

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104499

基于平面电容的油水多界面检测方法研究*

宋震¹ 吕忠蕾¹ 麦洋²

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2. 四川宏华石油设备有限公司 成都 610036)

摘要:含水量是衡量原油质量的重要指标,在原油的生产和储运过程中油水混合液分界面不断变化,因此全过程都要用到高精度传感器对其进行界面检测。基于电容边缘效应设计了一种侵入式平面电容传感器,其主要结构由基板和平面电极阵列两部分组成。运用有限元软件建立8电极阵列传感器模型,对不同电极工作时的电场分布进行研究,分析了平面电容传感器的检测灵敏度和成像精度。并且,研究了电极宽度、长度和相邻间距对传感器灵敏场分布的影响。对介电分布进行图像重建,使设计的平面电容阵列传感器可以检测3个分界面的高度,且经过尺寸参数优化,提高了传感器的成像精度。实验证明,运用平面电容阵列检测油水界面的方法具有可行性和有效性。

关键词:平面电容;油水界面检测;电容传感器;电容成像

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Study on detection method of oil-water multi-interface based on planar capacitance

Song Zhen¹ Lyu Zhonglei¹ Mai Yang²

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Sichuan Honghua Petroleum Equipment Co., Ltd., Chengdu 610036, China)

Abstract: Water content is an important indicator to measure the quality of crude oil. In the process of production, storage and transportation of crude oil, the interface of oil-water mixture is constantly changing. Thus, high-precision sensors are used to detect it in the whole process. In this article, an intrusive planar capacitance sensor was designed based on the capacitive edge effect. Its main structure consists of a substrate and a planar electrode array. The 8-electrode array sensor model was established by using finite element software. The electric field distribution of different electrodes was studied, and the detection sensitivity and imaging accuracy of the planar capacitive sensor were analyzed. In addition, the influence of the width, length and adjacent distance of the electrodes on the sensitive field distribution of the sensor was studied. Through the image reconstruction of the dielectric distribution, the designed planar capacitance array sensor can detect the height of the three interfaces, and the size parameters are optimized to improve the imaging accuracy of the sensor. The feasibility and effectiveness of the method of using planar capacitor array to detect oil-water interface have proved by experiments.

Keywords: planar capacitance; oil-water interface detection; capacitance sensor; capacitance imaging

0 引言

在原油开采处理中,储罐中的水和油在其交界处以不同的比例混合形成具有一定宽度的乳化带,混合液的注入和纯水的排放会影响乳化层厚度,测量出乳化带的

位置和宽度就可以确定油水分界面,测量越准确,原油含水率的控制越好,联合站盘库系统的精确度越高^[1]。故在原油的生产和储运过程中,对原油储罐中的油水分界面必须进行精确检测。

对于储罐内的液面测量有多种方法,根据检测原理将其分为光纤式、差压式、浮子式、超声波式和电容式等,

收稿日期: 2021-07-06 Received Date: 2021-07-06

* 基金项目: 中国博士后科学基金(2017M623061)、湖南省自然科学基金(2020JJ4724)项目资助

其中的电容式液位测量法在早期都是用圆柱形电容传感器与罐壁形成电容器,利用不同介质具有不同的介电常数的原理,可以对混合液分界面实现快速、连续实时测量^[2-4]。但是这种方法大多只能检测单一的界面,然而在油水界面检测中往往存在多个界面,且存在乳化液形式的过渡层,因此需要对多个界面进行检测。丛胜强于1998年提出了分段电容物位检测方法,潘旭、姚玉峰、张波等对分段式电容传感器进行了研究,他们将同轴的圆柱形电容器自上而下分成若干段独立电极,电极通电后与罐壁之间形成电容器,相当于多个小型物位计,这种方法实现了对多个液面的检测,同时也降低了传感器对检测环境和介质的要求^[4-7]。周兆岩^[8]在此基础上提出改进,不再使用罐壁作为电容器的一部分,而是利用电容边缘效应将分段式电极的相邻极板组成电容器,形成 n 个小型液位计来共同测量油水界面,该方法具有单边渗透、穿透深度和信号强度可调、不损失待测物的优点,一般用于对材料进行特征测量,如检测材料的介电常数、电容率、已知材料的厚度和缺陷等^[9-10]。

目前在电容层析成像中大多使用的是非入侵式传感器,将电极片贴在管道外侧,这样可以避免内部流体的污染,具有响应速度快、成本低廉等特点^[11-12]。但是对于深度大、直径粗的大型原油储罐而言,此种方法并不适用。本文将平面电容传感器和层析成像引入到界面测量中,设计了一种用于油水界面检测的平面电容传感器,对传感器和罐体进行三维建模,利用电磁场理论并借助有限元软件对其进行电场分析,得到了传感器的检测灵敏度和成像精度;对电极尺寸参数进行分析并优化,使传感器具备高精度成像的能力,满足了液面检测的要求。

1 平面电容传感器设计与原理

1.1 结构设计

平面电容式传感器的基础结构为矩形基板,在基板上均匀分布有8个平面条带电极,如图1所示。传感器设计参数如下:基板长度15 cm,高度1 m,厚度1 cm,材料为聚四氟乙烯;每个电极片长度10 cm,高度5 cm,厚度0.1 cm,电极间距0.5 cm,材料为铜;激励电压为1 V;电极间不设置屏蔽电极。为了保证电极的正常工作,需在传感器外部包覆耐腐蚀性能良好的聚四氟乙烯薄膜绝缘层,由于其材料具备绝缘性不会阻碍电场线穿过,因此也不会降低传感器的检测范围。

使用时将传感器从储罐的顶部法兰处下放到储罐中,校正后即可进行检测。由于油水混合液中含各种杂质,传感器使用一段时间后,在其外壁上将会结垢^[4]。此传感器作为活动式探测工具,可以在结垢后将其取出,更换外部的绝缘层即可再次使用。

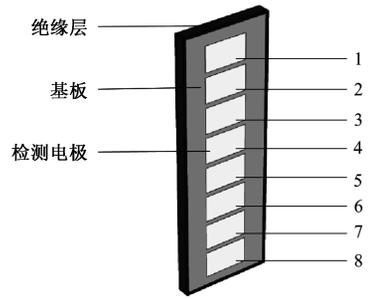


图1 传感器电极设计结构

Fig. 1 Electrode design structure of sensor

1.2 工作原理

如图1所示,将电极从下往上依次编号为1, 2, ..., 8,在一次完整的测量过程中,选择电极1作为激励电极,其余7个电极全部接地,按顺序依次作为接收电极,逐个测量接收电极与激励电极之间的电容值 $C_{1-2}, C_{1-3}, \dots, C_{1-8}$ 。然后换相邻的下一个电极2作为激励电极,依次对每个电极进行逐个激励,得到 $C_{2-3}, C_{2-4}, \dots, C_{2-8}$,依此类推直到测得 C_{7-8} ,这样可以测得28个独立电容值。在实际的测量过程中,需要在此基础上进行多次循环,对循环得到的数据进行拟合计算,得到较精确的结果。

电极激励原理如图2所示,利用单电极激励法,将某一片电极作为激励电极注入低压后,激励电极与接收电极之间通过边缘效应形成稳定电场。电场线从激励电极出发,流经周围介质,然后在接收电极上接收到相应的信号,流经不同介电常数的介质会产生不同的信号。这些响应信号作为探测到的数据携带了介质的状态和电学信息,利用电磁传播方程,可以得到被测介质的介电常数 ϵ 与电极间电容 C 的关系,再通过数学反演,重建出介质的介电常数分布 ϵ 。

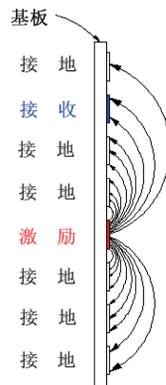


图2 原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram

1.3 界面测量与成像理论

界面高度的可视化测量需要利用传感器电信号进行

成像。对于层析成像而言,通常将应用和研究分为正问题(或正演问题)和逆问题(或反演问题、反问题)^[13-15]。正问题通常是指在狄利克雷(Dirichlet)边界条件下,根据已知的介电常数分布情况和传感器尺寸等,利用有限元法求解,得到相应的电势分布以及不同电极对间的电容值。

本文采用的是单电极激励法,如图 1 所示,可以测得传感器的独立电容值个数为:

$$M = 8 \times (8 - 1) / 2 = 28$$

当第 i 个电极($i = 1, 2, \dots, 8$)为激励电极时,与之相关的 Dirichlet 边界条件可以表示为:

$$\begin{cases} \phi(x, y, z) = \\ \left\{ \begin{array}{l} V_c((x, y, z) \subseteq \Gamma_i) \\ 0((x, y, z) \subseteq \Gamma_k (k = 1, 2, \dots, 8, k \neq i)) \text{ 且} \\ ((x, y, z) \subseteq (\Gamma_s + \Gamma_{pg})) \end{array} \right. \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_c 表示激励电压; $\varepsilon(x, y, z)$ 表示介质的相对介电常数分布; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_7, \Gamma_8$ 表示 8 个电极表面; Γ_s 表示屏蔽电极位置; Γ_{pg} 表示保护电极位置; $\phi(x, y, z)$ 表示电势分布,即接收电极上的感应电荷。

根据 $C = \frac{Q}{V}$, 电极对 $i - j$ 之间的互电容值如下:

$$C_{i,j} = \frac{Q}{V_i - V_j} = \frac{Q}{V_i - V_j} = \frac{\iint_A \varepsilon(x, y, z) E dA}{V_i - V_j} = \frac{\iint_A \varepsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z) \cdot dA}{V_i - V_j} \quad (2)$$

式中: $V_i - V_j$ 表示电极对 i, j 之间的电势差; A 是指电极 j 周围的封闭区域; Q 是指电极 j 上的电荷量; E 为电位移量。

为减少噪声影响,需要对电容变化量等进行归一化处理,其电容归一化公式为:

$$C = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l} \quad (3)$$

式中: C_h 为满场电容值; C_l 为空场电容值; C_m 为实际测得的电容值。

灵敏度同电容一样,也需要进行归一化处理,敏感场灵敏度表示^[16]为:

$$S_{i,j}(e) = \frac{C_{i,j}^m(e) - C_{i,j}^l \zeta(e)}{C_{i,j}^h - C_{i,j}^l \varepsilon_h - \varepsilon_l} \quad e = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: $S_{i,j}$ 为第 i, j 电极间第 e 个测试微元的灵敏度; $C_{i,j}^m$ 表示第 e 个单元材料相对介电常数为 ε_h , 其余单元的为 ε_l 时,第 i, j 电极间的电容值; $C_{i,j}^h$ 和 $C_{i,j}^l$ 分别表示充满相对介电常数为 ε_h 和 ε_l 时第 i, j 电极间的电容值; $\zeta(e)$ 表示与第 e 个单元面积有关的修正因子。

图像重建的过程就是求解灰度矩阵 \mathbf{G} 的过程,经过

离散化、归一化处理:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{G} \quad (5)$$

$$\mathbf{C} \in \mathbf{R}^M, \mathbf{G} \in \mathbf{R}^N, \mathbf{S} \in \mathbf{R}^{M \times N}.$$

式中: M 为可测得的独立电容数目; N 为成像区域内像素数目。

2 传感器油水界面测量有限元仿真

为验证所设计的传感器的测量功能,需建立有限元模型对其进行仿真分析。仿真的目的是获得所设计传感器的电势分布及电极间电容值,仿真结果中互电容矩阵的右上三角数值即为所需的电极间电容值。利用电势分布可以得到传感器的灵敏场分布,由此判断该传感器的灵敏度。

2.1 模型建立

由于储罐的结构中附件较多,为方便进行仿真,将其简化为圆柱形容器,半径为 15 cm,高度 $H = 320$ mm。其中,水层高度 $H_1 = 80$ mm; 乳化层高度 $H_2 = 20$ mm; 原油层高度 $H_3 = 150$ mm; 空气层高度 $H - H_1 - H_2 - H_3 = 70$ mm。

建立模型时,由于原油和水的混合较为复杂,乳化液的介电常数也不是一成不变的,故作出以下假设: 1) 原油和乳化液、乳化液和水之间界线清晰; 2) 在乳化层中,油和水的混合比例从水段到油段按线性规律变化; 3) 原油和空气之间界线清晰。

利用有限元软件建立三维模型求解的步骤分为传感器模型建立、材料设置、物理场设定、网格剖分和求解计算。

在有限元仿真计算过程中,若传感器周围的介质是空气介质(介电常数为 1)时,求得电容值即为空管电容值;若传感器周围的介质是水介质(介电常数为 81.5)时,求得电容值即为满管电容值。互电容的数值越大,表示两个电极之间的储荷能力越强。

2.2 电势分布与电容值分析

将电极 1 作为激励电极,其他电极作为接收电极,程序运行后,得到电势分布云图,如图 3 所示;求解出的空场和满场时的 28 组电容值对比如图 4 所示。

图 3 为给激励电极 1 施加激励电压时电极板上的电势分布,可以看出,激励极板上电势最大,极板周围的电势呈现衰减趋势。图 4 为空场和满场两种情形下,激励电极被施加激励电压时,电极对间(去除重复的电极对)的电容值,由于相邻电极之间的距离是最短的,故电容值最大;距离越远,电容相同间距的电极对电容值基本相同。

2.3 灵敏场分析

平面式电容传感器相较于圆柱电容传感器而言,灵

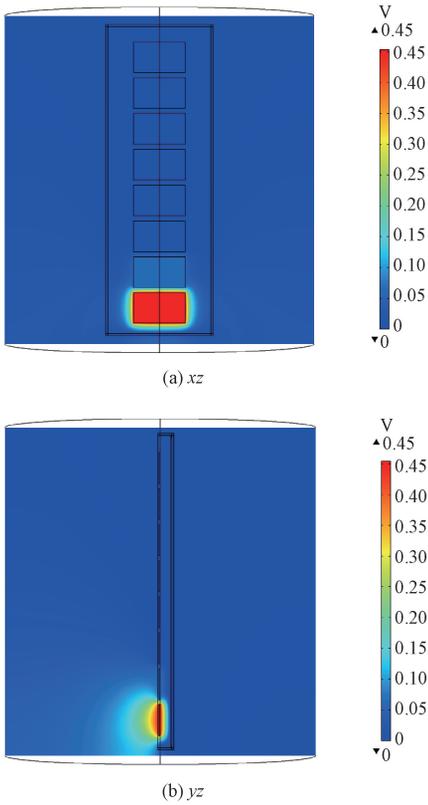


图3 电势分布

Fig. 3 Electric potential distribution diagram

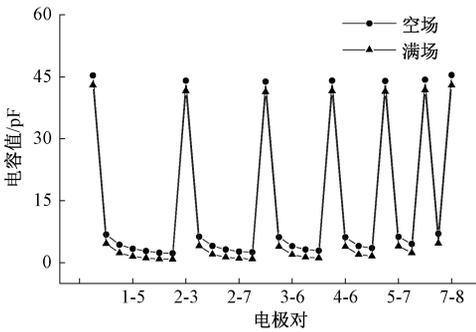


图4 空场/满场的电容值数据图

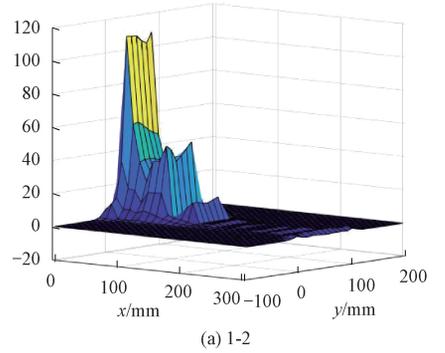
Fig. 4 Data diagram of capacitance value of empty/full field

敏场更不均匀,需要对其进行分析研究,为最后的成像做准备。传统灵敏场计算方法运算量大,往往需要较长的运算时间,所以本次采用电势分布法,参考吴新杰等^[17]提出的灵敏场的快速计算方法,对灵敏场的计算进行步骤简化,减少了运算耗时。根据测得传感器的独立电容值个数,可计算出28个电容敏感场,根据极板的相对位置,只需要计算1-2、1-3、1-4、1-5、1-6、1-7、1-8共7中情形下的敏感场情况,其余敏感场可以以这7种为基准通过平移得到。

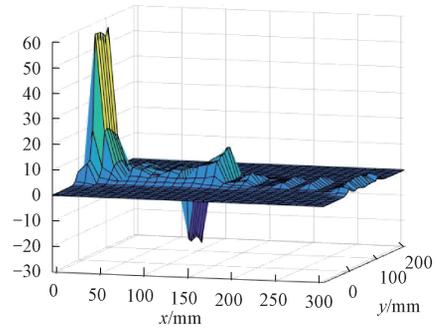
1) 从有限元软件中导出1为激励终端时的电场强度分量 E_x 和 E_y , 将文件命名为 E1.txt, 其余激励终端依此

类推的导出 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 、 E_6 、 E_7 和 E_8 ;

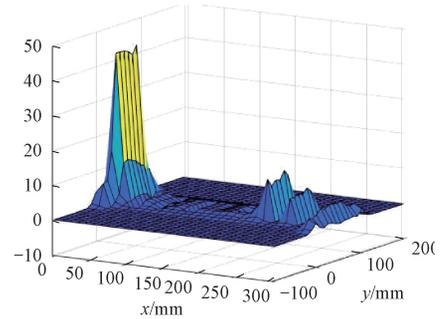
2) 在数学软件中,导入场强文件,利用 $S_{12} = -(E_x1 \cdot E_x2 + E_y1 \cdot E_y2)$ 得到灵敏度图电极1和电极2间的灵敏度图,其余灵敏度图计算同上;得到1-2、1-4、1-6、1-8的灵敏场图如图5所示。



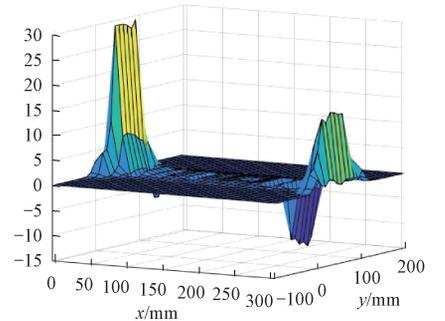
(a) 1-2



(b) 1-4



(c) 1-6



(d) 1-8

图5 电极对间灵敏场分布

Fig. 5 Sensitive field distribution between electrode pairs

3 传感器电极尺寸参数分析与优化

对于平面电极,刘少刚等^[18]、陈俊龙等^[19]、李楠等^[20]都对其电容计算进行了研究,从前人的成果可知,平面电极的电容值计算存在严重的非线性,相邻电极进行近似计算如下:

$$C \approx \frac{L \cdot \epsilon_r}{\pi} \ln\left(\frac{2a+b}{b}\right) \quad (6)$$

式中: L 为电极长度; a 为电极宽度; b 为电极间距; ϵ_r 为介质的相对介电常数。

根据式(6)可知,在正问题计算过程中,对于平面电容传感器而言,影响其电容值的主要尺寸参数有电极长度 L 、宽度 a 和电极间距 b 。混合液界面高度是由电容值经过数学处理得到的,因此提高测量精度需要对设计参数进行分析与优化。就电极的长度 L 、宽度 a 和电极间距 b 进行参数化扫描,如图6~8所示。一般选用敏感场的均匀性、电容测量灵敏度和被测电容变化范围作为优化的目标参数。

1) 被测电容的变化范围定义为:

$$K_c = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad (7)$$

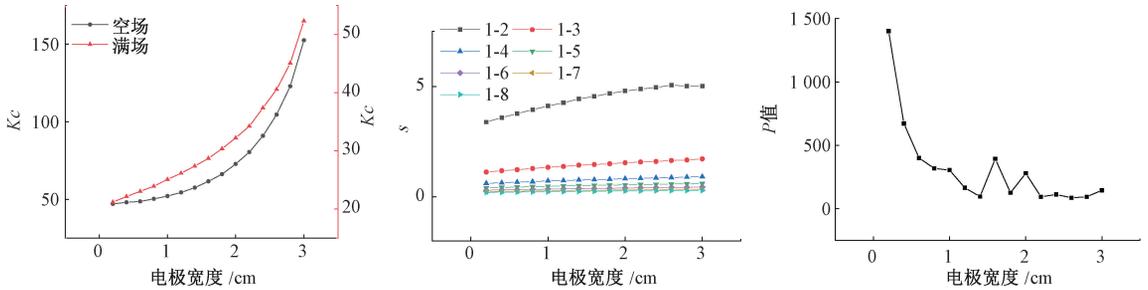


图 6 不同电极宽度下 3 种目标参数变化

Fig. 6 Three target parameter changes under different electrode widths

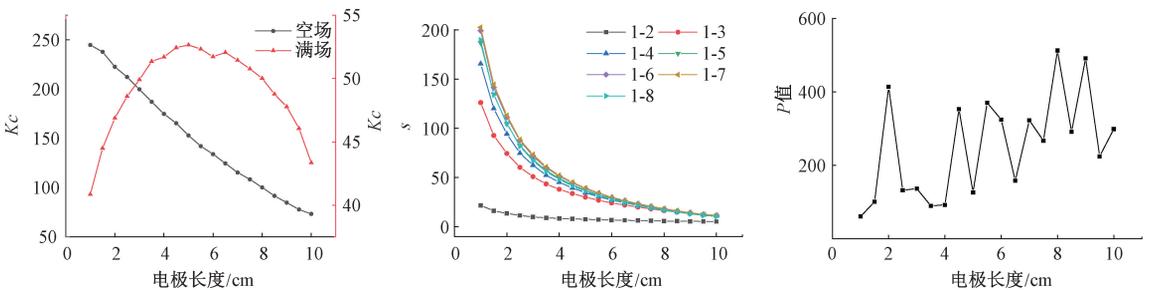


图 7 不同电极长度下 3 种目标参数变化

Fig. 7 Three target parameter changes under different electrode lengths

图6~8为不同参数变化下3个目标参数的变化情况。由图6可以看出,在其他条件不变的情况下,随着电

式中: C_{\max} 为电容的最大值; C_{\min} 为电容的最小值; K_c 表示电容的变化,一般用来表征电容传感器的信号噪声, K_c 值越大,代表敏感场的不均匀性越大。对于动态测量系统而言, K_c 值变化范围越小越好。

2) 测量灵敏度分布参数为:

$$s = \frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{i,j}^{obj} - C_{i,j}^{emp}}{C_{i,j}^{emp}} \quad (8)$$

式中: s 表示电容的测量灵敏度; $C_{i,j}^{emp}$ 表示空场电容值; $C_{i,j}^{obj}$ 表示检测的物场电容值。灵敏度分布参数 s 越大,说明传感器对场域的整体灵敏度越高。

3) 灵敏度平均值和标准差

$$\left\{ \begin{aligned} S_{i,j}^{avg} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_{i,j}(k) \\ S_{i,j}^{dev} &= \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [S_{i,j}(k) - S_{i,j}^{avg}]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中: $S_{i,j}(k)$ 为第 k 个单元内的灵敏度; avg 为平均值; dev 为标准差。

电极 i,j 间的灵敏度分布的均匀性 $P_{i,j}$ 为:

$$P_{i,j} = S_{i,j}^{dev} / S_{i,j}^{avg} \quad (10)$$

若想要电极 i,j 之间的灵敏场均匀一些,就需要 $P_{i,j}$ 尽可能小一些。

极宽度的增大, K_c 逐渐增大,灵敏度参数 s 逐渐变大, P 值逐渐减小。由图7可以看出,在其他条件不变的情况

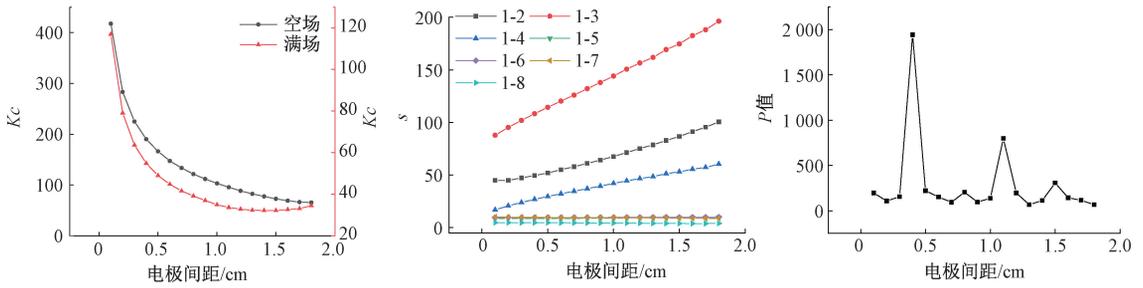


图 8 不同电极间距下 3 种目标参数变化

Fig. 8 Three target parameter changes under different electrode spacing

下,随着电极长度的增大,空场时 K_c 逐渐减小,满场时 K_c 先逐渐增大后减小;电极长度增大时灵敏度参数 s 逐渐减小, P 值起伏比较大。由图 8 可以看出,在其他条件不变的情况下,随着电极间距的增大, K_c 逐渐减小,灵敏度参数 s 逐渐变大, P 值大致趋势为减小。

综上,为了优化传感器设计参数从而获得良好的成像效果,选择电极宽度为 2 cm,电极间距为 1.8 mm,电极长度为 6 cm。

4 油水界面成像分析

4.1 优化前后成像对比分析

油水界面的位置通过传感器电信号成像进行检测,为了更直观的看到传感器尺寸优化的效果,利用图像重建算法对优化前后两种不同尺寸的传感器分别进行介电分布的图像重建。根据式(5)分别通过线性反投影(LBP)算法、Tikhonov 正则化法、Landweber 迭代法和共轭梯度法编写程序(Landweber 迭代法和共轭梯度法迭代次数均取为 1 000),对储罐内的介质分布进行图像重建并进行图像质量比较,图像重建结果如图 9 和表 1 所示。

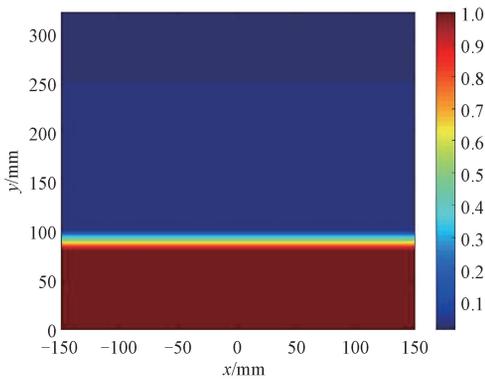


图 9 原始图像

Fig. 9 Original image

种算法进行重建后的图像,虽然都出现了不同程度的变形和失真,但是可以看出在高度为 100 和 250 附近时出现了明显的分界线,而在 80~100 图像出现了渐变。所以,可以根据图像初步判断分界面的位置所在。相同算法下,在优化后图形的轮廓相较于优化前更加接近理想图像,图像质量得到了一定的提高。

主观的视觉评价往往比较简单、直观,但是无法对不同图像进行比较,所以必须寻找一种客观的评价指标,通常利用图像的相对误差 ρ_a 、相关系数 ρ_b 来描述。

图像的相对误差是指图像重建前后原始向量的相对误差,其表达式为:

$$\rho_a = \left\| \frac{\hat{G} - G}{G} \right\| \quad (11)$$

式中: \hat{G} 是重建图像的灰度值; G 是原始图像的灰度值。

图像重建相关系数定义为:

$$\rho_b = \frac{\sum_{i=1}^m [(\hat{G}_i - \bar{\hat{G}})(G_i - \bar{G})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\hat{G}_i - \bar{\hat{G}})^2 \sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})^2}} \quad (12)$$

式中: $\bar{\hat{G}}$ 是 \hat{G} 的平均值; \bar{G} 是 G 的平均值。

根据图像的相对误差和相关系数的定义可知,图像的相对误差越小,重建图像的相关系数越大,表明重建后的图像质量越好,越接近真实图像。

通常,对于重建后的图像利用成像时间、图像的相对误差和相关系数来评价成像的速度和质量如表 2、3 所示。

表 2 和 3 为优化前后利用 4 种算法进行图像重建的各评价指标对比,可以明显看出,优化之后图像相对误差降低且图像相关系数增大,说明传感器尺寸参数优化可以有效提高界面成像的精度。从成像时间来看,LBP 成像速度最快,接下来是 Tikhonov 算法,最后是 Landweber 迭代和共轭梯度法,这是因为 LBP 和 Tikhonov 均为直接算法,而 Landweber 迭代和共轭梯度法为迭代算法,需要进行多次迭代计算。结合表 2 和 3 可以看出,虽然 4 种

图 9 为原始图像,表 1 中各图为参数优化前后利用 4

表 1 优化前后的重建图像
Table 1 Reconstructed images before and after optimization

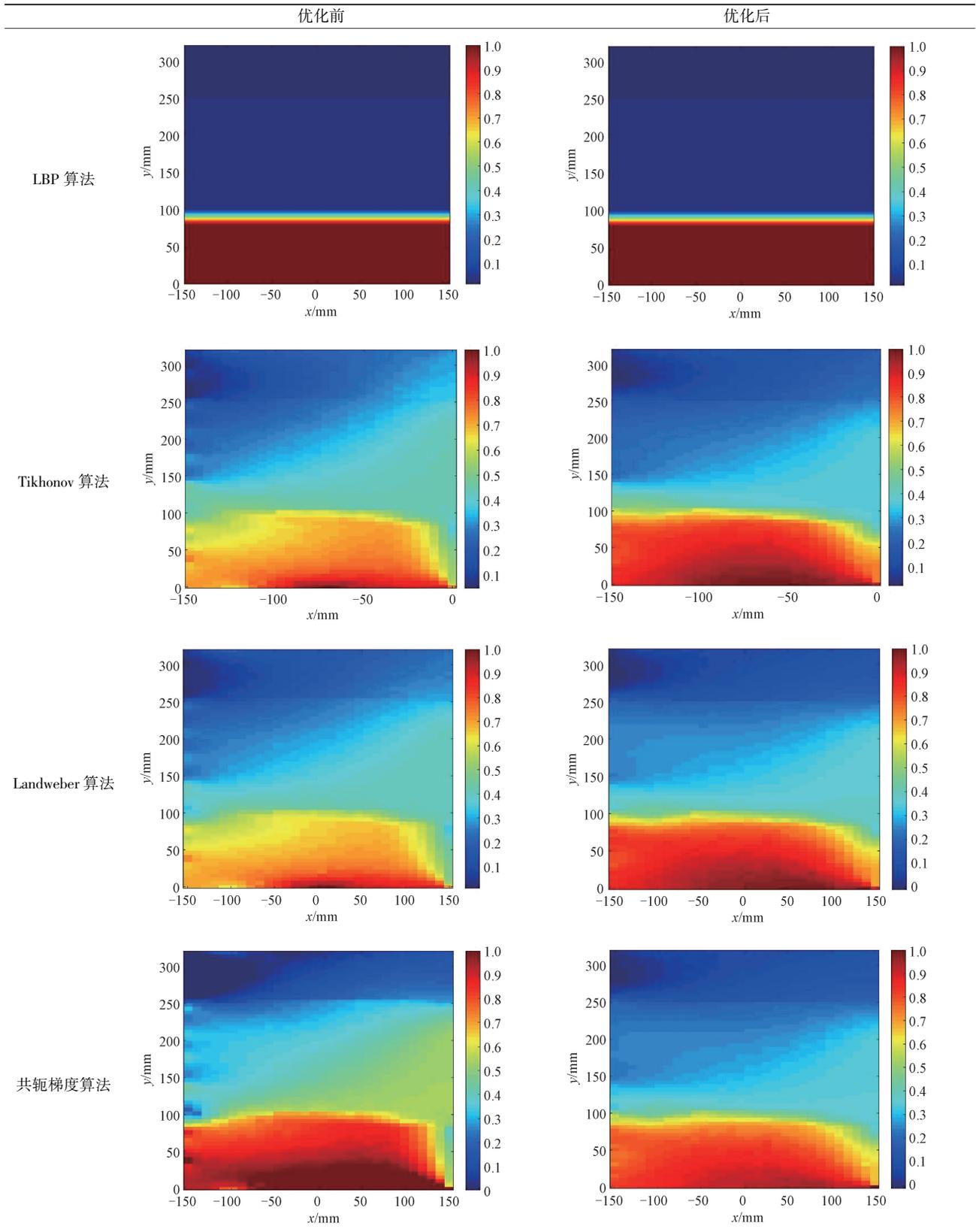


表 2 优化前重建图像评价指标表

Table 2 Evaluation index table of reconstructed image before optimization

算法类型	时间/s	图像相对误差/%	图像相关系数/%
LBP	0.227	22.942 1	0.815 6
Tikhonov	3.650	21.555 3	0.822 4
Landweber	17.893	23.927 2	0.829 7
共轭梯度法	101.531	28.083 4	0.835 1

表 3 优化后重建图像评价指标表

Table 3 Evaluation index table of reconstructed image after optimization

算法类型	时间/s	图像相对误差/%	图像相关系数/%
LBP	0.253	16.524 9	0.933 0
Tikhonov	3.244	16.209 3	0.931 5
Landweber	17.182	15.866 6	0.927 3
共轭梯度法	102.115	18.082 2	0.933 6

算法的图像相关系数相差无几,但是共轭梯度法的图像相对误差明显高于其余 3 种算法,因此不能选用共轭梯度法。同时,因为 LBP、Tikhonov 和 Landweber 这 3 种算法的图像相对误差之间差异较小,所以在都能保证成像精度的前提下,应选择计算时间最短的 LBP 算法,从而有效提高界面成像的效率。

4.2 实验验证

为验证此方法的有效性,需要开展相关测试实验。利用核子伽马扫描仪垂直移动并进行逐点测量,以 1 Hz 的帧频进行记录,一次完整的扫描需要 15~20 min,如图 10 所示,图 10(a) 为扫描仪测量得到的轮廓结果,图 10(b) 为所设计的平面电容传感器优化后成像得到的结果;同时为更直观的观察各高度界面的含水率,两种方法的含水率如图 10(c) 所示。

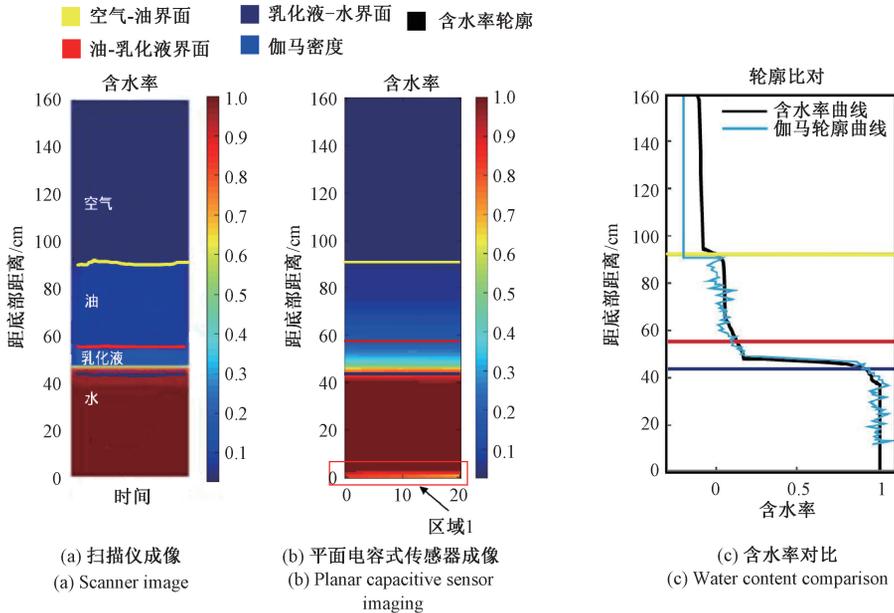


图 10 两种方式下结果对比

Fig. 10 Comparison of the results in two ways

如图 10 所示,对于相同的介质分布,对比图 10(a)、(b)可以看出,两种方式测量得到的分界面高度基本一致,说明所设计的平面电容式传感器可以对油水界面高度位置进行有效测量。对于图 10(b) 中区域 1 内图像与图 10(a) 存在差异的原因是平面电容传感器在工作时每个电极所对应的测量范围有限,因此对于罐底部分并未完全测量。由图 10(c) 可以看出,所设计的平面电容式传感器与核子伽马扫描仪对于同一被测对象的含水率测量结果也基本一致。

5 结论

本文设计了平面电容传感器的结构,并利用有限元软件对其进行仿真,分析得到其电势分布和电容值特性:激励极板上电势最大为 1 V,极板周围的电势呈现衰减趋势;同时,对传感器电极的灵敏度进行了研究:离激励极板越近,灵敏度越高。平面电极对之间的电容值主要与电极长度、电极宽度和电极间距这 3 个设计参数有关。随着电极宽度的增大, K_c 逐渐增大,灵敏度参数 s 逐渐变大, P 值逐渐减小。随着电极长度的增大,空场时 K_c 逐

渐减小,满场时 K_c 先逐渐增大后减小;并且当电极长度增大时灵敏度参数 s 逐渐减小, P 值起伏比较大。随着电极间距的增大, K_c 逐渐减小,灵敏度参数 s 逐渐变大, P 值大致趋势为减小。分别利用 4 种算法进行图像重建,得到优化前后的图像,根据图像评价指标的比较结果得出,优化后图像的轮廓相较于优化前更加接近理想图像,图像质量得到了一定的提高。通过有限元仿真和相关实验证明,运用平面电容式传感器对储罐中多种介质的分界面高度位置进行检测具备有效性和可行性。

参考文献

- [1] 董鹏敏,赵波,艾绳勇,等.原油储罐油水界面动态检测系统的研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2013,28(03):34-37.
DONG P M, ZHAO B, AI SH Y, et al. Research of dynamic measurement system for oil-water interface in a crude oil storage tank [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(3):34-37.
- [2] 任喜伟,何立风,宋安玲,等.油水界面测量与计算[J].仪器仪表学报,2019,40(9):95-115.
REN X W, HE L F, SONG AN L, et al. Measurement and calculation on oil-water interface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(9):95-115.
- [3] 万晓凤,易其军,雷继棠,等.动液面远程自动连续测量装置实现[J].工程设计学报,2013,20(3):260-264.
WAN X F, YI Q J, LEI J T, et al. Realization of remote working level automatic measurement device of oil well [J]. Journal of Engineering Design, 2013,20(3):260-264.
- [4] 孔范东.油水界面检测技术研究[D].沈阳:东北大学,2012.
KONG F D. Study of oil-water interface measurement technique [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [5] 孙宗佳.油水界面在线检测系统的设计[D].沈阳:东北大学,2010.
SUN Z J. Design of the on-line system of oil-water interface examination [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [6] 赵波.原油储罐油水界面动态检测系统的研究[D].西安:西安石油大学,2014.
ZHAO B. The dynamic detection system of oil-water interface in oil storage tanks [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.
- [7] 张波.分段电容式液位测量的研究[D].大连:大连海事大学,2010.
ZHANG B. The research of using sectionalized capacitance to liquid level measurement [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.
- [8] 周兆岩.油水界面在线检测系统的研发[D].沈阳:东北大学,2011.
ZHOU ZH Y. Study of the on-line system of oil-water interface examination [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [9] 汪蓓蓓,黄云志,刘永洪.平面电容传感器设计及在材料探伤中的应用研究[J].传感技术学报,2014,27(7):997-1001.
WANG B B, HUANG Y ZH, LIU Y H. Research on planar capacitive sensor design and application in material injuries detection [J]. Journal of Sensor Technology, 2014, 27(7): 997-1001.
- [10] 代守强,陈棣湘,田武刚,等.平面电容传感器热障涂层缺陷检测系统[J].中国测试,2017,43(1):78-83.
DAI SH Q, CHEN D X, TIAN W G, et al. Thermal barrier coatings based on planar capacitive sensor defect detection system [J]. China Test, 2017, 43(1): 78-83.
- [11] 张立峰,朱炎峰.电容层析成像系统阵列电极三维优化设计[J].计量学报,2020,41(8):947-952.
ZHANG L F, ZHU Y F. Three-dimensional optimal design of array electrode for electrical capacitance tomography system [J]. Acta Metrology, 2020, 41(8): 947-952.
- [12] 陶芳芳,宁尚雷,靳海波.电阻层析成像技术在气液(固)多相流动体系中的应用进展[J].过程工程学报,2020,20(4):371-381.
TAO F F, NING SH L, JIN H B. Application progress of electrical resistance tomography in gas-liquid-(solid) multiphase flow systems [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(4): 371-381.
- [13] YU D Y, LI Y. Research and application of neural network in electrical capacitance tomography image reconstruction [J]. Science and Engineering Research Support Society, 2016, DOI: 10. 14257/ijslip. 2016. 9. 9. 23.
- [14] PARK H C, HANG S C, LEE B K. Study on the hydrodynamic characteristics of a biomass fast pyrolysis conical spouted bed reactor using the pressure fluctuations analysis [J]. Journal of Korea Society of Waste Management, 2015, 32(5):444-452.
- [15] THOMAS W, MANUCHEHR S. A novel metal flow imaging using electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6):064001.
- [16] 张立峰,朱枫.电容层析成像混联归一化模型研究[J].计量学报,2018,39(5):675-678.
ZHANG L F, ZHU F. Research on hybrid normalization

- model of electrical capacitance tomography [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5):675-678.
- [17] 吴新杰,胡晟,付荣荣. 基于 COMSOL 的电容层析成像系统灵敏度场的计算[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2011, 38(3):193-196.
- WU X J, HU SH, FU R R. Calculation of sensitivity field of electrical capacitance tomography system based on COMSOL [J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 2011, 38(3): 193-196.
- [18] 刘少刚,安进华,罗跃生,等. 单一平面电容传感器数学模型及有限元解法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1):79-84.
- LIU SH G, AN J H, LUO Y SH, et al. Research on the mathematical model of a uniplanar capacitance sensor and its finite element solution [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(1): 79-84.
- [19] 陈俊龙,施隆照. 基于共面电容的非接触式液位线性测量系统的研究[J]. 武夷学院学报, 2015, 34(12): 74-78.
- CHEN J L, SHI L ZH. Non-contact linear liquid level measurement system based on coplanar capacitor [J]. Journal of Wuyi University, 2015, 34(12): 74-78.
- [20] 李楠,曹明琛,刘逵,等. 基于共面电容传感器的便携式预应力管道灌浆质量检测系统设计[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6):809-818.
- LI N, CAO M CH, LIU K, et al. Portable system design for inspecting grouting quality of prestressed ducts based on a coplanar capacitive sensor [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6): 809-818.

作者简介



宋震, 2004 年于青岛大学获得学士学位, 2010 年于亚琛工业大学获得硕士学位, 2015 年于阿尔托大学获得博士学位, 现为西南石油大学副研究员, 主要研究方向为过程系统工程。

E-mail: zhen.song@rwth-aachen.de

Song Zhen received his B. Sc. degree from Qingdao University in 2004, M. Sc. degree from RWTH Aachen University in 2010, and Ph. D. degree from Aalto University in 2015, respectively. Now he is an associate researcher in Southwest Petroleum University. His main research interest includes process system engineering.