

# 基于 CPW 的油水两相流持水率检测方法研究\*

魏 勇<sup>1</sup>, 余厚全<sup>1</sup>, 戴家才<sup>2</sup>, 刘国权<sup>3</sup>, 陈 强<sup>3</sup>

(1. 长江大学电子信息学院 荆州 434023; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院 成都 610500;  
3. 中国石油集团测井有限公司装备与销售分公司 西安 710077)

**摘 要:**为了提高原油的开采效率,各油田越来越多地采用注水采油的措施和水平井开采的方法。这对井下油水两相持水率的在线检测提出了更高的要求,其一要求传感器在高持水条件下具有与低持水段一样高的检测精度,其二要求单支传感器体积结构小,便于在油井截面上布置多支传感器形成检测阵列,提供水平井或大斜度井油水截面上持水率分布的差异信息,提高测量的空间分辨率。为此,提出基于共面微带传输线的油水两相流持水率检测方法。通过保角变换法分析了共面微带传输线传感器的结构参数和材料参数与电磁波传播特性之间的关系,采用片状双面 S 形布线结构,在小型化传感器的同时提高了检测的动态范围。数值模拟和实验结果表明,信号在传输线上的相移与持水率间具有近似线性的关系,传感器在持水率 0% ~ 100% 全程范围内具有小于 3% 的分辨率,该方法弥补了电容法和电导法仅适合于低持水率和高持水率的弊端。

**关键词:** 共面微带传输线;油水两相;持水率;传感器;电磁波

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW

Wei Yong<sup>1</sup>, Yu Houquan<sup>1</sup>, Dai Jiakai<sup>2</sup>, Liu Guoquan<sup>3</sup>, Chen Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Electronics and Information, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Equipment and Sales Branch, China Petroleum Logging CO. LTD., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of crude oil production, the water injection production and horizontal well production are widely used in the oil fields. This brings higher requirements for online water holdup measurement of oil-water two-phase in downhole. There are two main challenges; the one is to guarantee the high detection accuracy of sensor under the condition of high water holdup and low water holdup, and the other is the small structure of single sensor to arrange multiple sensors conveniently to form detection array on the cross section of the oil well, so as to improve the spatial resolution of the measurement by providing the distribution information about water hold up on the cross-section of horizontal wells or highly deviated wells. Hence, this work presents the water holdup detection method of oil-water two-phase flow based on coplanar microstrip transmission line. Conformal transformation method is utilized to analyze the relationship between the structure parameters and material parameters of coplanar microstrip transmission line sensor and electromagnetic wave propagation characteristics. The double-sided and S-shaped wiring sheet structure is used not only to miniaturize the sensor but also improve the dynamic range of detection. Numerical simulation and experimental results show that the phase shifts of the detected signal are approximately linear with the water holdup of the measured fluid. The resolution is less than 3% in the whole range of water holdup from 0% to 100%. This method overcomes the disadvantages of capacitance method and conductance method, and is suitable for low water holdup and high water holdup, respectively.

**Keywords:** coplanar microstrip transmission line; oil-water two-phase; water holdup; sensor; electromagnetic wave

# 1 引言

为了提高原油的开采效率,各油田越来越多地采用水平井开采的方法和注水采油的措施。这就要求井下油水两相持水率在线检测在高持水条件下具有一定的精度,同时要求持水率检测装置具有阵列化的结构,以便获取油井截面上持水率的空间分布信息。

目前,英国 SONDEX 公司生产的阵列电容式持水率成像仪(capacitance array tool, CAT)<sup>[1]</sup>和阵列电阻式持水率成像仪(resistance array tool, RAT)<sup>[2]</sup>分别实现了在低持水率和高持水率条件下的持水率检测与流体流动成像。一般认为,电容法适用于持水率低于 50% 的井况,而电导法适用于持水率高于 50% 的井况,其原因是:1)就电容法而言,电容器的电容  $C$  与被测油水介质的等效介电常数  $\epsilon_x$  成正比,而检测电路的输出电压  $U$  (或者频率) 通常都是  $C$  的倒数,进而可知  $U$  与  $\epsilon_x$  成反比。因此,当持水率较低时,  $\epsilon_x$  也较小,  $U$  对  $\epsilon_x$  的变化非常敏感,仪器能够获得较高的分辨率,但随着持水率的升高,  $\epsilon_x$  逐渐增大,  $U$  对  $\epsilon_x$  的变化不再敏感,这就是电容法在高持水率时失去分辨率的原因之一;导致电容法失效的另外一个原因是矿化度影响,实际上矿化度引起的电阻的变化可以视为在电容器的两端并联一个电阻,矿化度越高,电阻越小,传导电流所占的比例就越大,油水介电常数作用所引起的位移电流相对就越小,仪器分辨率就下降。2)对于电导法来说,它主要测量油水的电导率,其检测方法本身依赖于水相的连通,在低持水率时,水泡被油相隔断,无法形成连续相,测量方法失效。

基于传输线测量法是目前为数不多的,能够用于全程段持水率测量,且具有相对一致性精度的方法之一<sup>[3-5]</sup>。在过去 20 年里,人们研究了同轴传输线式持水率传感器和基于该方法的仪器<sup>[6-7]</sup>。但由于同轴传输线采取了过流式测量方法,为了避免同轴传输线内部的环形空间被原油堵塞,传感器的尺寸不能做得太小,因而这种传感器只适合单支且仅在垂直井中使用,这就限制了其应用范围。时至今日,能够在持水率全范围内有效的阵列式微型传感器仍处于空白。因此,研究基于传输线的持水率检测方法,并设计一种新的微型化持水率传感器,使之满足截面小、长度短、精度高的要求将具有重要的工程意义。

## 2 共面微带传输线的结构、特性参数与数值模拟

### 2.1 共面微带传输线的结构

共面微带传输线又称共面波导(coplanar waveguide, CPW),是传输线中一种重要类型<sup>[8]</sup>。根据文献[5]中关于传输线上电磁波传输模型的分析可知,CPW 和同轴传输线都可以用于制作持水率传感器,但与结构封闭的同轴传输

线相比,CPW 具有开放式结构,能够更好地接触油水,防止堵塞,更有利于传感器的小型化。常见的 CPW 为单层衬底结构,如图 1(a)所示。其中  $w_1$  和  $w_2$  分别为中心导体和地导体的宽度,  $d$  为中心导体与地导体之间的间隔,又称槽宽。在真实的测量环境下,CPW 传感器是浸没于油水混合液体中的,油和水被视为包裹在 CPW 传感器四周的介质材料,CPW 的特性参数会因为持水率的变化而变化<sup>[9]</sup>。

为了避免井下液体对裸露的金属电极的腐蚀,同时也为了减小矿化度对传输线上信号的影响,就需要在 CPW 的上表面涂覆一层特殊的绝缘材料,如图 1(b)所示。图中,  $\epsilon_{r1}$  和  $\epsilon_{r3}$  分别表示 CPW 衬底上下面的被测油水介质的相对介电常数,  $h_1$  和  $h_3$  表示二者边界与地导体的距离,  $\epsilon_{r2}$  和  $\epsilon_{r4}$  分别表示绝缘介质和衬底介质的相对介电常数,  $h_2$  和  $h_4$  表示二者的厚度。  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别表示衬底上下面的被测油水介质的电导率,  $\sigma_2$  和  $\sigma_4$  分别表示绝缘介质和衬底介质的电导率。因此,实际的 CPW 可视为被两个顶层和两个底层介质包围的多层衬底结构<sup>[10]</sup>。

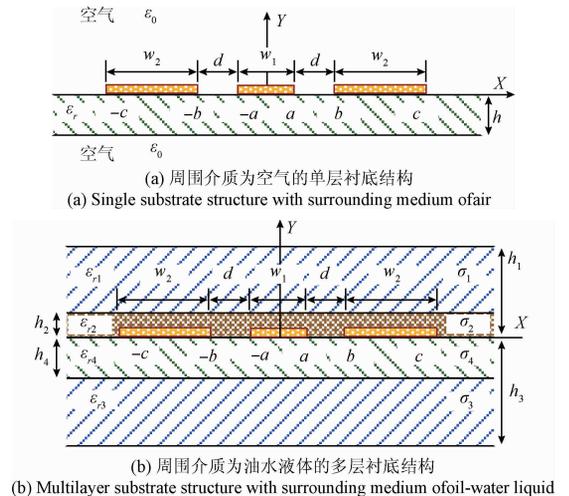


图 1 CPW 结构示意图

Fig. 1 Schematic of CPW structure

基于上述思想,首次设计了 CPW 传感器,进行了实验验证,从实验角度验证了该方法的可行性,并申请了发明专利<sup>[11]</sup>。以下将从理论角度分析,探讨设计 CPW 传感器的理论依据。

### 2.2 共面微带传输线上信号的传播特性

由于实际井下地层水中含有多种矿物质成分,油水混合液体不能被视为电导率为零的理想介质。因此,电磁波信号在传输线上处于有损传播模式。首次推导了处于有损模式下传输线的信号相移的一般表达式为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{(Z_L - Z_0)e^{\alpha l} - (Z_L + Z_0)e^{-\alpha l} \tan(\beta l)}{(Z_L - Z_0)e^{\alpha l} + (Z_L + Z_0)e^{-\alpha l} \tan(\beta l)}\right) \quad (1)$$

式(1)表明,传输线上的相位偏移  $\varphi$  与其特性阻抗  $Z_0$ 、衰减因子  $\alpha$ 、相移因子  $\beta$ 、终端负载阻抗  $Z_L$  以及传输线的长度  $l$  有关<sup>[5]</sup>。其中,除  $Z_L$  和  $l$  以外,其余3项均为传输线的二次特征量(又称传播特性参数),它们由传输线的一次特征量(又称分布参数)计算得到。因此,为了寻求设计 CPW 传感器的理论依据,就要建立 CPW 的分布参数  $C、G、L、R$  与传输线结构参数及油水介质电磁参数之间的关系,在此基础上,进一步推导出 CPW 的传播特性参量  $Z_0、\alpha、\beta$  的表达式,并由此建立起相位偏移  $\varphi$  与 CPW 结构参数、材料参数以及油水介电常数的多元函数关系,然后通过数值模拟和实验研究的方法寻求最佳的结构参数与材料参数。

2.3 共面微带传输线的特性参数

对于传输线的特性参数和电磁场的边界问题,保角变换法是一种非常有效的数学分析方法,其最大优势在于其简单性及可以获得闭合形式的解析式。

2.3.1 多层衬底 CPW 的分布参数  $C$

根据文献[10]中保角变换的方法,多层衬底结构的 CPW 的总电容可以分解为局部电容之和。因此,图1(b)中的总电容可记为5个部分电容的和,即:

$$C_{CPW} = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (2)$$

各部分电容的示意图如图2(a)~(e)所示,总电容可以按介质的层被分为几个不同的局部电容,而且彼此的电场和磁场可以视为互不影响,即完全独立的。

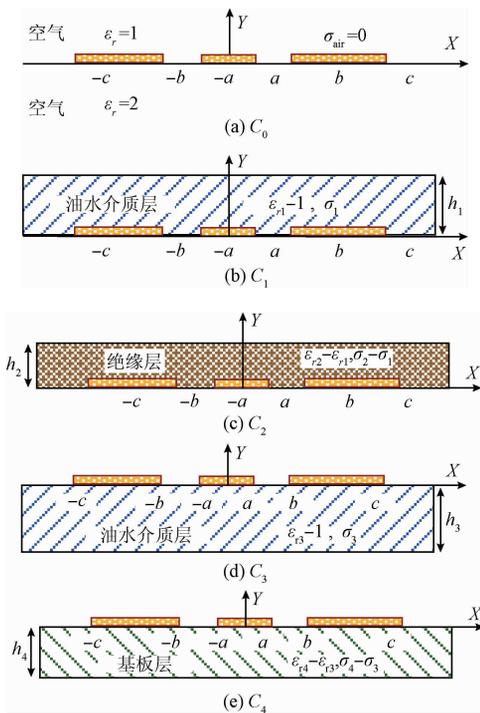


图2 局部电容的结构示意图

Fig.2 Structure of the partial capacitance

每一个电容的计算方法如下。

1) 计算  $C_0$  的值

如图2(a)所示,  $C_0$  为所有介质视为真空条件下 CPW 单位长度的电容,根据利用保角变换法求解带状平行线单位电容的结论<sup>[12]</sup>,有:

$$C_0 = 4\epsilon_0 \frac{K'(k)}{K(k)} = 4\epsilon_0 M(k) \quad (3)$$

式中:  $k$  为传输线的结构参数。其表达式为:

$$k = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2}} \quad (4)$$

$K(k)$  为模数  $k$  的第一类完全椭圆积分,且  $K'(k) = K(k')$ 。变量  $k$  和  $k'$  为  $K(k)$  的模与补模<sup>[13-14]</sup>,变量  $k'$  的表达式为:

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (5)$$

为了简化起见,式(3)中  $M(k) = K'(k)/K(k)$ ,为传输线结构参数  $k'$  与  $k$  的第1类完全椭圆积分之比。由于第1类完全椭圆积分的计算较为复杂,此处可采用 Hilberg 的近似算法来对上述表达式进行化简<sup>[10]</sup>。其中:

$$M(k) \approx \begin{cases} \frac{\pi}{2 \ln \left( 2 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \right)}, & \sqrt{2}/2 \leq k \leq 1 \\ \frac{2}{\pi} \ln \left( 2 \sqrt{\frac{1+k'}{1-k'}} \right), & 0 \leq k \leq \sqrt{2}/2 \end{cases} \quad (6)$$

2) 计算  $C_1$  的值

$C_1$  的结构如图2(b)所示,电场仅存在于厚度为  $h_1$  的介质层中,其相对介电常数为  $\epsilon_{r1} - \epsilon_{air}$ ,因为空气的相对介电常数  $\epsilon_{air}$  为1,所以等效相对介电常数可记为  $\epsilon_{r1} - 1$ 。利用保角变换法,有:

$$C_1 = 2\epsilon_0 (\epsilon_{r1} - 1) M(k_1) \quad (7)$$

式中:  $k_1$  为传输线的结构参数,其表达式为:

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi c}{2h_1}\right) \sqrt{\sinh^2\left(\frac{\pi b}{2h_1}\right) - \sinh^2\left(\frac{\pi a}{2h_1}\right)}}{\sinh\left(\frac{\pi a}{2h_1}\right) \sqrt{\sinh^2\left(\frac{\pi c}{2h_1}\right) - \sinh^2\left(\frac{\pi a}{2h_1}\right)}} \quad (8)$$

3) 计算  $C_2、C_3$  和  $C_4$  的值

如图2(c)~(e)所示,局部电场仅存在于厚度分别为  $h_2、h_3、h_4$  的层状介质内,对应介质的相对介电常数分别为  $\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}、\epsilon_{r3} - 1$  和  $\epsilon_{r4} - \epsilon_{r3}$ 。相应地,可以得到:

$$C_2 = 2\epsilon_0 (\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}) M(k_2) \quad (9)$$

$$C_3 = 2\epsilon_0 (\epsilon_{r3} - 1) M(k_3) \quad (10)$$

$$C_4 = 2\epsilon_0 (\epsilon_{r4} - \epsilon_{r3}) M(k_4) \quad (11)$$

其中,

$$k_i = \frac{\sinh\left(\frac{\pi c}{2h_i}\right) \sqrt{\sinh^2\left(\frac{\pi b}{2h_i}\right) - \sinh^2\left(\frac{\pi a}{2h_i}\right)}}{\sinh\left(\frac{\pi b}{2h_i}\right) \sqrt{\sinh^2\left(\frac{\pi c}{2h_i}\right) - \sinh^2\left(\frac{\pi a}{2h_i}\right)}} \quad (12)$$

综上所述,图2(b)所示多层衬底CPW传输线的总电容为:

$$C_{CPW} = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 4\varepsilon_0 M(k) + 2\varepsilon_0(\varepsilon_{r1} - 1)M(k_1) + 2\varepsilon_0(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1})M(k_2) + 2\varepsilon_0(\varepsilon_{r3} - 1)M(k_3) + 2\varepsilon_0(\varepsilon_{r4} - \varepsilon_{r3})M(k_4) \quad (13)$$

式(2)~(13)是CPW分析中比较经典的保角变换理论,为引用他人成果。在此基础上,本文针对CPW传输线浸没在油水介质中这一特定测量条件进行进一步分析。由于CPW传输线为薄板结构,可以合理地假设最顶层的介质 $\varepsilon_{r1}$ 和最底层的介质 $\varepsilon_{r3}$ 具有相同的等效介电常数,其相对介电常数记为 $\varepsilon_{rx}$ ,因此有:

$$\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r3} = \varepsilon_{rx} \quad (14)$$

另外,包围CPW的液体厚度 $h_1$ 和 $h_3$ 远大于 $c$ ,根据数学关系有: $k_1 \approx k_3 \approx k$ ,因此有:

$$M(k) = M(k_1) = M(k_3) \quad (15)$$

将式(14)和(15)代入式(13)有:

$$C_{CPW} = \varepsilon_0[(4M(k) - 2M(k_2) - 2M(k_4))\varepsilon_{rx}] + \varepsilon_0[2M(k_2)\varepsilon_{r2} + 2M(k_4)\varepsilon_{r4}] \quad (16)$$

可记为:

$$C_{CPW} = \varepsilon_0(p_1\varepsilon_{rx} + p_2\varepsilon_{r2} + p_4\varepsilon_{r4}) \quad (17)$$

其中:

$$p_1 = 4M(k) - 2M(k_2) - 2M(k_4) \quad (18)$$

$$p_2 = 2M(k_2) \quad (19)$$

$$p_4 = 2M(k_4) \quad (20)$$

由此可见,CPW的分布电容不仅与传输线周围油水介质的相对介电常数 $\varepsilon_{rx}$ 有关,还与传输线的结构参数 $p_1, p_2, p_4$ 和传输线的材料参数 $\varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r4}$ 有关。

### 2.3.2 多层衬底CPW的分布参数G

对于图2(b)所示多层衬底结构的CPW,亦可采用局部电导叠加的方法求取传输线的分布电导<sup>[15]</sup>。因此,图中的电导可记为5个部分电导的和,即:

$$G_{CPW} = G_0 + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad (21)$$

对于图2(a)所示的衬底结构,其单位长度电导 $G_0$ 为:

$$G_0 = 4\sigma_{air}M(k) \quad (22)$$

因为空气的电导率 $\sigma_{air}=0$ ,所以 $G_0=0$ 。

对于图2(b),其单位长度电导 $G_1$ 为:

$$G_1 = 2(\sigma_1 - \sigma_{air})M(k_1) = 2\sigma_1M(k_1) \quad (23)$$

对于图2(c)~(e),其各单位长度电导 $G_2, G_3, G_4$ 分别为:

$$G_2 = 2(\sigma_2 - \sigma_1)M(k_2) \quad (24)$$

$$G_3 = 2(\sigma_3 - \sigma_{air})M(k_3) = 2\sigma_3M(k_3) \quad (25)$$

$$G_4 = 2(\sigma_4 - \sigma_3)M(k_4) \quad (26)$$

将式(22)~(26)代入式(21)有:

$$G_{CPW} = 2[\sigma_1M(k_1) + (\sigma_2 - \sigma_1)M(k_2)] + 2[\sigma_3M(k_3) + (\sigma_4 - \sigma_3)M(k_4)] \quad (27)$$

以上式(21)~(27)是经典的保角变换理论,在此基础上,针对CPW传输线浸没在油水介质中这一特定测量条件进行进一步分析。由于CPW为薄板结构,同样可以合理地假设传输线上下表面附近的油水介质的电导率是相等的,将油水介质的电导率记为 $\sigma_x$ ,有:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_x \quad (28)$$

因此,将式(28)和(15)代入式(27),式(27)可进一步简化为:

$$G_{CPW} = (4M(k) - 2M(k_2) - 2M(k_4))\sigma_x + 2M(k_2)\sigma_2 + 2M(k_4)\sigma_4 \quad (29)$$

可记为:

$$G_{CPW} = p_1\sigma_x + p_2\sigma_2 + p_4\sigma_4 \quad (30)$$

由此可见,CPW的分布电导 $G_{CPW}$ 不仅与传输线周围油水介质的电导率 $\sigma_x$ 有关,还与传输线的结构参数 $p_1, p_2, p_4$ 和传输线的材料参数 $\sigma_2, \sigma_4$ 有关。

### 2.3.3 多层衬底CPW的分布参数L

多层衬底CPW的分布电感 $L_{CPW}$ 可表示为<sup>[15]</sup>:

$$L_{CPW} = \frac{1}{4c^2\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{M(k)} \quad (31)$$

光速 $c$ 与真空磁导率 $\mu_0$ 和真空介电常数 $\varepsilon_0$ 的关系为 $c^2\mu_0\varepsilon_0=1$ ,因此,式(31)可改写为:

$$L_{CPW} = \frac{\mu_0}{4} \cdot \frac{1}{M(k)} = \frac{\mu_0}{p_1 + p_2 + p_4} \quad (32)$$

式(32)表明,CPW的分布电感 $L_{CPW}$ 也与传输线的结构参数 $p_1, p_2, p_4$ 有关。

### 2.3.4 多层衬底CPW的分布参数R

在高频情况下,金属导体内的电流分布密度并不均匀,从金属层表面至其中心呈指数规律减小,这种现象被称为趋肤效应。趋肤深度可表示为<sup>[15]</sup>:

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma f}} \quad (33)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率, $\sigma$ 为金属电导率, $f$ 为信号频率。

对于导体厚度 $t < 3\delta_s$ 的情况,可以用一个简单的近似公式来估算传输线的分布电阻<sup>[15]</sup>:

$$R_{CPW} = \frac{1}{\sigma\delta_s \{1 - \exp(-t/\delta_s)\}} \quad (34)$$

式(34)表明,CPW的分布电阻只与传输线金属导体的电导率和信号频率有关。当金属导体的电导率较大(金属铜的电导率),信号频率较低时(小于1GHz), $R_{CPW}$ 可近似地等于0。

### 2.3.5 多层衬底CPW的传播特性参量 $Z_0, \alpha, \beta$

根据多层衬底CPW的传输特性的研究结论<sup>[10]</sup>,CPW的特性阻抗 $Z_0$ 和相移因子 $\beta$ 如下:

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{CC_0}} \quad (35)$$

$$\beta = \frac{\omega\sqrt{C}}{c\sqrt{C_0}} \quad (36)$$

式中： $c$  为真空中的光速， $C$  为传输线的分布电容， $\omega$  为信号角频率， $C_0$  为假设 CPW 周围所有介质均为真空条件下传输线的电容。

式(31) ~ (36) 是 CPW 分析中已有的结论，在此基础上，本文将 CPW 的分布参数  $C$ 、 $G$ 、 $L$ 、 $R$  表达式分别代入式(35)和(36)，传输线的传播特性参量  $Z_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  可进一步表示为：

$$Z_0 = \frac{1}{2c\epsilon_0 \sqrt{M(k) (p_1\epsilon_{rx} + p_2\epsilon_{r2} + p_4\epsilon_{r4})}} \quad (37)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega L}{2} (\sqrt{G^2 + \omega^2 C^2} - \omega C)} \quad (38)$$

$$\beta = \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\frac{p_1\epsilon_{rx} + p_2\epsilon_{r2} + p_4\epsilon_{r4}}{M(k)}} \quad (39)$$

2.4 共面微带传输线传感器结构与材料参数数值模拟

将式(37) ~ (39) 代入式(1)，首次得到 CPW 在有损模式下信号相移  $\varphi$  的一般表达式。它不仅是油水混合介质相对介电常数  $\epsilon_{rx}$  的函数，而且还取决于传输线结构参数和材料参数。因此，为了获得最佳分辨率，就要求当相对介电常数  $\epsilon_{rx}$  从全油至全水的变化时，CPW 上的相移  $\varphi$  尽可能地达到最大（不超过  $2\pi$ ），并且尽可能地与  $\epsilon_{rx}$  之间呈单调递增线性关系。实现这一目标的关键在于选择合适的结构参数与材料参数。为此，进行数值模拟，当考察某一特定参数对相移的影响规律时，选用 4 种不同的值代入，其余参数默认选用如表 1 和 2 所示参数值。数值模拟结果如图 3 和 4 所示。（测量电路相关参数：激励信号频率  $f=80$  MHz，终端负载阻抗  $Z_L=60 \Omega$ ）

表 1 CPW 结构参数表

Table 1 Structural parameters of the CPW

参数	$w_1$	$w_2$	$d$	$h_2$	$h_4$	$l$
数值/mm	0.2	0.38	0.15	0.05	1.6	320

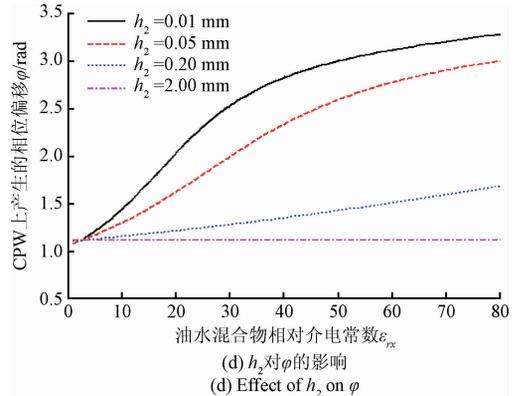
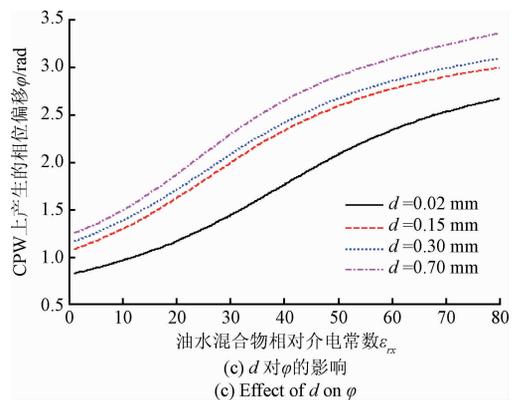
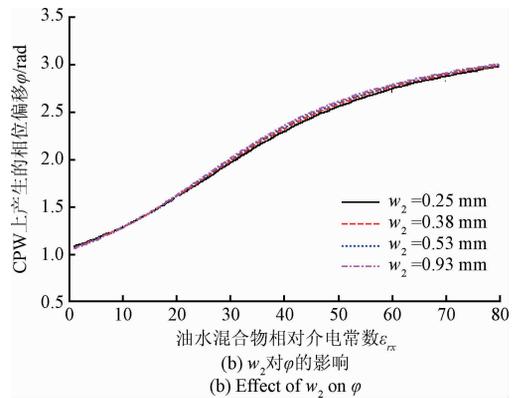
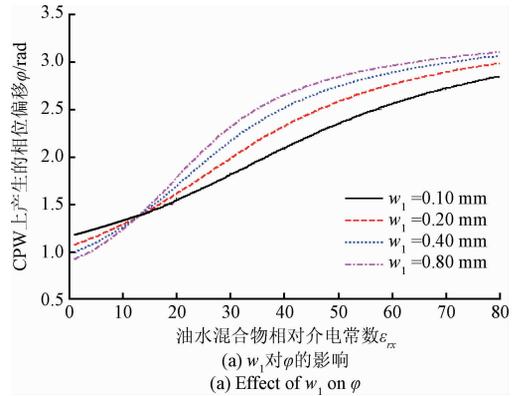
表 2 CPW 材料参数表

Table 2 Material parameters of the CPW

参数	$\epsilon_{r2}$	$\epsilon_{r4}$	$\epsilon_{rx}$	$\sigma_2 / (S \cdot m^{-1})$	$\sigma_4 / (S \cdot m^{-1})$	$\sigma_{铜} / (S \cdot m^{-1})$
数值	2.5	4.5	2~80	$1 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$	$5.9 \times 10^7$

图 3 所示为 CPW 结构参数与  $\varphi$  的关系曲线，图 3(a) 和 (c) 表明，中心导体或者导体间槽的宽度越大，则 CPW 传输线两端产生的相位偏移越大，传感器的动态范围也越大；图 3(b) 和 (e) 表明，当地导体的宽度和衬底的厚度在一定范围内变化时，几乎不影响相位偏移值；图 3(d) 表明，绝缘层越薄，则传输线对油水介质的响应越灵敏，相位偏移就越大，传感器的动态范围也越大；图 3(f) 则表明，传输线越长，相位偏移的动态范围越大，但

应限制在一定的长度范围内，以确保在实际应用时最大相位偏移量不宜超过  $2\pi$ ，否则容易出现多解。



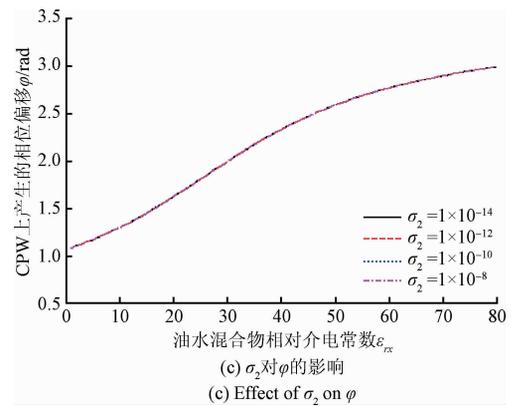
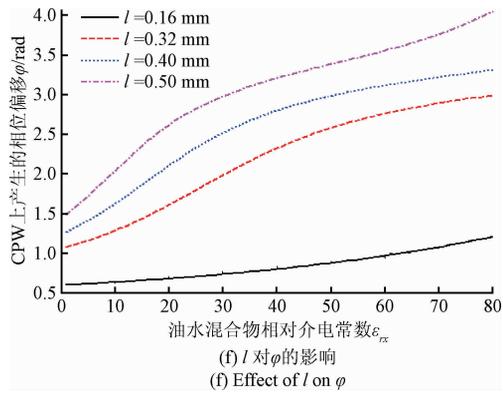
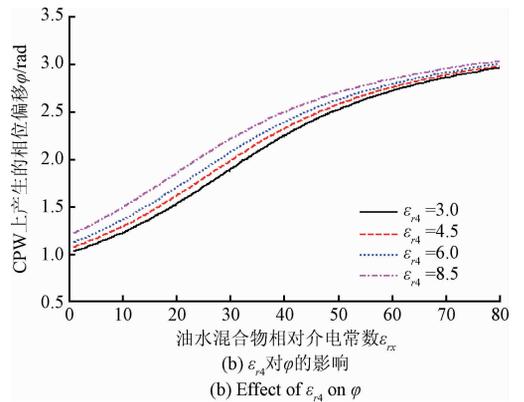
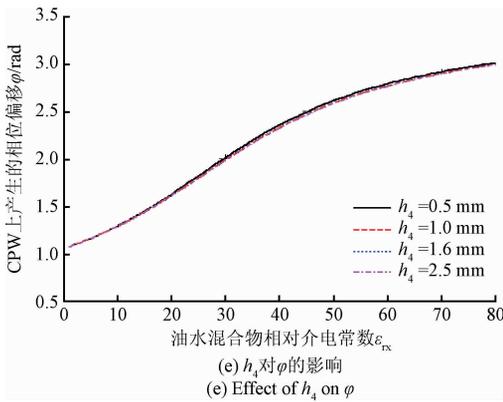


图3 CPW 结构参数与  $\varphi$  的关系曲线

Fig.3 Relationship between structural parameters of CPW and  $\varphi$

图4所示为CPW材料参数与 $\varphi$ 的关系曲线,图4(a)和(b)表明,绝缘材料或者衬底材料的介电常数越大,CPW传输线两端产生的相位偏移的动态范围越小,也就是说,衬底层和绝缘层均宜采用介电常数较小的材料,以提高传感器的分辨率;从图4(c)和(d)可见,只要绝缘材料和衬底材料具有较小的电导率,即便相差 $10^6$ 个数量级,电导率变化也不会对相位偏移产生影响,这也进一步降低了对材料绝缘性能的要求。

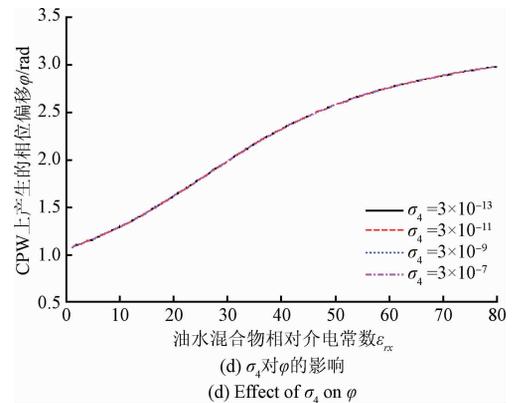
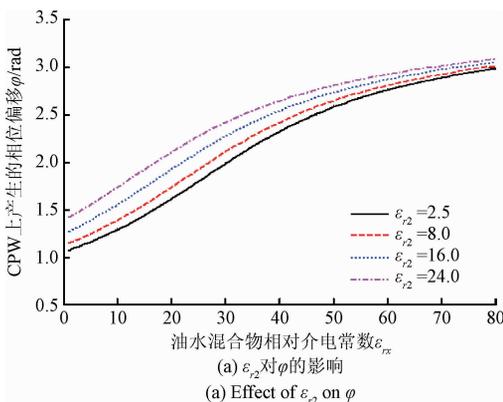


图4 CPW 材料参数与  $\varphi$  的关系曲线

Fig.4 Relationship between material parameters of CPW and  $\varphi$



综上所述,设计CPW传感器应遵循以下原则:

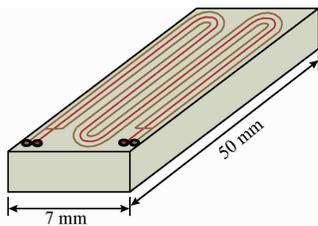
1) 从CPW结构方面考虑,在空间允许的情况下,应选择较大的中心导体的宽度和导体间槽宽;地导体的宽度和衬底的厚度对分辨率几乎没有影响,可以灵活设计;此外,减小绝缘层的厚度,并适当增加传输线的长度,都能够有效提高相位偏移的动态范围。

2) 从CPW材料方面考虑,选择介电常数较小的表面涂覆材料和底部衬底材料能够进一步提高传感器的动态范围,当表面涂覆材料和底部衬底材料的电导率分别

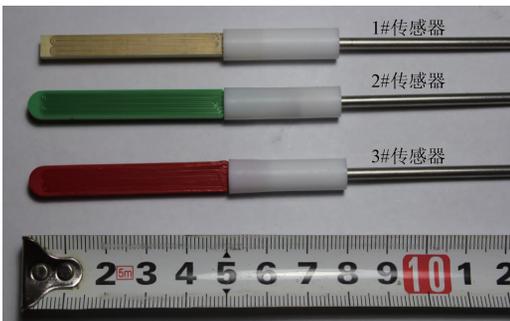
在  $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ S/m}$  和  $3 \times 10^{-13} \sim 3 \times 10^{-7} \text{ S/m}$  范围内变化时,材料的电导率对传感器的分辨率影响不大,在工程实际中大多数绝缘材料均满足电导率要求。

### 3 共面微带传输线传感器实验研究

根据理论分析的结果,要在有限的尺寸条件下提高传感器的分辨率,就需要增加传输线的有效长度,因此,将实际 CPW 传输线设计成首尾相连的 S 型。为了便于分析比较,设计 3 种不同尺寸的传感器,其示意图和实际传感器如图 5 所示。其中,2#传感器采用双面 CPW,在传感器总长度不变的情况下,使得传输线的有效长度提高了 1 倍;3#传感器与其他传感器的区别在于表面涂覆的绝缘介质的厚度是另外两种的 4 倍。显然与同轴传输线结构不同,CPW 的短小片状结构非常适合沿环状空间的阵列组合,具体参数如表 3 所示。



(a) CPW传感器的结构示意图  
(a) The diagrammatic drawing of CPW detector



(b) 3种CPW传感器实物图  
(b) The actual product of three kinds of CPW detector

图5 CPW 传感器结构示意图与实物

Fig. 5 The diagrammatic drawing and actual product of CPW sensors

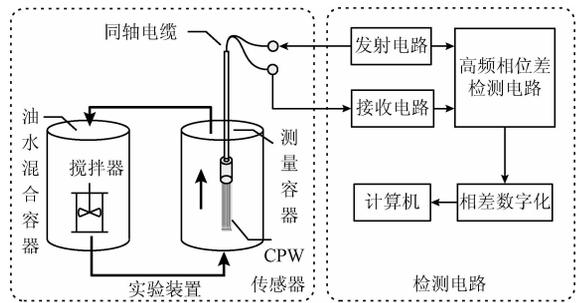
表3 CPW 传感器参数表

Table 3 Parameters of CPW sensor

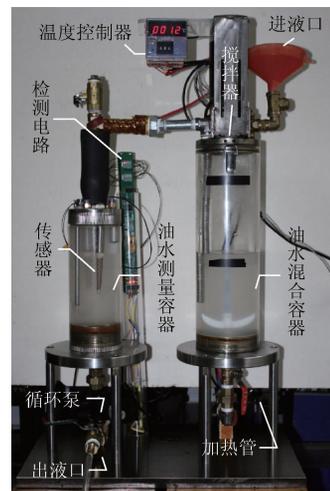
CPW 传感器	$w_1/$ mm	$w_2/$ mm	$d/$ mm	$\epsilon_{r2}$	$\epsilon_{r4}$	$h_2/$ mm	$h_4/$ mm	$l/$ mm	PCB 层数
1#传感器	0.2	0.38	0.15	2.5	4.5	0.05	1.6	160	单面
2#传感器	0.2	0.38	0.15	2.5	4.5	0.05	1.6	320	双面
3#传感器	0.2	0.38	0.15	2.5	4.5	0.20	1.6	160	单面

上述 CPW 传感器均采用长、宽、厚为  $50 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$  的环氧树脂-玻璃 (FR4) 衬底材料,其相对介电常数约为 4.5;导体材料为铜,厚度为  $35 \mu\text{m}$ ;表面涂覆的绝缘材料为聚四氟乙烯,相对介电常数约为 2.5。

实验装置如图 6 所示,将油水样品倒入容器中,并利用搅拌器以固定速度将其混合均匀。将 CPW 传感器浸没在液体中,接口端通过同轴电缆与检测电路相连。实验过程中,温度保持在  $25^\circ\text{C}$  左右,利用配制的持水率从 0% ~ 100%、间隔单位为 10% 的 11 份油水样品分别对 3 支不同尺寸的传感器进行测试,记录每支传感器在不同持水率样品中产生的相位偏移值。



(a) 原理图  
(a) Schematic diagram



(b) 实物图  
(b) Experimental device

图6 CPW 传感器实验装置

Fig. 6 Experimental device for CPW detector

图 7 所示为 3 支不同尺寸的传感器在不同离散样品中的信号相位偏移值。为了便于比较,图中还给出了不同的传感器上的相移理论计算曲线。其中,理论曲线的计算过程为将 H-B 公式中油水介电常数  $\epsilon_{rx}$  与持水率  $Y_w$  之间关系代入式(1),得到相移  $\varphi$  与持水率  $Y_w$  之间的曲线。在油水介质均匀混合条件下,H-B 公式为<sup>[16]</sup>:

$$\epsilon_{rx} = [\sqrt{\epsilon_o(1 - Y_w)} + Y_w \sqrt{\epsilon_w}]^2 \quad (40)$$

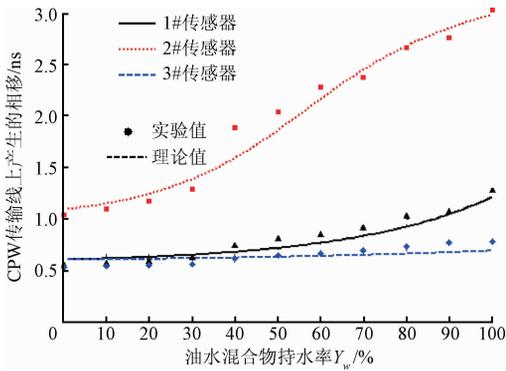


图7 CPW 传感器的数值模拟与实验结果对比  
Fig.7 Comparison of numerical simulation and experimental results of CPW detector

比较实验数据可见:1)3#传感器反映出绝缘层厚度的差异对动态的影响,绝缘层越厚,传感器动态范围越小,这与图3(d)数值模拟的结论是一致的;2)1#与2#传感器的长度差异表明,传感器的长度越长,则相移动态范围越大;3)在CPW传感器上产生的信号相移与持水率呈单调递增关系,与理论分析结论相同。

图8所示为电容法<sup>[17]</sup>、电导法<sup>[18]</sup>和CPW法这3种持水率检测方法中传感器响应值归一化结果。

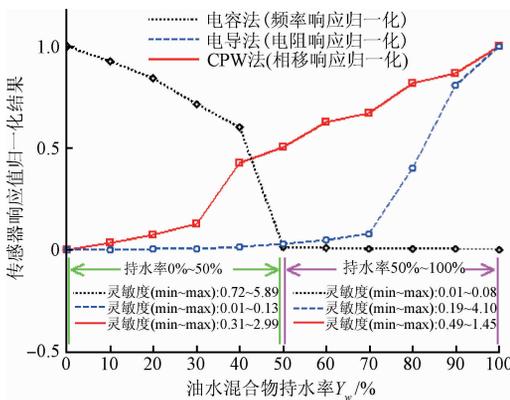


图8 电容、电导、CPW 3种持水率检测方法对比  
Fig.8 Comparison of capacitance, conductance and CPW methods for detecting water holdup

图8中曲线表明:1)电容法在持水率低于50%时,灵敏度较高,当持水率高于50%时,灵敏度急剧降低。原因是振荡频率与电容值(介电常数)成反比,其导数(即变化率)与电容值的平方(介电常数的平方)成反比,因此随着介电常数(持水率)的增加,灵敏度会迅速下降。2)电导法在持水率低于50%时,分辨率较差,当持水率高于70%时具有良好的分辨率。这是因为当持水率较低时,油为连续相,油水混合物的电导率很小,

电导传感器近似为一个纯电容,当持水率增加时,油水混合物的电导率随持水率的增加显著增加,电导传感器的灵敏度迅速提高。3)CPW传感器在持水率全范围内都具有良好的分辨率,当检测电路采用差频法<sup>[3]</sup>检测信号相移时,相移检测精度可达皮秒级,持水率检测分辨率可达3%,因而不存在电容法<sup>[19-20]</sup>和电导法<sup>[21]</sup>传感器仅适用于低持水和高持水窄范围内测量的弊端。

### 4 结 论

针对水平井和大斜度井中多点阵列式持水率测量的需求,首次提出了CPW传感器设计方案。CPW传感器具有开放式结构,避免了同轴传输线传感器间隙封闭、狭小、易于堵塞、不便维护的弊端,在保证动态和分辨率的条件下,实现了阵列传感器的小型化。

采用保角变换法,较为全面地分析了材料参数和结构参数对CPW传输线相移的影响规律,设计制作了3种CPW传感器,并在此基础上进行了实验研究。理论分析与实验结果一致表明,产生在CPW传感器上信号的相移与持水率呈近似线性关系,这使得CPW传感器在持水率全程段内都有效,弥补了电容法和电导法测量范围窄的不足。

### 参考文献

[1] RYAN N D, HAYES D. A new multiphase holdup tool for horizontal wells [C]. 42nd Annual Logging Symposium on Society of Petrophysicists & Well Log Analysts (SPWLA), 2001;17-20.

[2] ZETT A, WEBSTER M, NOORDERMEER A, et al. New sensor development helps optimize production logging data acquisition in horizontal wells [J]. Petrophysics, 2012, 187(2):70-85.

[3] 魏勇,余厚全,陈强,等. 电磁波持水率传感器的研究与实验[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(10):27-30. WEI Y, YU H Q, CHEN Q, et al. Research and experiment on electromagnetic wave water holdup sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(10):27-30.

[4] 赵才军,蒋全兴,景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):695-700. ZHAO C J, JIANG Q X, JING SH H. Determining complex permittivity with improved transmission/reflection method using coaxial line[J]. Chinese Journal

- of Scientific Instrument, 2011, 32(3):695-700.
- [5] 余厚全, 魏勇, 汤天知, 等. 基于同轴传输线电磁波检测油水介质介电常数的理论分析[J]. 测井技术, 2012, 36(4):361-364.  
YU H Q, WEI Y, TANG T ZH, et al. Theoretical analysis of measuring dielectric constant of oil-water mixture based on electromagnetic wave on coaxial line[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4):361-364.
- [6] 姜旭, 刘翠玲, 王进旗. 相位法含水率计鉴相器的耐温电路设计研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11):20-22.  
JIANG K, LIU C L, WANG J Q, Design and research on phase discriminator temperature-resistant circuit of moisture content meter by phase method[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(11):20-22.
- [7] 王进旗, 强锡富, 张勇奎. 同轴线式相位法测量油井含水率[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1):74-76.  
WANG J Q, QIANG X F, ZHANG Y K. Coaxial Transmission line phase method for measuring water content of oil well [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1):74-76.
- [8] MENICANIN A B, IVANISEVIC N P, ZIVANOV L D, et al. Improved performance of multilayer cpw inductors on flexible substrate [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11):1-4.
- [9] MOHAMED A M O, ELGAMAL M, SAID R A. Determination of water content and salinity from a producing oil well using CPW probe and eigendecomposition [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 125(2):133-142.
- [10] CHEN E, CHOU S Y. Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1997, 45(6):939-945.
- [11] 魏勇, 余厚全, 刘国权, 等. 一种基于共面微带传输线法井下原油含水率检测装置, CN204113283U[P]. 2015.  
WEI Y, YU H Q, LIU G Q, et al. The downhole crude oil water holdup detect device based on coplanar microstrip transmission line, CN204113283U[P]. 2015.
- [12] VEYRES C, FOUAD HANNA V. Extension of the application of conformal mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions[J]. International Journal of Electronics, 1980, 48(1):47-56.
- [13] 赵吉祥, 毛军发. 薄衬底共面波导的特性分析[J]. 电子学报, 2003, 31(12):1891-1893.  
ZHAO J X, MAO J F. Characteristic analysis for CPW on thin substrate [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12):1891-1893.
- [14] 周希朗. 变型共面波导的保角变换分析[J]. 通信学报, 1997(11):64-67.  
ZHOU X L. Conformal mapping analysis of modified coplanar waveguides [J]. Journal of China Institute of Communications, 1997(11):64-67.
- [15] HE D W, CHENG X H, WANG J ZH, et al. An analytical model for coplanar waveguide on silicon-on-insulator substrate with conformal mapping technique[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(1):98-104.
- [16] 王进旗, 强锡富, 陈建明, 等. 相位法测量油井含水率的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(2):245-247.  
WANG J Q, QIANG X F, CHEN J M, et al. Phase measurement of water content in oil well[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(2):245-247.
- [17] 方禹, 余厚全, 唐桃波, 等. 基于电容法的原油局部持水率检测方案[J]. 测井技术, 2016, 40(3):307-310.  
FANG Y, YU H Q, TANG T B, et al. Measurement scheme of local water holdup in oil-water two-phase flow based on capacitance method [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(3):307-310.
- [18] 张博. 基于电容电导法的原油含水率测试仪研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2008.  
ZHANG B. Research on water-cut meter for crude oil based on capacitance-conductance technique [D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2008.
- [19] 王莉莉, 陈德运, 于晓洋, 等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3):515-522.  
WANG L L, CHEN D Y, YU X Y, et al. Sensor optimization design in electrical capacitance tomography system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):515-522.
- [20] 邓湘, 唐宇. 电学过程成像的多传感器融合研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(2):63-66.  
DENG X, TANG Y. Study of multi-sensor fusion on electrical process tomography [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(2):63-66.

- [21] 赵鑫, 金宁德, 陈万鹏, 等. 纵向多极阵列电导式两相流测量系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10):1253-1257.

ZHAO X, JIN N D, CHEN W P, et al. Study on two-phase flow measurement system with vertical multi-electrode array conductance sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10):1253-1257.

## 作者简介



**魏勇** (通讯作者), 2003 年于原江汉石油学院获得学士学位, 分别在 2006 和 2016 年于长江大学获得硕士和博士学位, 现为长江大学副教授, 主要研究方向为声电测井新方法 with 仪器研究。

E-mail:7034669@qq.com

**Wei Yong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2003 from Jiangnan Petroleum Institute, and received his M. Sc.

and Ph. D. degrees both from Yangtze University in 2006 and 2016, respectively. Now he is an associate professor in Yangtze University. His main research interests include new method and instrument for acoustic & electric well logging.



**余厚全**, 1982 年于原江汉石油学院获得学士学位, 分别在 1994 和 1998 年于华中理工大学获得硕士和博士学位, 现为长江大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理、石油地球物理仪器。

E-mail:houbuquanyu1921@gmail.com

**Yu Houquan** received his B. Sc. degree in 1982 from Jiangnan Petroleum Institute, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1994 and 1998, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Yangtze University. His main research interests include signal & information processing, and petroleum geophysical instruments.