

基于电容传感器式油含水率测量系统的设计

刘静, 王艳菊, 边晓娜

(河北师范大学, 河北石家庄 050016)

摘要: 针对我国原油生产特点, 提出基于电容式敏感元件的油含水率新型智能化测量系统, 实施了 C/U 转换、U/f 转换电路及温度补偿设计。实验结果表明, 系统能够准确地以全量程线性化刻度(0%~100%)显示。

关键词: 原油含水率; 测量系统; 电容传感器; 转换电路; 温度补偿

Design on System for Measuring Water Content Based on Capacitance Sensor

Liu Jing Wang Yanju Bian Xiaona

(HeBei Normal University, Shijiazhuang, 050016)

Abstract: Aiming at the characteristic of crude oil production in our country, a new type intelligent system for measuring water content based capacitance sensor is proposed. In the system, C/U convert circuit, U/f convert circuit and temperature compensating designing have been put in practice. The experimental results show that the system can display precisely with linearity scale in the full scale.

Keywords: Water content of crude oil; Measuring system; Capacitance sensor; Convert circuit; Temperature compensating

中图分类号: TP212 文献标识码: A

1. 引言

在油田勘探、原油生产过程中, 为了实时确定各油井的原油和天然气产量, 油含水率的测量一直是最基本和重要的问题。目前国内测量油多相流体含水率的方法主要是传统的定时取样和蒸馏(破乳)化验方法。由于取样周期长, 在含水率变化较快时, 定时取样难以实时准确地测量出实际的含水率。根据我国原油生产的特点, 本课题基于插入电容测量原理设计的原油含水率在线测量系统, 采用灵巧的自均流电容传感器, 将含水率的变化转换为电容变化, 经过 C/U、U/f 转换和温度补偿设计, 送到计算机进行数据处理以实现原油的实时监控测量。系统在 0~100% 含水率测量范围内具有高精度、高稳定性能。

2. 电容传感器的设计

传感器的设计使非电量的检测输入即油含水率信号转换为电信号。传统观点认为, 用电容传感器作含水率测量元件, 在低含水率时有良好的工作特性, 当含水率超过 30%~50% 时, 由于大量导电离子构成两电容极板间的导体, 从而失去对含水率的分辨能力。该仪器作了结构改进与设计, 使含水率测量范围达到 100%。灵巧型敏感探头采用圆柱型同心套筒结构, 外管径为 40mm, 内管径为 20mm, 电容的内电极涂敷钛氟纶绝缘层, 保证绝缘强度大于 200MΩ/500V, 涂层厚度为 50μm 且均匀, 表面光滑, 无针眼, 消除含水导电效应, 具有均衡的机械性能和极好的尺寸稳定性; 在电容的外电极板上有规律地开一定数量的圆孔, 以保证工作时有自均流作用。

设圆柱型电容的中心电极半径为 r , 内电极涂敷的绝缘层厚度为 δ , 绝缘材料相对介电常数为 ε_i , 传感器外电极半径为 R , 电极长度为 h , 原油混合液相对介电常数为 ε_m 。由同轴柱状电容器电容计算公式, 可得绝缘层和混合液对应的电容 C_i 、 C_m 分别为

$$C_i = \frac{2\pi\varepsilon_i h}{\ln\left[\frac{r+\delta}{r}\right]} \quad C_m = \frac{2\pi\varepsilon_m h}{\ln\left[\frac{R}{r+\delta}\right]} \quad (1)$$

探头的电容传感器 C_x 可视为 C_i 、 C_m 的串联

$$C_x = \frac{C_i C_m}{C_i + C_m} = \frac{2\pi\epsilon_i \epsilon_m h}{\epsilon_i \ln\left[\frac{R}{r+\delta}\right] + \epsilon_m \ln\left[\frac{r+\delta}{r}\right]} \quad (2)$$

原油混合液相对介电常数为油、水、气三相流体相对介电常数之和

$$\epsilon_m = a_o \epsilon_o + a_w \epsilon_w + a_g \epsilon_g \quad (3)$$

式中 a_o 、 a_w 、 a_g ——为油、水、气相的比率

ϵ_o 、 ϵ_w 、 ϵ_g ——为油、水、气的相函数

根据高斯定理，忽略传感器边缘效应；同时，考虑到涂层较薄，内电极涂敷的绝缘层厚度 δ 的影响几乎可以忽略，因此可化简为

$$C_x = K_0 \epsilon_m \quad (4)$$

式中 $K_0 = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$ 为仪器系数。

由式(4)可以看出，电容器的容量是其介电常数的单值函数。根据这一原理，可将被测介质的介电常数变化值转换成相应的电容量输出，只要正确标定出 C_x 与 ϵ_m 的关系，就可以根据所测得的电容值和相关的公式，换算出油、气、水的各相比率。

3. 转换电路

本系统设计的经济简捷式电容传感器测量 C/U 转换电路为三级集成运放构成，包括：正弦信号产生电路、缓冲电路和转换电路。其中文氏桥振荡器是转换电路的正弦波信号源。转换电路的集成运放处于线性工作状态，其输入是幅度及频率恒定的正弦信号 U_i ， C 为固定电容， C_x 为传感器电容。有

$$U_0 = \frac{C}{C_x} U_i \quad (5)$$

用 U/f 转换器代替普通的 A/D 转换器，具有良好的精度、线性度和积分输入特性，还可大大简化输入通道，故本系统采用精密集成 LM331U/f 转换电路，其线性误差小于 0.01%，实现模拟电压 0~10kHz 的频率转换，且外接元件较少，线路简单。

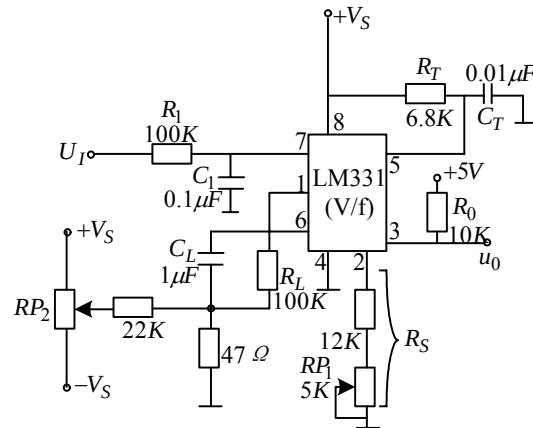


图 1 U/f 转换电路 (10V-10KHz)

如图 1 所示 U/f 转换电路，通过调节 RP_1 来改变 R_s ，使变换系数为 1 kHz/V；调节 RP_2 可以修正输入失调，起到调零的作用；输入端加有电阻 R_1 ，减小输入失调电流，同时和 C_1 组成低通滤波以减小输入电压突变的影响；脚 3 外接到 +5V 的逻辑电源，便于与后面的数字电路连接。

系统 U/f 转换电路输出与输入的关系为

$$f_0 = \frac{R_s U_I}{2.09 R_T R_L C_T} \quad (6)$$

式中 U_I 为输入模拟电压， f_0 为输出频率，可得出输出频率与输入模拟电压大小成正比。 R_s 、 R_L 、 R_T 、 C_T 为外接电阻、电容，为保证转换精度和一定的温度补偿， C_L 、 C_T 应采用低介质损耗的电容， R_T 、 R_L 、 R_s 应采用低温度系数的电阻。

4. 温度补偿电路

本系统的温度转换电路采用带运算放大器的热敏电阻电桥电路，这种电路的最大优点是输出电压对地可为零。

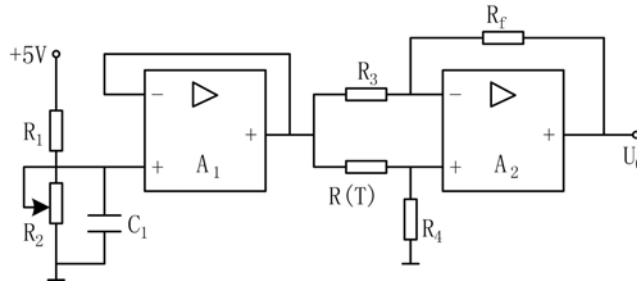


图 2 T/U 转换电路

由图 2 可推出电路方程为

$$U_0(T) = U_I \frac{R_3 R_4 - R_f R(T)}{R_3 [R_4 + R(T)]} \quad (7)$$

其中 $R(T)$ 为热敏电阻，需要进行线性化电路参数设计。

根据热敏电阻的特性方程 $R_T = R_{T_0} \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$ ，为计算方便，先对热敏电阻方

程和电路方程进行归一化处理，令： $x = \frac{T}{T_0}$ $b = \frac{B}{T_0}$ $r_0 = \frac{R_{T_0}}{R_4}$

则得归一化热敏电阻方程 $r(x) = \frac{R(x)}{R_4} = r_0 \exp b \left(\frac{1}{x} - 1 \right)$ (8)

在电路方程(7)中，令 $k(x) = \frac{U(x)}{U_I}$ $\alpha = \frac{R_3}{R_f}$

$$\text{则得归一化电路方程 } k(x) = \frac{\alpha - r(x)}{\alpha[1 + r(x)]} \quad (9)$$

设平衡温度为 T_0 ，即 $x=1$ ，将归一化电路方程在平衡点进行泰勒展开

$$k(x) = k_0 + k_1(x-1) + k_2(x-1)^2 + k_3(x-1)^3 + \Delta$$

并可求得各展开系数为

$$k_0 = \frac{\alpha - r_0}{\alpha(1 + r_0)} \quad , \quad k_1 = \frac{br_0(1 + \alpha)}{\alpha(1 + r_0)^2} \quad , \quad k_2 = \frac{k_1}{2} \cdot \frac{br_0 - 2r_0 - b - 2}{1 + r_0} \quad ,$$

$$k_3 = k_1 \left[\frac{b^2}{6} \cdot \frac{1 - 4r_0 + r_0^2}{(1 + r_0)^2} + b \frac{1 - r_0}{1 + r_0} + 1 \right]$$

根据最佳线性化条件令平衡点的二阶导数为零，同时忽略三阶以上导数，即 $k_2=0$ 可得

$$r_0 = \frac{b+2}{b-2} \quad R_4 = R_{T_0} \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0}$$

若设计温度输入范围为 $-50^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ ，取 $T_0 = 0 + 273(\text{K})$ 并要求在 0°C 时输出电压为 100mV ，

则 $k_0 = \frac{0.1}{U_I}$ ；在 $+50^\circ\text{C}$ 最大输出为 200mV ；在 -50°C 时输出电压为 0mV 。最大相对线性误差

$D = 0.1$ 。则电路在最佳线性化条件下的电路参数值如下：

$$T_0 = 0 + 273(\text{K}) \quad , \quad x_{\max} = \frac{273 + 50}{273} = 1.183 \quad , \quad x_{\min} = \frac{273 - 50}{273} = 0.817$$

$$\text{由 } D = \left| \frac{k(x) - k_1(x-1)}{k_1(x-1)} \right| = \left| \frac{k_3}{k_1} \right| (x-1)^2 = \frac{b^2}{12} (x_{\max} - 1)^2 \leq 0.1 \quad , \quad \text{则 } b \approx 6$$

且 $B = 1638\text{K}$ ， $r_0 = 2$ ， $\alpha = 10.19$ ；取 $R_{T_0} = 6.5\text{K}\Omega$ ，则 $R_4 = 3.25\text{K}\Omega$ ，

选取 $R_f = 1\text{K}\Omega$ ，则 $R_3 = 10.19\text{K}\Omega$ ， $U_I = 373.26\text{mV}$ ，取 $R_1 = 2\text{K}\Omega$ ， $R_2 = 161\text{K}\Omega$ 。

由此可得 $k_0 = 0.2679$ $k_1 = 1.4642$ $k_3 = -4.3926$

此时电路可实现

$$U_0(x) = U_I [k_0 + k_1(x-1) + k_3(x-1)^3] = 0.1 + 0.5465(x-1) - 1.6396(x-1)^3 (\text{V})$$

温度与输出电压的线性化方程为

$$U_0(T) = 100 + 2.0018(T - T_0) - 0.8 \times 10^{-4} (T - T_0)^3 (\text{mV})$$

$$U_0(T) = 100 + 2.0018(T - T_0) \quad (10)$$

将电容传感器转换电路输出的电压量和温度补偿输出电压送微机进行数据处理，即可实现油液含水量的数字显示及实施监测。

5. 实验结果

在实验室条件下进行灵巧探头的性能实验，通过改变 C_x 观测 V_0 波形并记录电压读数，对 $30 \sim 500\text{pF}$ 的电容进行了实测，实验结果如表 1 所示。

表 1 探头电容与传感器的输出电压

$C_x(pF)$	30	50	68	82	100	150	220	300	370	500
$V_0(V)$	0.030	0.432	0.816	1.110	1.474	2.500	3.920	5.572	6.742	9.000

实验结果显示,所设计的电容传感器探头,能够准确的以全量程线性化刻度(0%~100%)正常显示,但在工业现场应用时,探头的测量精度还应考虑管道介质的组分、运行参数、运动状态的变化以及外界环境等的影响。

6. 结束语

本课题的创新点是采用了插入式自均流电容传感器设计,使含水率测量范围由 30%~50%达到 100%;应用微电子技术进行转换电路和温度补偿设计,实现了数字智能化。系统具有低成本、高精度、高稳定性等特点,其准确地实时在线检测,能够改变测量方法上原始而落后的现状,有着良好的应用前景。

参考文献:

[1] 刘春涛,陈祥光,李兵 多传感器信息融合技术在原油含水率检测中的应用,微计算机信息 2006 年第 4-1 期

[2] Lotters J C,Olthuis W,Veltink P H,*et al.*A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications[J].IEEE Trans Instrum Meas,1999,48(1):89-96

[3] 王玉田,李 翔等 一种新型三相流测量系统的研制,传感器技术 2001 年第 20 卷第 10 期
作者简介:

刘静(1962,9__)女,天津人,硕士学位,副教授,从事检测技术与教学工作。

Biography: Liu Jing (1962-), female(the Han nationality), native place : Tianjin, an associate professor of HeBei Normal University, Master Degree, Her teaching and research interests are in the fields of measurement technology and instrument.