970-976.
- Ren Lei, Chen Xiang-guang, Liu Chun-tao, et al. Measurement method of water-oil mixture moisture content based on pattern classification[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 59(4): 970-976.
- [8] Karimi M A, Sh-amim A, Arsalan M. Low cost and pipe conformable microwave-based water-cut sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(21): 7636-7645.
- [9] Zhu L, Li Wi, Han X Y, et al. Microfluidic flexible substrate integrated microstrip antenna sensor for sensing of moisture content in lubricating oil[J]. International Journal of Antennas & Propagation, 2020, 2020(1): 1-9.
- [10] Castle G S P, Roberts J. A microwave instrument for the continuous monitoring of the water content of crude oil[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(1): 103-108.
- [11] 魏秀娜, 曹博武, 宋佳明. 关于电介质极化的分析[J]. 中国战略新兴产业, 2018(30): 197.
- Wei Xiu-na, Cao Bo-wu, Song Jia-ming. Analysis of dielectric polarization [J]. China Strategic Emerging Industries, 2018(30): 197.
- [12] 黄芬. 基于微波传输特性的原油含水率测量方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 2015.
- Huang Fen. Research on measurement method of crude oil moisture content based on microwave transmission characteristics [D]. Xi'an: School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, 2015.
- [13] Yang Y G, Xu Y, Yuan C, et al. Water cut measurement of oil-water two-phase flow in the resonant cavity sensor based on analytical field solution method [J]. Measurement, 2021, 174(2/3): No. 109078.
- [14] Li Z, Meng Z Z, Haigh A, et al. Characterisation of water in honey using a microwave cylindrical cavity resonator sensor[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: No. 110373.
- [15] Sihvola A. Mixing rules with complex dielectric coefficients[J]. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2000, 1(4): 393-415.
- [16] Bruggeman D A G. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen I. dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen[J]. Annalen der Physik, 1935, 416(8): 665-679.
- [17] 黄振兴. 微波传输线及其电路[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2013.
- [18] Udo K. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1989, 34(4): 371-374.