

DOI:10.11784/tdxbz202310019

油水两相流超低含水率微波相位检测方法

徐英^{1,2}, 孟峥^{1,2}, 袁超^{1,2}, 左荣基^{1,2}, 韩春红³, 艾克拜尔·麦麦提⁴

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 天津市过程检测与控制重点实验室, 天津 300072;
3. 大庆油田设计院有限公司, 大庆 163000; 4. 新疆维吾尔自治区计量测试研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 原油外输过程中超低含水率的在线精确测量对确定原油的品质和保障原油交易时双方的利益有重要的意义。电磁波在含水原油介质中传播时会发生幅值衰减和相位移动, 天线作为一种接收和发射电磁波的基本结构, 被广泛运用于微波测量系统中。针对天线的谐振特性, 设计了一种基于双天线法的超低含水率测量微波传感器, 通过测量传感器 S21 幅值和相位的变化, 感测出油水两相流中的含水率。采用 COMSOL Multiphysics 软件实现了对传感器结构的优化; 通过分析传感器的 S21 响应与含水率变化关系, 确定了传感器测量超低含水率的可行性, 发现了适合传感器工作的频率范围。采用油水静态混合乳化实验和油水流动实验测试对仿真结果进行了验证。在 4.64 GHz 频率处, S21 幅值和相位随含水率均呈线性变化, S21 相位值测量灵敏度高, 适用于 0~3.00% 范围内的含水率测量。随后, 根据实验的相位结果, 建立了 0~3.00% 超低含水率范围的油水乳化静态实验和动态实验含水率预测模型, 在 95% 置信概率时, 两个模型绝对误差均优于 $\pm 0.1\%$ 。基于本研究给出的微波含水率测量传感器, 其油水乳化实验测得含水率可以在一定程度上代替油水动态实验的测量结果。

关键词: 两相流; 数值模拟; 优化设计; 微波传感器; 天线; 含水率; S21 幅值; S21 相位

中图分类号: TE81 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2024)10-1080-10

Microwave Phase Detection Method for Ultralow Water Fraction in Oil-Water Two-Phase Flow

Xu Ying^{1,2}, Meng Zheng^{1,2}, Yuan Chao^{1,2}, Zuo Rongji^{1,2}, Han Chunhong³, Maimaiti Aikebaier⁴

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China;

3. Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing 163000, China;

4. Xinjiang Uygur Autonomous Research Institute of Measurement and Testing, Urumqi 830011, China)

Abstract: Accurate online measurements of ultralow water fraction during crude oil transport are crucial for determining oil quality and protecting the interests of parties involved in crude oil trading. Amplitude attenuation and phase shift occur when electromagnetic waves propagate in water-containing oil media. As a basic structure for receiving and transmitting electromagnetic waves, antennas are extensively employed in microwave measurement systems. Because of the resonant characteristics of the antenna, a microwave sensor based on the dual-antenna method was constructed to determine the ultralow water fraction. The water fraction in the oil-water two-phase flow can be sensed by measuring the changes in the S21 amplitude and S21 phase. Additionally, COMSOL Multiphysics software was employed to optimize the sensor structure. By analyzing the relation between the S21 response of the sensor and the water fraction changes, the feasibility of measuring ultralow water fraction using the sensor was determined, and the optimal frequency range applicable for the sensor operation was determined. The simulation results were verified by an oil-water static mixing emulsification experiment and a oil-water flow experiment. At 4.64 GHz, the amplitude and phase of

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-12-19.

作者简介: 徐英 (1970—), 女, 博士, 教授, xuying@tju.edu.cn.

通信作者: 袁超, yuanchao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62273252, 62203325).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62273252, No. 62203325).

S21 changed linearly with water fraction, and the S21 phase value presented higher measurement sensitivity, making it applicable for water fraction measurements in the range of 0—3.00%. Moreover, based on the phase results of the experiment, static oil-water emulsification and dynamic experiment models were developed to predict the 0—3.00% ultralow water fraction. Both absolute errors were below 0.1% with a 95% confidence level. Based on the microwave sensor given by this study, it is concluded that the oil-water emulsification experiment can replace the dynamic experiment to a certain extent.

Keywords: two-phase flow; numerical simulation; optimal design; microwave sensor; antenna; water fraction; S21 amplitude; S21 phase

原油含水率是石油化工行业中石油开采、运输及炼化中一个重要的参数,检测油田产出液中水的含率,是衡量生产井中开采石油效率的重要指标之一。在联合站、集输站运输原油的过程中,为了充分保证原油的质量,要求运输过程中的原油含水率不超过3%^[1]。因此,实现原油外输过程中超低含水率的实时高精度测量对确定原油的品质和保障原油交易时双方的利益有重要的意义。

到目前为止,测量相含率的方法有电容法^[2-3]、差压法^[4]、电导法^[5-6]、超声法^[7-8]、射线法^[9-10]、微波法等^[11-12]。微波法对油水两相流中的水介质极其敏感,具有测量范围广、测量精度高的优点,近年来有着较快的发展^[13-16]。

微波谐振法和微波透射法是测量多相流体积分数的两种主要方法^[12]。微波谐振法^[17-20]可以通过测量谐振频率的变化来获得油水两相流中水的体积分数,测量范围广且精度高,多用于0~100%含水率范围的测量,但是测量结果受到矿化度的影响较大。微波透射法是另一种测量含水率的方法,通过测量微波传输过程中的幅值或相位的变化来测量含水率,测量信息丰富。姜海潮^[21]和徐鑫^[22]采用天线进行激励和接收,传感器激励频率在20~40 MHz,通过测量相位差或电压值来测量含水率,含水率测量范围0~100%。Ma等^[23]提出了一种基于文丘里嵌入微波传输线的微波传感器,通过二维仿真的方法模拟了油包水和水包油不同状态下传感器的输出结果,在含水率0~100%范围内与动态实验结果有较好的一致性,为昂贵的油水分散流动试验提供了一种低成本的替代方法。Liu等^[12]设计了一款具有透射结构的平行线微波谐振传感器,用于高含水率90%~99%范围内的测量。

在油包水低含水率测量方面,Yang等^[24]描述了一种工作在1 GHz频率下,能够测定油水乳化液含水范围0~3%的实验装置,并介绍了该仪器的安装和现场测试结果。Sharma等^[25]提出了一种基于开放式微波谐振器和近壁面微扰的非侵入式测量原理,用

于油水流动过程中含水率低于5%的非侵入式测量。但由于传感器只探测管壁附近小部分流体,因此需要液体混合均匀。Yuan等^[11]提出了一种基于TM₁₁₀模式对油水混合流动相空间分布不敏感的微波圆柱形谐振腔,用于确定含水率低于20%的向上流动油水混合物中的含水率。

现有的基于微波透射的传感器都用于高含水率或是全量程含水率的测量,对于微波法测量超低含水率的传感器鲜有文献报道。国际上,许多商业公司基于微波法开发了成熟的油水两相流低含水率测量产品,大多产品采用天线法测量20%以下的含水率。虽然这些产品针对微波透射法测量超低含水率进行了研究,但其并没有给出清晰、详细的测量原理。

基于原油外输输油管线含水率低、测量精度高的要求,本研究设计了一种插入式双平行天线微波传感器,旨在用于含水率0~3.00%范围的高精度测量。两根平行电极从管道上方开口处竖直插入管道,与油水介质直接接触,提高了传感器的灵敏度,这种插入放置的形式方便安装和拆卸,为在线计量提供便利。本文利用COMSOL Multiphysics软件,通过有限元法进行了仿真计算,研究了传感器S21幅值、S21相位响应与含水率的关系,并对传感器的结构进行了优化设计;分别建立了传感器静态和动态测量系统,进行含水率0~3.00%范围的静态油水乳化实验和油水动态实验,验证了仿真方法的合理性。通过动态实验数据建立含水率预测模型,为油水两相流超低含水率测量提供了新的解决方案。

1 传感原理和传感器模型

1.1 传感原理

电磁波在含水原油介质中传播时会发生幅值衰减和相位移动。超低含水原油可以看作弱导电介质,根据麦克斯韦方程^[26],在弱导电媒介和低损耗媒介中,微波信号的幅值衰减常数 k_a 和相位常数 k_b 可近似^[27]为

$$k_a = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_m}} \quad (1)$$

$$k_b = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon_m} \quad (2)$$

式中: f 为微波信号的频率; ϵ_m 为介电常数; σ 为电导率; μ 为磁导率.

天线是指在无线电中进行电磁波发射或者接收的设备部件^[27]. 偶极天线是最基本的天线形式, 球坐标下的偶极天线示意如图 1 所示. 本文中所用到的天线在整个系统中起到了发送和接收电磁波的作用.

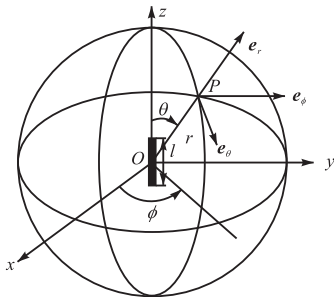


图 1 球坐标下的偶极天线示意

Fig.1 Schematic of the dipole antenna in spherical coordinates

偶极天线在空间内 P 点产生的电场 E 为

$$E = e_r \frac{2Ilk^3 \cos\theta}{4\pi\omega\epsilon_m} \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr} + e_\theta \frac{Ilk^3 \sin\theta}{4\pi\omega\epsilon_m} \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr} \quad (3)$$

式中: e_r 和 e_θ 为不同方向的单位电场强度矢量; l 为天线的有效长度; k 为传播常数; r 为观测点 P 离偶极天线中心点的距离; I 为电流的峰值; θ 为观测点 P 与偶极天线的夹角; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$.

竖直具有 $1/4$ 波长的天线称为单极天线, 如图 2 所示. 该天线安装在一个接地平面上, 地面上的单极天线具有与偶极天线相同形式的电流和辐射模式.

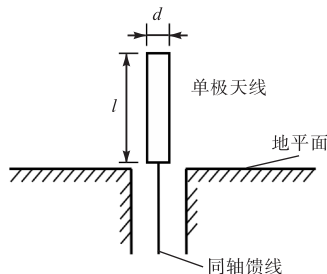


图 2 单极天线结构示意图

Fig.2 Schematic of the monopole antenna structure

单极天线的馈电方式采用下端同轴馈线馈电, 馈线的接地导体与大地相连接. 当单极天线的长度为激励信号波长的 $1/4$ 时, 天线产生谐振现象, 当波长

减小时还会产生高次谐振现象. 单极天线谐振频率计算公式为

$$f = c/(4l) \quad (4)$$

式中 c 为光速.

天线在谐振频率下向外辐射的能量强, 有利于本研究针对超低含水率的敏感场测量. 油水均匀混合的混合介电常数可以表示^[19]为

$$\epsilon_m = \alpha_w \epsilon_w + (1 - \alpha_w) \epsilon_o \quad (5)$$

式中: α_w 为油水混合物中的截面含水率; ϵ_w 为水的介电常数; ϵ_o 为油的介电常数.

由式 (1)、式 (2) 和式 (5) 可知, 油水混合物的混合介电常数随截面含水率的变化而变化, 当油水均匀混合时, 截面含水率与体积含水率 (β_w) 相同. 电磁波在不同介电常数介质中产生的幅值衰减和相位移动是不同的, 因此, 可以通发射特定频率的电磁波来测量 S21 响应信号, 从而反映出油水两相流中含水率的大小, 实现含水率的测量.

1.2 传感器模型

本研究提出的微波传感器的模型及其电磁场分布如图 3 所示, 该模型分为 3 部分, 两端开孔的圆柱形波导、平行放置的两根天线和金属保护壳, 两根天线的直径均为 d , 一根天线作为信号激励, 发出特定频率的电磁波信号, 一根天线作为信号接收. 流体从圆柱形波导开口一端流向另一端, 将发射天线与接收天线平行浸没在被测的含水原油中, 插入深度为 h , 两根天线之间相隔一定的距离 d_{ta} , 施加激励信号后, 在发射天线的四周将产生交变的电磁场, 电磁波在通过两根天线之间的油水混合物时会发生幅值衰减和相位位移, 然后被接收天线接收. 为了提高测量的灵敏度, 同时对天线起到支撑保护作用, 两根天线外侧加入一个金属外壳将电磁场束缚在两根天线周围.

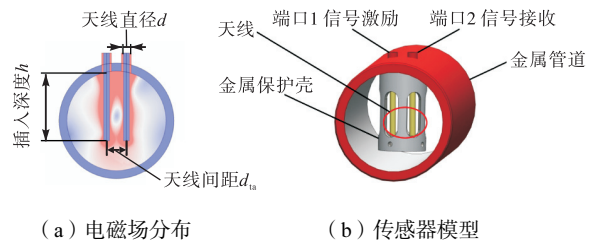


图 3 微波传感器模型和电磁场分布

Fig.3 Microwave sensor model and electromagnetic field distribution

2 传感器结构优化设计和仿真研究

2.1 仿真设置

基于有限元的方法, 通过 COMSOL Multiphysics

软件 6.0 得到了传感器传输系数(S21)的幅值和相位输出,传感器仿真模型如图 3 所示. S21 参数是当端口 2 连接到匹配负载时端口 1 的正向传输系数,可以表示^[28]为

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (6)$$

式中: a_1 和 a_2 分别为端口 1 和端口 2 的归一化电压入射波; b_2 为端口 2 的归一化电压反射波.

两个电极的顶端分别为端口 1 和端口 2. 端口 1 用于激励微波信号,端口 2 接收信号. 端口 1 的激励功率为 1 mW. 本文将边界条件设置为理想电导体,铜、不锈钢、油和聚四氟乙烯(PTFE)的相对介电常数分别为 1.0、1.0、2.2 和 2.1,其相对磁导率均为 1.0. 铜、不锈钢、PTFE 和自来水的电导率分别为 5.998×10^7 S/m、 1.740×10^6 S/m、0 S/m 和 0.027 S/m. 水的介电常数实部和虚部分别由 Debye 公式^[29]和 Klein-Swift 公式^[30]给出. 管道内油水混合物设置为均相流,不同含水率下的油水混合介电常数通过式(5)得到.

2.2 传感器最佳工作频率

天线长度的确定对本传感器工作频率的选择具有重要作用,基于图 3 所示的传感器结构建立了 COMSOL 仿真模型,其中天线直径和天线间的距离分别为 3 mm 和 10 mm,管道内径和外径分别为 50 mm 和 60 mm,分别改变天线的插入深度为 25 mm、30 mm 和 35 mm 进行纯油介质的仿真研究,频率范围 0.10 ~ 6.00 GHz(步长 50 MHz),得到 S21 幅值曲线如图 4 所示.

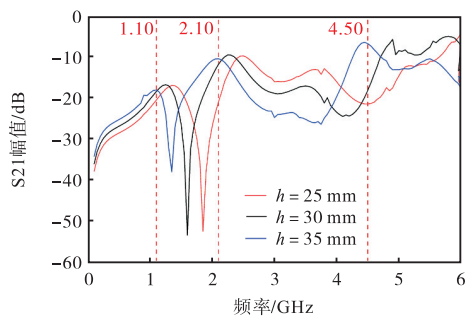
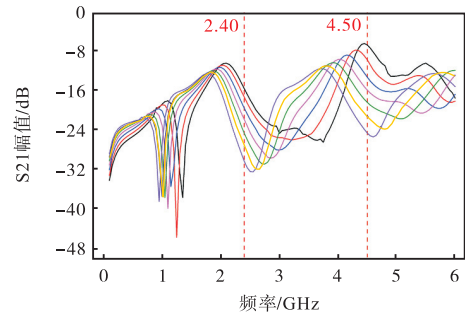


图 4 不同插入深度下 S21 幅值曲线

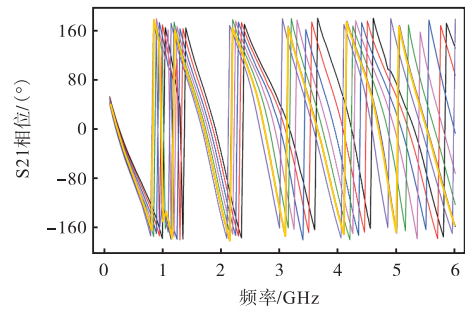
Fig.4 S21 amplitude curves at different insertion depths

由图 4 可以看出,随着激励频率的变化,S21 幅值衰减不同,在多个频点下都出现谐振峰值,随着天线长度的增加,传感器的谐振峰不断向左移动,当 h 增大到 35 mm 时,在 4.00 ~ 5.00 GHz 频率之间出现高次谐振峰值,考虑到天线越长谐振频率越小,电路测量越容易,以及天线越长微波场感测到的截面信息越丰富,因此 h 被确定为 35 mm.

当天线的插入深度为 35 mm 时仿真模拟了不同含水率下传感器的 S21 幅值和相位输出. 含水率范围 0 ~ 3.00% (间隔 0.50%), 频率范围 0.10 ~ 60.0 GHz (步长 50 MHz), 得到 S21 幅值和相位扫频曲线如图 5 所示. 从仿真结果可以看出,随着激励频率的变化,激励信号通过油水介质后的幅值衰减和相位移动是不同的,为了实现超低含水率的高精度测量,最佳激励频率应该设置在幅值衰减和相位移动显著的频率附近. 根据 S21 幅值曲线可以看出在频率 2.40 GHz 和 4.50 GHz 附近,S21 都随着含水率单调变化,但是在 4.50 GHz 处 S21 幅值的衰减更小,S21 幅值随着 3.00% 含水率量程变化更大,且相位在 4.50 GHz 处随着含水率变化也是单调的,因此激励频率为 4.50 GHz 最适合测量. 需要注意的是,如果传感器模型的尺寸(例如管道的尺寸、天线长度等)发生变化,则会改变激励频率和传感器特性,需要通过以上仿真方法重新确定激励频率.



(a) S21 幅值



(b) S21 相位

— $\beta_w = 0$ — $\beta_w = 1.00\%$ — $\beta_w = 2.00\%$ — $\beta_w = 3.00\%$
— $\beta_w = 0.50\%$ — $\beta_w = 1.50\%$ — $\beta_w = 2.50\%$

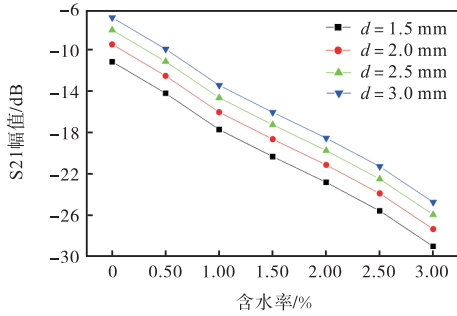
图 5 不同含水率下 S21 响应扫频曲线

Fig.5 S21 response frequency sweep curves at different water fractions

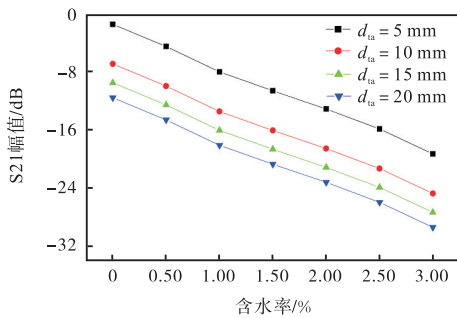
2.3 优化天线

为了使传感器具有较高的测量分辨率,在 4.50 GHz 下分别改变天线的直径 d 、两根天线的间距 d_a 进行了优化设计仿真. 含水率范围 0 ~ 3.00% (间隔 0.50%), 仿真得到 S21 幅值结果如图 6 所示,图

6(a)、(b)显示了天线的两个几何参数(d 和 d_{ta})对 S_{21} 幅值的影响。



(a) d 对 S_{21} 幅值的影响



(b) d_{ta} 对 S_{21} 幅值的影响

图 6 天线几何参数对 S_{21} 幅值的影响

Fig.6 Effect of antenna geometric parameters on the S_{21} amplitude

由图 6(a)可知,天线直径越大, S_{21} 幅值衰减越小,考虑到实际测量时幅值越大越容易测量,因此选择 d 为 3.0 mm;图 6(b)说明了两根天线离得越近幅值衰减越小,且几条曲线呈平行关系,说明天线间距对含水率测量分辨率影响小,但考虑到接收天线要工作在发射天线的远场工作范围,避免信号间的相互干扰和电磁辐射, d_{ta} 最终确定为 10 mm。

2.4 传感器结构

通过以上仿真结果,最终确定 d 、 d_{ta} 和 h 的值如表 1 所示。图 7 给出了传感器优化后的结构,其中不锈钢管道、纯铜电极和金属保护套的颜色分别为银色、黄色和灰色。管道的长度、内径和外径分别为 300 mm、50 mm 和 60 mm。两个直径为 3.0 mm 的铜电极沿管道径向平行放置,间距为 10 mm。电极插入管道的中下部,距离管道顶端 35 mm。由于电极直接接触被测流体介质,因此它们涂有 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯绝缘材料。

表 1 优化后的传感器结构尺寸

Tab.1 Optimized sensor structure dimensions

天线直径 d /mm	两根天线间距 d_{ta} /mm	天线插入深度 h /mm
3.0	10	35

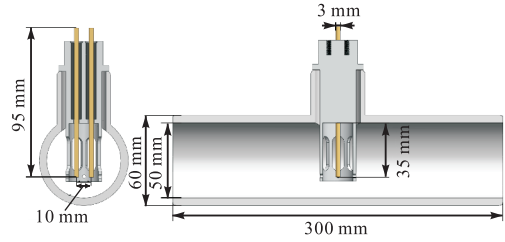
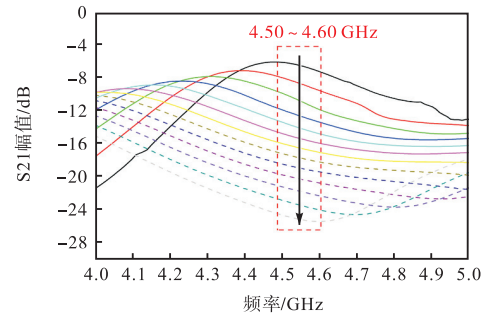


图 7 传感器截面和横向结构

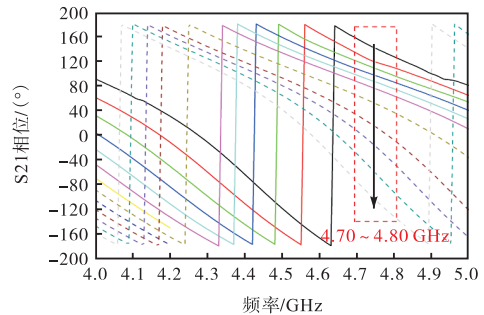
Fig.7 Cross-section and transverse structure of the sensor

2.5 S_{21} 幅值与相位仿真分析

为了进一步分析传感器的 S_{21} 响应与含水率的关系,在 4.00 ~ 5.00 GHz 范围内(步长 10 MHz)进行了含水率加密仿真研究,含水率范围 0 ~ 3.00%(间隔 0.25%),图 8 给出了 S_{21} 扫频的幅值和相位结果。由图 8 可以看出,当管道内介质的含水率增大时,由于管道内介质介电常数增加,谐振峰值不断向左移动,相位也不断增加。在谐振峰值的右侧 4.50 ~ 4.60 GHz 范围内, S_{21} 幅值随着含水率的增加单调递减,当激励频率过大或过小时, S_{21} 幅值与含水率呈非单调关系。与 S_{21} 幅值相比,忽略自然换相点, S_{21} 相位在 4.00 ~ 5.00 GHz 范围内与含水率均呈单调变化关系,采用相位法测量含水率更加方便。仿真结果清晰表明,传感器在 4.00 ~ 5.00 GHz 范围内具备 0 ~ 3.00%



(a) S_{21} 幅值



(b) S_{21} 相位



图 8 含水率 0 ~ 3.00% 时 S_{21} 仿真结果

Fig.8 S_{21} simulation results at 0—3.00% water fraction

含水率的测量能力, 验证了测量系统的有效性.

3 油水乳化静态实验

微波传感器原型按照第 2.4 节图 7 进行加工制作, 传感器实物如图 9 所示. 它的两个端口用 SMA 同轴连接器焊接(匹配阻抗 50Ω), 电极和管道分别连接在 SMA 同轴连接器的内电极和外电极上. 建立了油水乳化静态实验测量系统, 油水乳化静态实验采用 5 号白油、自来水和 Span 80 乳化剂. 实验中, 矢量网络分析仪 (VNA) 用于激励和接收信号并测量 S21 参数. 传感器垂直放置, 配置不同比例的油水混合物并加入乳化剂, 使用搅拌器搅拌使油水混合物达到均匀混合的效果, 然后将油水混合物倒入传感器内进行测量. 实施该实验是因为在超低含水率条件下, 一般的实验装置很难满足实验要求, 但是在乳化剂的作用下, 通过搅拌能够形成较为均匀的油水混合物, 从而达到模拟动态实验的效果.

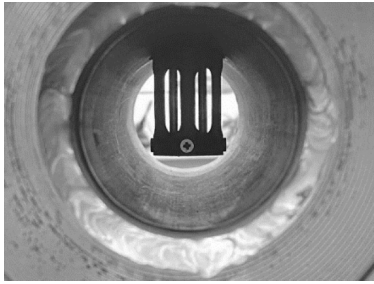


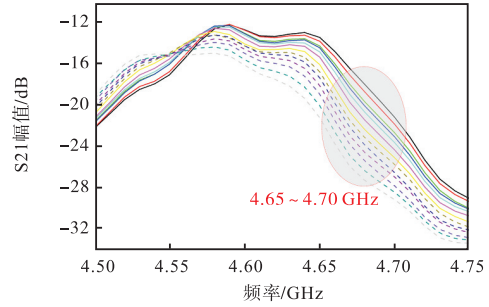
图 9 传感器探头结构

Fig.9 Structure of the sensor probe

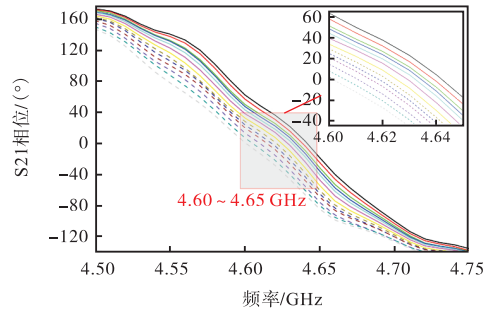
在静态实验中, 含水率从 0 变化到 3.00%, 间隔 0.25%, 每次实验前将配置好的乳化液倒入烧杯中搅拌 3 min, 保证乳化液混合均匀, 然后倒入传感器进行测量, 每个含水率点实验重复 3 次, 取平均值, 得到的 S21 幅值、相位曲线如图 10 所示. 从图 10 中可以看出, 在 S21 幅值谐振峰值的两侧, 幅值与含水率呈相反的单调变化关系, 为了获得较大的测量分辨率, 应采用 4.65 ~ 4.70 GHz 的激励频率对 S21 幅值进行测量; S21 相位在 4.60 ~ 4.65 GHz 随含水率呈较好的单调性且近似呈线性变化.

图 11 给出了不同频率下 S21 幅值和相位随着含水率的变化关系以及含水率变化 0.10% 时的测量灵敏度 S , 可以看出 S21 幅值和相位随着含水率的变化单调变化, 不同频率下的曲线近似平行. 与 S21 幅值曲线相比, S21 相位曲线随着含水率变化更加线性且灵敏度更高, 更有利于 0 ~ 3.00% 范围内的含水率测量, 在 4.64 GHz 频点处, 传感器的测量灵敏度最高且

S21 相位随着含水率线性度最好, 可作为传感器的工作频率.



(a) S21 幅值



(b) S21 相位

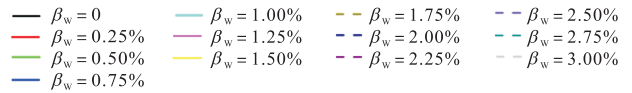
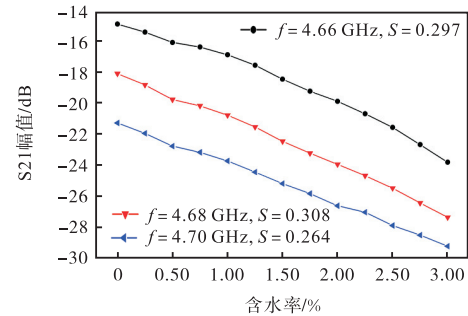
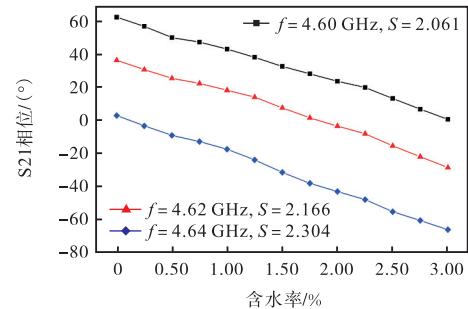


图 10 油水乳化静态实验 S21 扫频结果

Fig.10 S21 frequency sweep results of the static oil-water emulsification experiment



(a) S21 幅值



(b) S21 相位

图 11 不同频率下 S21 响应随含水率的变化曲线

Fig.11 Variation curves of the S21 response with water fraction at different frequencies

静态乳化实验结果与仿真结果趋势具有较好的一致性,但是在频率范围上有较大差异,在仿真中,随着含水率的增加,谐振峰值和相位随含水率变化幅值大,而这一特性在静态实验中体现得并不明显,但这并不影响本文利用这一特性进行含水率 0~3.00% 的测量.造成这种差异的原因有两种可能:一是仿真天线与实际天线存在差异;二是仿真设置介质为均相流,实际搅拌过程中介质并不均匀.静态乳化实验可以清楚地了解传感器测量特性的重要信息,有助于实现动态测量.

4 油水两相流动态实验

4.1 实验装置与实验方法

为了评价传感器在低含水率测量中的性能,进行了油水流动实验,实验在中国石油工业计量测试研究所含水率检定装置上进行,含水率检定装置和测量系统示意如图 12 所示.装置整体长 300 cm,高 200 cm,检定管段长 144 cm.检定系统由检定管段、变容积管段、伸缩管段、加气加液控制阀、涡轮流量计、压力温度传感器、MFI 含水仪、空压机、真空泵、变频泵、制热冷却器、3 个排水阀、称重天平、加热器以及控制柜组成.

该套装置可开展石油含水率测试仪的检定及校

准,管道温度通过温控仪控制在 35 °C,装置含水率测量范围 0~100.00% 和 0~3.00%,含水率 0~3.00% 的测量不确定度优于 0.03%,含水率 0~100% 的测量不确定度优于 0.50%.计量标准有两个电子天平(测量范围 0~50 kg 和 0~2 kg,准确度等级②级)和一等标准密度计组(测量范围 650~1 020 kg/m³,准确度等级①级).

油水实验测量系统由微波传感器、矢量网络分析仪(思仪 4957D, 30 kHz~18 GHz,动态范围 ≥85 dB)、计算机和实验装置组成,系统结构如图 12 所示.传感器的 S21 幅值由 VNA 测量得到.VNA 和 SMA 同轴连接器的连接使用两根同轴线缆.VNA 产生一个扫描频率为 4.00~5.00 GHz(10 MHz 间隔)的 1 mW 微波信号.微波传感器安装在竖直检定管段,流体从下至上流动,运行过程中整个装置处于闭环状态,由于此套装置能够保证油水两相在管道中循环流动,变频泵的频率高达 35 Hz,理论上油水两相分布均匀.

实验所用介质为 40#变压器油(ϵ 范围为 2.2~2.4)和自来水($\sigma=0.03$ S/m).实验中不同含水率点通过调配油水不同体积比率来实现,含水率工况范围 0~3.00%(步长 0.25%).流动速度通过改变变频调速泵保持在 1.5 m/s,流量保持在 10 m³/h.

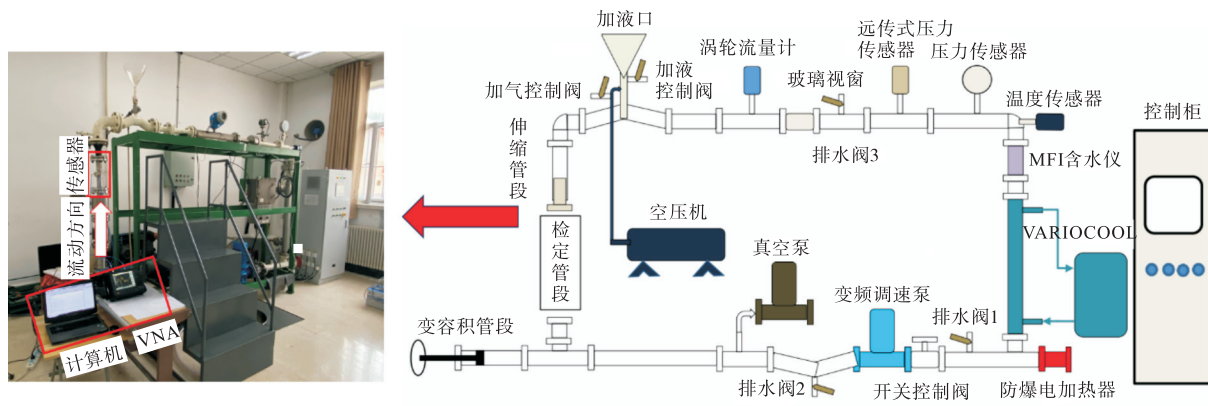


图 12 含水率检定装置和测量系统示意

Fig.12 Schematic of the water fraction calibration equipment and measurement system

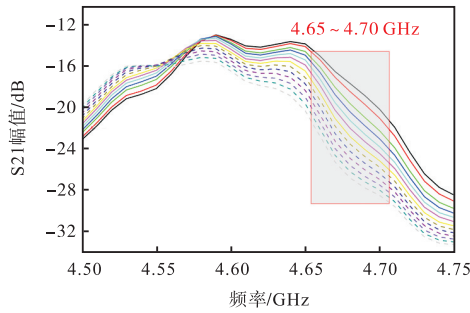
实验前测量变压器油的温度、密度;利用电子天平(精度 0.5 g)称取大桶油的质量,打开真空泵对系统抽真空,使系统压力为-0.1 MPa,利用管道负压将油通过下方抽水阀抽取到管道中,等管道中为常压时,关闭抽水阀,打开上方加液口,利用人工将桶中剩余油量通过量杯加入到管道中.等加液口有油高出管道时,停止加油.称取桶中剩余油量,获得管道中满管油的质量,进而得到管道中充满油的体积.然

后打开循环泵,开启制热冷却按钮对管道进行加热,将管道温度保持在 35 °C,排出管道中的空气后开始实验.测量其他含水率点时,从下方排水阀排出管道中部分液体,立即停止装置,从上方加液口处新加入一定水量.排出液体量和新加入的水量均是按照提前计算好的配方表进行.该实验方法能够保证每一个工况点下油水两相充分混合均匀,含水率精度较高,以及实验温度恒定.配置好含水率点后,通过 PC

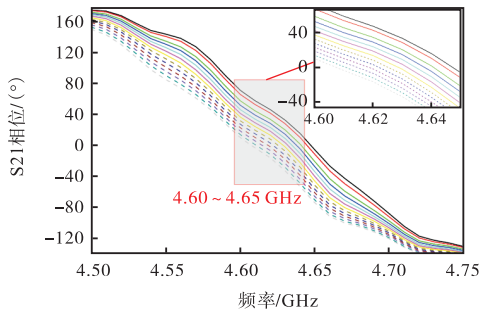
上位机程序控制 VNA 进行数据采集、预处理以及保存. 每个工况点扫频 60 次, 采集时间 120 s.

4.2 结果与分析

含水率范围 0 ~ 3.00% 的实验测试结果如图 13 所示. 图 13 给出了 4.50 ~ 4.75 GHz 范围内的 S21 幅值和相位的扫频曲线. 由 S21 曲线可以看出, 动态实验与静态实验结果吻合较好, 其规律与第 3 节得到的曲线规律一致, 且 S21 响应随着含水率变化的单调区间也相同.



(a) S21 幅值



(b) S21 相位

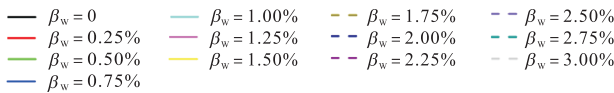


图 13 动态实验条件下 S21 扫频曲线

Fig.13 S21 frequency sweep curves under dynamic experimental conditions

图 14 给出了不同频率下静态和动态实验的 S21 相位曲线. 在不同频率下, 静态乳化和动态实验的 S21 相位值较为接近, 在 4.62 和 4.64 GHz 频率下, 两条曲线呈现平行关系, 说明动态和静态实验系统之间存在一定的系统偏差. 下面分别采用静态乳化和动态数据建立了 0 ~ 3.00% 范围的含水率预测模型.

图 14 显示了 S21 相位与含水率基本呈线性关系, 在 4.64 GHz 频率下静态乳化和动态实验的 S21 相位曲线线性度较好, 因此在该频率下采用归一化相位和一阶线性拟合的方法建立了含水率范围 0 ~ 3.00% 的测量模型. 归一化相位公式为

$$\varphi_{\text{nor}} = (\varphi_m - \varphi_0) / (\varphi_{w-3} - \varphi_0) \quad (7)$$

式中: φ_{nor} 为相位的归一化值; φ_m 、 φ_0 、 φ_{w-3} 分别为油水混合物、纯油和含水率 3.00% 的油水混合物条件下的相位测量值.

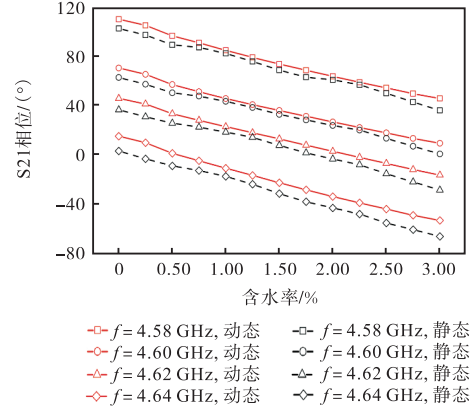


图 14 不同频率下静态和动态实验的 S21 相位曲线

Fig.14 S21 phase curves in static and dynamic experiments at different frequencies

建立的含水率预测模型为

$$\beta_1 = A_1 \varphi_{\text{nor}} + A_2 \quad (8)$$

$$\beta_2 = A_3 \varphi_{\text{nor}} + A_4 \quad (9)$$

式 (8) 和式 (9) 分别为静态乳化和动态实验数据建立的含水率预测模型, 其中, A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 为静态乳化和动态实验结果拟合确定, 分别为 2.984 90、-0.020 90、2.968 99 和 0.030 89. 为了定量评价含水率预测模型的性能, 采用绝对平均偏差 (AAD) 评价标准, 即

$$\text{AAD} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |\beta_{w\text{-pre}} - \beta_{w\text{-exp}}| \quad (10)$$

式中: $\beta_{w\text{-pre}}$ 为模型预测的含水率; $\beta_{w\text{-exp}}$ 为实际含水率; p 为实验点总数.

图 15 给出了静态乳化和油水动态实验含水率预测模型得到的绝对误差, 静态乳化和动态实验 95% 的数据点绝对误差在 -0.091% ~ 0.051% 之间, AAD 为 0.04%; 油水动态实验 95% 的数据点绝对误差在 -0.069% ~ 0.083% 之间, AAD 为 0.03%.

为了验证静态乳化和动态实验模型的预测效果, 将动态数据代入式 (8), 得到预测含水率的绝对误差如图 16 所示, 静态乳化和动态实验测量系统间存在 0.05% 的系统偏差, 95% 的数据点绝对误差在 -0.024% ~ 0.131% 之间, AAD 为 0.045%. 结果表明静态乳化和动态实验有着较好的替代性, 实验方案更简单, 成本更低.

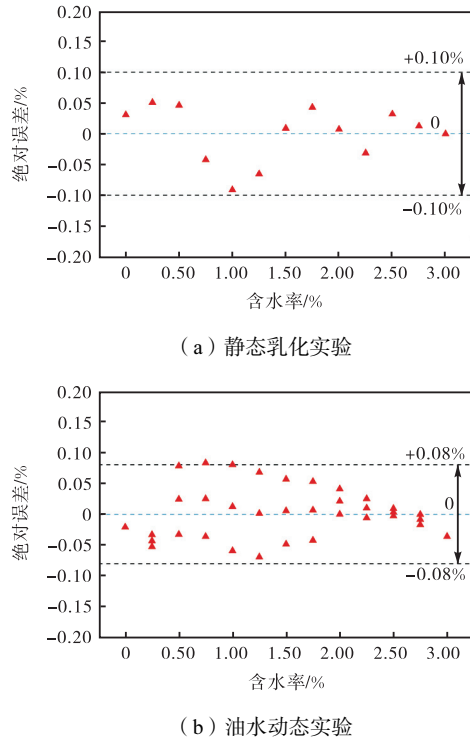


图 15 含水率预测模型的绝对误差

Fig.15 Absolute errors of water fraction prediction model

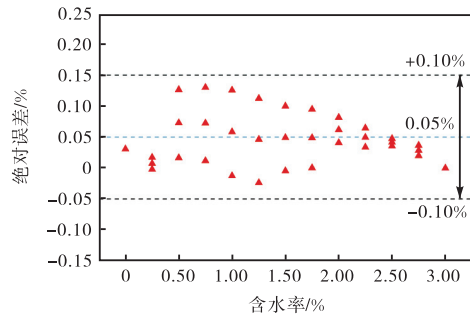


图 16 静态乳化实验模型预测动态实验含水率的绝对误差

Fig.16 Absolute errors of static emulsification experiment model in predicting water fraction of dynamic experiment

5 结 语

本文提出了一种新型传输结构的插入式双天线微波传感器,用于超低含水率 0~3.00%范围的高精度测量.通过电磁场有限元仿真,研究了传感器幅值和相位响应与含水率的关系,对传感器电极直径、间距及插入深度参数进行了优化,确定了传感器的最佳工作频段在 4.00~5.00 GHz 之间.完成了传感器原理样机的研制,并进行了油水静态混合乳化实验和油水流动实验测试,对仿真结果进行了验证.根据实验相位结果,建立了 0~3.00%超低含水率范围的油水乳化静态实验和动态实验含水率预测模型,两个模型

的绝对误差为 ± 0.10%(置信概率 95%),仅存在 0.05%的系统偏差,表明基于本研究给出的微波含水率测量传感器,其油水乳化实验测得含水率可以在一定程度上代替油水动态实验的测量结果.

参考文献:

- [1] 刘军菊. 降低钟市联合站原油外输含水率的控制措施[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 36(1): 30-32. Liu Junju. Control measures for reducing water cut of crude oil transported from Zhongshi United Station[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Workers University, 2023, 36(1): 30-32 (in Chinese).
- [2] Zhai L S, Liu R Y, Jin N D, et al. Complex admittance detection of horizontal oil-water two-phase flows using a capacitance sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7489-7498.
- [3] Sheikh S I M, Hassan E E M, Iqbal S. Capacitance-based monitoring of a three-phase crude-oil flow[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1213-1218.
- [4] Liu X L, Lao L Y, Falcone G. A comprehensive assessment of correlations for two-phase flow through Venturi tubes[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 78: 103323.
- [5] Wang D Y, Jin N D, Zhai L S, et al. Salinity independent flow measurement of vertical upward gas-liquid flows in a small pipe using conductance method[J]. Sensors, 2020, 20(18): 1-19.
- [6] Muñoz-Cobo J L, Rivera Y, Berna C, et al. Analysis of conductance probes for two-phase flow and holdup applications[J]. Sensors, 2020, 20(24): 1-29.
- [7] Ren W K, Jin N D, Zhai L S, et al. Measurement of liquid film thickness in vertical multiphase slug and churn flows using distributed ultrasonic method[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10537-10544.
- [8] Shi X W, Tan C, Wu H, et al. An electrical and ultrasonic Doppler system for industrial multiphase flow measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7500313.
- [9] Roshani G H, Feghhi S A H, Mahmoudi-Aznavah A, et al. Precise volume fraction prediction in oil-water-gas multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks using one detector[J]. Measurement, 2014, 51: 34-41.
- [10] Luggar R D, Key M J, Morton E J, et al. Energy dispersive X-ray scatter for measurement of oil/water ratios[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, 422(1/3): 938-941.

- [11] Yuan C, Bowler A, Davies J G, et al. Optimised mode selection in electromagnetic sensors for real time, continuous and in-situ monitoring of water cut in multi-phase flow systems[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 298: 126886.
- [12] Liu W X, Jin N D, Wang D Y, et al. A parallel-wire microwave resonant sensor for measurement of water holdup in high water-cut oil-in-water flows[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 74: 101760.
- [13] Kaatze U, Hübner C. Electromagnetic techniques for moisture content determination of materials[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(8): 082001.
- [14] Lobato-Morales H, Corona-Chavez A, Olvera-Cervantes J L, et al. Wireless sensing of complex dielectric permittivity of liquids based on the RFID[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(9): 2160-2167.
- [15] Saghati A P, Batra J S, Kameoka J, et al. A metamaterial-inspired wideband microwave interferometry sensor for dielectric spectroscopy of liquid chemicals[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(7): 2558-2571.
- [16] Song X Y, Yan S. A miniaturized SIW circular cavity resonator for microfluidic sensing applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112183.
- [17] Oon C S, Ateeq M, Shaw A, et al. Experimental study on a feasibility of using electromagnetic wave cylindrical cavity sensor to monitor the percentage of water fraction in a two phase system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 245: 140-149.
- [18] Karimi M A, Arsalan M, Shamim A. Extended throat venturi based flow meter for optimization of oil production process[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16): 17808-17818.
- [19] Guo H F, Yao L, Huang F. A cylindrical cavity sensor for liquid water content measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 238: 133-139.
- [20] 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: 109078.
- [21] 姜海潮. 射频法原油含水率测量技术研究[D]. 西安: 西安石油大学电子工程学院, 2018.
- [22] 徐鑫. 射频法原油含水率测量系统研究及参数优化[D]. 西安: 西安石油大学电子工程学院, 2020.
- Xu Xin. Research and Parameter Optimization of Measuring System of Crude Oil Moisture Content by Radio Frequency Method[D]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, 2020(in Chinese).
- [23] Ma H M, Xu Y, Yuan C, et al. A dual-parameter measurement method for oil-water flow based on a venturi embedded with microwave transmission line sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(24): 23877-23887.
- [24] Yang Y S, Scott B N, Cregger B B. The design, development, and field testing of a water cut meter based on a microwave technique[C]//The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA, 1990: 775-782.
- [25] Sharma P, Lao L Y, Falcone G. A microwave cavity resonator sensor for water-in-oil measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 262: 200-210.
- [26] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Feng Cizhang, Ma Xikui. Introduction to Engineering Electromagnetic Fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000(in Chinese).
- [27] 托马斯·A·米利根. 现代天线设计[M]. 郭玉春, 方加云, 张光生译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- Milligan Thomas A. Modern Antenna Design[M]. Guo Yucun, Fang Jiayun, Zhang Guangsheng, Trans. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2012(in Chinese).
- [28] Ma J, Jin N D, Wang D Y, et al. Measurement of water holdup in vertical upward high water-cut oil-in-water flows using a high frequency sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 289: 165-179.
- [29] Polar D P. Molecules[M]. New York: Reinhold, 1929.
- [30] Klein L, Swift C. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, 25(1): 104-111.

(责任编辑: 孙立华)