

文章编号: 1006-4710(2011)04-0471-06

# 低功耗两线制电容式液位变送器的研制

陈海侠, 高宗海, 申阿维, 赖化凤

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对电容式液位传感器电容量较小引起的输出阻抗高、负载能力差、信号处理困难的缺点, 基于电容充放电原理电路实现微电容测量, 进而设计了基于 MSP430 单片机的两线制电容式液位变送器。合理利用了超低功耗的 16 位单片机 MSP430 内部的比较器、计数器和 D/A 转换器, 输出信号经 V/I 电路转换为 4~20 mA 电流, 两线制变送输出。整个系统全部选用低功耗芯片, 以保证变送器静态工作电流低于 4 mA。采用驱动电缆技术, 有效屏蔽测量电路及电缆带来的分布电容的干扰。试验结果表明, 在 0~700 mm 范围内, 液位变送器的测量精度可以达到 6‰。系统可实现两线制, 且功耗低, 稳定可靠。

**关键词:** 电容测量; 低功耗; 两线制; 屏蔽电缆

**中图分类号:** TP212.6      **文献标志码:** A

## Development of a Low-Power Two-Wire Capacitive Liquid Level Transmitter

CHEN Haixia, GAO Zonghai, SHEN Awei, LAI Huafeng

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** With an aim at overcoming the disadvantages of high output impedance, poor load capacity and signal process difficulties caused by the small capacitance of capacitive liquid level transmitter, a low-power two-line capacitive liquid level transmitter based on microcontroller MSP430 is designed. The comparator and D/A converter inside the low-power 16-bit microcontroller MSP430 are rationally used to convert the output signal into 4~20 mA current transmitted by a two-wire way. The whole system adopts low-power chips so as to ensure that the transmitter can work properly with the static current less than 4 mA. Driven cable technology is also used effectively to shield the interference caused by distributed capacitance brought about by the measuring circuit and the cable. The results show that the transmitter can achieve a precision for liquid level measurement of 6‰ within 700 mm and that the whole system can realize two-wire system with low-power consumption, stability and reliability.

**Key words:** measurement of capacitance; low-power consumption; two-wire system; shield cable

电容式液位传感器具有灵敏性好、输出电压高、误差小和动态响应好等特点, 适用于具有腐蚀性和高压介质的液位测量<sup>[1]</sup>。

先进的电容式液位测量仪表的普遍特点是测量精度高、自动化程度高, 具有 4~20 mA 电流输出, 采用 HART 协议、Honeywell 协议等智能通讯协议, 实现从主控室到现场仪表的组态和维护<sup>[2]</sup>。

当前国内外的研究重点是改进传统的电容式传

感器结构及测量方法, 如文献[3-6]提到的多电极结构、非接触测量等等, 测量精度比较高, 但同时也增加了设计的复杂度和成本。而制约传统的电容式液位变送器发展的因素主要有: ①电容式传感器本身结构特性决定其输出阻抗高, 负载能力差, 易受外界干扰; ②电容式液位测量的信号处理较困难。

电容式液位传感器所测电容非常微小, 而传感器的引线电缆电容、测量电路的杂散电容以及传感

收稿日期: 2011-07-27

基金项目: 陕西省教育厅科学研究基金资助项目(08JC07)。

作者简介: 陈海侠(1985-), 女, 安徽宿州人, 硕士生, 研究方向为现代科学仪器与传感器技术。E-mail: chx0722@126.com。高宗海(1958-), 男, 陕西白水人, 教授, 研究方向为现代科学仪器与传感器技术。E-mail: gaozh@xaut.edu.cn。

器极板与周围导体构成的电容等使寄生电容较大<sup>[7]</sup>,给实现精确的电容信号转换带来困难。因此,对电容的精准测量是电容式液位传感器实现高精度检测的关键。同时,考虑到主控室离工业现场一般距离较远,采取 DC24V(4~20)mA 的环路供电,两线制变送。这种方式可以提高被测信号的远传能力,大大节省测量设备成本。

针对上述传统电容式液位传感器的缺点,本文采用了一种基于电容充放电原理测量微小电容的方法,设计了基于 MSP430 单片机的两线制电容式液位变送器,结构简单,成本较低,可满足低功耗、高精度的测量要求。

## 1 电容式液位传感器的工作原理

图1是电容式液位传感器的工作原理及等效电路图。传感器敏感元件是相互绝缘的两个同心金属圆柱,它们作为电容的两个极板,金属内电极外敷聚四氟乙烯绝缘层,外电极内直径为  $D$ ,内电极的外直径和绝缘层直径分别为  $d$  和  $D_1$ ;两电极间的介质为空气、溶液和绝缘层,相对介电常数分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ ,绝对介电常数  $\varepsilon_0$  约为  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m;  $H_1$  是液面的高度,  $H_0$  是总高度。

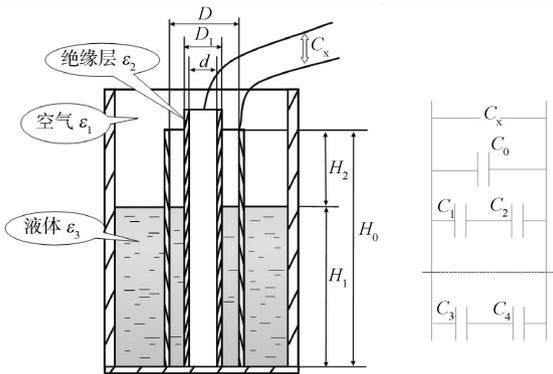


图1 电容式液位传感器工作原理图及等效电路图

Fig.1 Working schematic diagram and equivalent circuit of capacitive liquid level sensor

忽略边缘效应,传感器的电容量与被测液位的关系<sup>[8]</sup>为:

$$C_x = C_0 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} \quad (1)$$

式中:

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_0H_2}{\ln \frac{D}{D_1}}, \quad C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_2\varepsilon_0H_2}{\ln \frac{D}{D_1}}$$

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_3\varepsilon_0H_1}{\ln \frac{D}{D_1}}, \quad C_4 = \frac{2\pi\varepsilon_2\varepsilon_0H_1}{\ln \frac{D}{D_1}}$$

代入式(1),整理得:

$$C_x = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_2 \ln \frac{D}{D_1} + \varepsilon_1 \ln \frac{D_1}{d}} H_0 + \left( \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_2\varepsilon_3}{\varepsilon_2 \ln \frac{D}{D_1} + \varepsilon_3 \ln \frac{D_1}{d}} - \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_2 \ln \frac{D}{D_1} + \varepsilon_1 \ln \frac{D_1}{d}} \right) H_1 \quad (2)$$

由式(2)可知,当待测溶液的介电常数  $\varepsilon_2$  固定不变时,电容式液位传感器的电容量与被测液位成线性关系。通过测量传感器的电容  $C_x$ ,就可以得到液位值  $H_1$ 。

## 2 电容测量原理

本系统中所使用的电容式液位传感器的本体电容约为 78 pF。满液位时,总电容量约为 283 pF。为了达到一定的精度,测量电容的变化量需要在 0.5 pF 以下。根据这些特点,并对电容式液位传感器的测量电路进行分析研究,提出了一种基于充放电原理的新的电容测量电路方法。

电容充电公式为:

$$U_c = V_{ref} [1 - e^{-t/(RC)}] \quad (3)$$

式中,  $V_{ref}$  为电容充电电压,  $U_c$  为比较器的翻转电压,  $R$ 、 $C$  分别是充电电阻和电容。由式(3)可得:

$$C = -\frac{1}{R \ln(1 - U_c/V_{ref})} t \quad (4)$$

即  $V_{ref}$ 、 $R$ 、 $U_c$  一定时,电容充电电容值与时间成线性关系。因此,只要确定  $V_{ref}$ 、 $R$  和  $U_c$  的值,再精确测出电容充电时间即可求出电容值。

电容测量原理如图2所示。

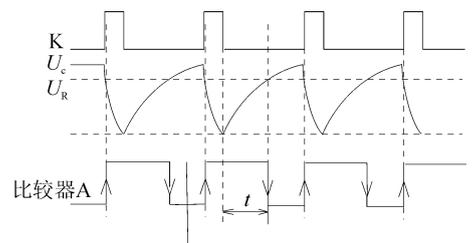
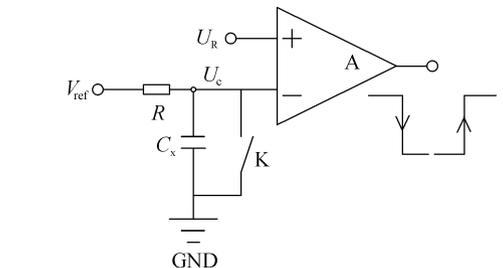


图2 电容测量原理图

Fig.2 Capacitance measurement schematic diagram

图2中  $U_R$  为参考电压,基准电压  $V_{ref}$ 、充电电

阻  $R$  及充电电容  $C$  和开关  $K$  构成电容的充放电回路。保证  $V_{ref} > U_R$  的情况下,  $K$  闭合, 电容  $C$  放电, 当  $U_c$  小于  $U_R$  时, 比较器  $A$  输出低电平;  $K$  断开, 电容  $C$  充电, 当  $U_c$  增大到  $U_R$  时, 比较器  $A$  输出高电平。将比较器输出的上升沿和下降沿用于驱动计数器计数, 可以得出电容的充电时间  $t$ , 将  $t$  代入式(4) 即可得到待测的电容  $C$ 。

### 3 硬件系统低功耗设计

系统整体硬件框图如图 3 所示, 框图内部是电容测量及数据处理部分。



图 3 变送器系统硬件框图

Fig. 3 Transmitter system hardware block diagram

对电容的测量充分利用了 MSP430 单片机内部的资源, 即参考电压、比较器、定时/计数器以及 D/A 转换器等, 使得电路结构相当紧凑。D/A 转换的信号经 V/I 转换电路以电流形式输出。电源转换模块将 24 V 转换为 3.45 V 输出, 使用反相器输出负电压, 满足单片机及其他芯片的供电需求。变送器在电路中相当于一个特殊的负载, 特殊之处在于变送器的耗电电流(在 4 ~ 20 mA 之间) 根据传感器输出而变化, 显示仪表只需要串在电路中即可。这种变送器只需外接 2 根线, 因而被称为两线制变送器。由于整个系统使用两线制 DC24V (4 ~ 20) mA 的环路供电, 所使用芯片均为低功耗芯片, 同时能够满足系统响应速度要求。

#### 3.1 单片机控制模块

单片机选用 MSP430 系列, 它是 TI 公司推出的 16 位超低功耗的单片机。在低功耗方面, 它具有 5 种工作模式, 而且各种低功耗工作模式和活动模式之间可快速有指令进行切换; 可由 3.3V DC 锂电池供电; 在非活动状态进入低功耗模式 3 (LMP3) 的休眠状态, 此时电流仅有 0.7  $\mu$ A; 当外部中断时, 唤醒休眠状态进入活动状态仅需 6  $\mu$ s。

本系统采用 MSP430F1611, 内部带有定时/计数器、模拟比较器、D/A 转换器等。

#### 3.2 电源转换模块

一个稳定可靠的电源是一个系统的强有力的支

柱。电源设计得好坏直接影响到系统的稳定性。由于变送器采用二线制 DC24V 环路供电, 单片机需 1.8 ~ 3.6 V 供电, 模拟开关 4066 需 -0.5 ~ 7.0 V, 运放芯片 LMV324 需正负双电源  $\pm$ (2.5 ~ 15) V 供电。为减少电路损耗, 降低功耗, 使用电压转换芯片 TPS715345, 将 24 V 电压输入转换为 3.45 V 电压输出。电压转换电路如图 4 所示。

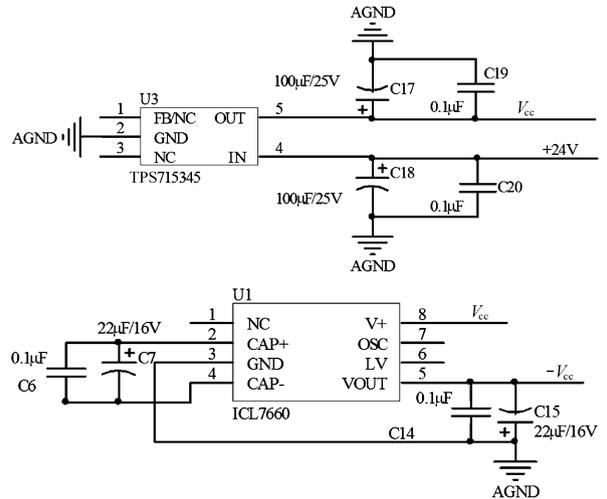


图 4 电源转换电路

Fig. 4 Power conversion circuit

#### 3.3 V/I 转换模块

图 5 中, V/I 转换电路由一片通用运放 LMV324 内部的两个运放和一个三极管及部分电阻构成。

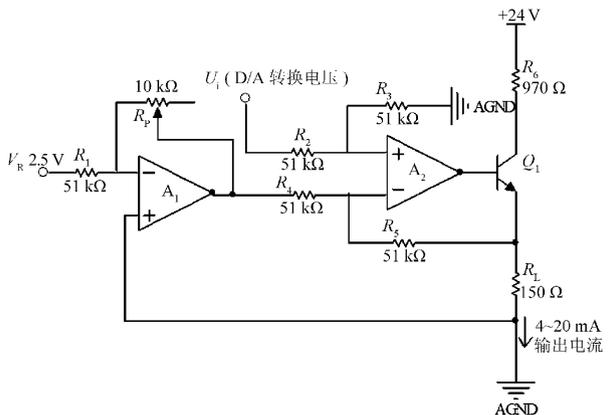


图 5 V/I 转换电路

Fig. 5 V/I conversion circuit

$U_i$  为 D/A 转换得到的电压值, 运放  $A_1$  及电阻  $R_1$  和  $R_p$  构成反向放大电路,  $U_{o1} = -\frac{R_p}{R_1} V_R$  为  $U_i$  的补偿电压。运放  $A_2$  及电阻  $R_2, R_3, R_4, R_5$  构成减法电路, 输出电压  $U_0$  的表达式为:

$$U_0 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) U_i - \frac{R_5}{R_4} U_{o1} \quad (5)$$

令  $R_2 = R_3, R_4 = R_5$ , 则  $U_0 = U_i - U_{01} = U_i + \frac{R_p}{R_1} V_R$ 。

在输出回路中, 选用  $\beta$  值较高、穿透电流小的三极管 9014, 集电极电源主要用作扩流, 使晶体管的集电结反向偏置, 以保证晶体管工作在放大状态。因运放输出级存在饱和压降, 故供电电压应比最大输出电压高 1 ~ 2 V, 以保持输入输出的线性关系, 这是集电极电源应取较大值的另一个原因。

当  $U_i = 0$  时, 输出电流  $I$  为电路的静态工作电流, 适当调节  $R_p$ , 将输出调至 4 mA; 当  $U_i$  输入最大时, 用软件将输出电流调至 20 mA, 即完成了电路的调零及满度调整。

### 3.4 双层屏蔽电缆电路

由于电容式液位传感器自身电容比较小, 所以传感器和控制电路的连接电缆产生的分布电容, 线路的杂散电容以及传感器的内极与周围导体构成的电容等影响很大; 同时, 更换电缆线时需对变送器输出值重新标定。

为减小寄生电容的影响和消除更换电缆重新标定变送器的不便, 本系统采用图 6 中的双层屏蔽电缆电路。连接电缆采用内外双层屏蔽, 使引线与内屏蔽的导线电位相同, 这样引线与内屏蔽之间的电缆电容将不起作用, 外屏蔽仍接地而起屏蔽作用。外屏蔽层接大地(或传感器地)用来防止外界电场的干扰。内外屏蔽层之间的电容是 1:1 放大器的负载。本系统采用低电压轨至轨输出运算放大器芯片 LMV324, 满足“驱动电缆”技术对 1:1 放大器的要求。

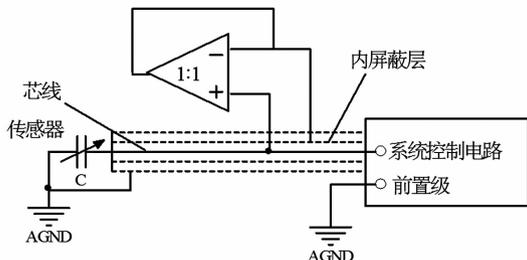


图 6 双层屏蔽电缆电路图

Fig. 6 Double shield cable schematic diagram

## 4 电容测量电路

实际测量时, 由于单片机选用低功耗的 MSP430 系列, 内部有 2.5 V 参考电压源输出(增加一级跟随器以增大电流的驱动能力), 可作为电容的充电电压  $V_{ref}$ 。

理论上, 当充电电阻一定, 电容上的电压最大值

$U_{cmax} = V_{ref}$ 。取  $R = 1 \text{ M}\Omega$ , 实验测得  $U_{cmax} = 2.05 \text{ V}$ , 小于理论充电电压, 因此实际选取  $U_c$  应小于或等于 2.05 V。

本系统预使用的电容式液位传感器的电容值范围为 50 pF ~ 3 nF, 测最大电容 3 nF 时, 软件设定采样频率为 300 Hz, 考虑 CPU 处理数据和 D/A 输出时间, 估算最大充电时间  $t$  约为 1.8 ms,  $R$  取经验值 510 k $\Omega$ , 根据式(3),  $U_c$  取 1.8 V。

图 7 中, 基准电压 2.5 V 由 MSP430 单片机内部参考电压提供, 经电阻分压后可调至 1.8 V, 输入到比较器正相输入端, 电容器充电电压  $U_c$  输入到比较器反相输入端,  $R$  和  $C$  组成一个充电回路。

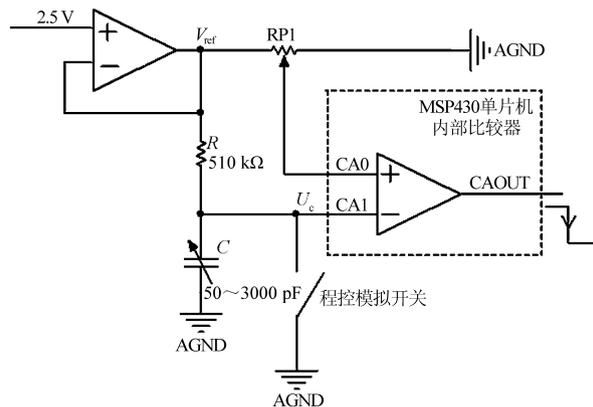


图 7 电容测量电路

Fig. 7 Capacitance measurement circuit

模拟开关选用低功耗的 74HC4066, 由单片机中断控制打开与闭合。当  $U_c < 1.8 \text{ V}$  时, 比较器输出检测到高电平; 当  $U_c > 1.8 \text{ V}$  时, 比较器输出检测到低电平。单片机检测比较器的输出端信号, 从而控制模拟开关的通断。电容充电时间  $t$  通过 MSP430 单片机的计数器完成:

1) 上电后单片机控制模拟开关闭合, 对电容器放电, 为第一次检测做准备。

2) 电容器放电完毕后, 单片机控制模拟开关断开, 电容器通过电阻  $R$  开始充电, 同时计数器计数开始。

3) 检测比较器输出端, 当输出出现下降沿时, 立即读取计数值, 同时将模拟开关闭合, 使电容器放电, 继续下一次测量。

4) 连续测量数次取平均值作为电容充电时间的计数值, 根据计数周期计算出时间  $t$ , 由公式(4)可得电容值。

## 5 软件设计流程

软件流程如图 8 所示。系统初始化包括看门

狗、I/O 口、内部参考电压、系统时钟、内部比较器的设置、比较器下降沿触发中断等。

软件设计上出于低功耗的考虑做了以下工作：充分利用 MSP430 单片机的各个工作模式特点，进行合理的切换。系统的功耗正比于 CPU 的工作时间，所以软件设计时设法缩短 CPU 的运行时间；给 CPU 运行设置较低主时钟频率，而计数器选择高频模式等。

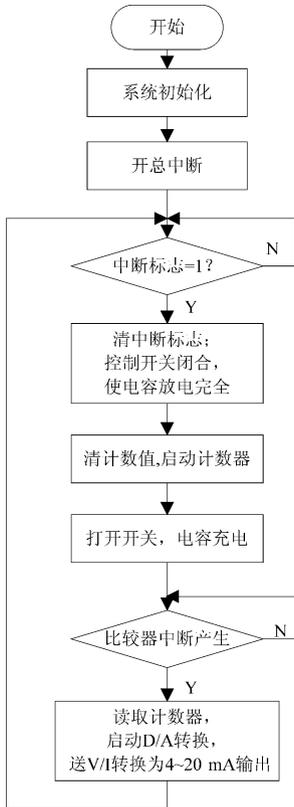


图 8 系统软件流程图  
Fig. 8 System software flat chart

## 6 实验及结果分析

本系统根据实际环境需要设计了同轴圆柱型电容式液位传感器，结构参数为外电极内径 20 mm，内电极外径 8 mm，聚四氟乙烯内径 8 mm、外径 10 mm，外电极中部打有进水小孔，直径 4 mm。

实验分为两部分，在实验室环境，室温 20℃ 条件下测量。首先对传感器用阻抗分析仪（型号 WAYNEKERR6500B，精度 0.5‰）进行了标定试验，实验数据见表 1。计算液位为电容值与液位高度之间进行最小二乘拟合的结果。在液位不同高度处，测量变送器输出的电流值，进行最小二乘线性拟合得出液位的计算值，计算出偏差。

液位高度用精度为 1‰FS、绝对误差为 ±1 mm 的卷尺标定，电流用 WAYNEKERR6500B 阻抗分析

仪和标准电阻（型号 HF19-BZ3，精度 0.1‰）进行测量。仪器综合标准误差为 1.2‰。数据见表 2。

表 1 传感器标定实验数据

Tab. 1 Result of sensor calibration

电容值/ pF	实测液位/ mm	计算液位/ mm	偏差值/ mm
78.102	0.0	-1.481	-1.481
108.032	100.0	100.948	0.948
137.201	200.0	200.773	0.773
166.013	300.0	299.376	-0.624
196.062	400.0	402.213	2.213
224.253	500.0	498.691	-1.309
253.645	600.0	599.279	-0.721
283.121	700.0	700.155	0.155

表 2 液位变送器测量实验结果

Tab. 2 Measurement result of the liquid level transmitter

电流值/ mA	实测液位/ mm	计算液位/ mm	偏差值/ mm
4.002	0.0	-1.002	-1.002
6.342	100.0	101.583	1.583
8.615	200.0	201.232	1.232
10.921	300.0	302.327	2.327
13.053	400.0	395.794	-4.206
15.342	500.0	496.143	-3.857
17.782	600.0	603.113	3.113
20.012	700.0	701.876	1.876

从表 1 可看出，本系统所设计的传感器具有较好的线性度和测量精度，0 ~ 700 mm 范围内最大偏差值 2.213 mm；从表 2 可看出，在 0 ~ 700 mm 范围内，液位变送器的最大偏差值为 4.206 mm，精度达到 6‰。

为了排除电容传感器本身加工精度的影响，对程序做相应修改，选择固定电容对变送器部分进行标定，实验数据见表 3。

表 3 变送器标定实验结果

Tab. 3 Measurement result of transmitter calibration

电容值/ pF	测量电 流值/ mA	拟合电 流值/ mA	偏差值/ mA
21.788	3.998	3.975	-0.023
41.434	4.306	4.301	-0.005
47.572	4.409	4.403	-0.006
48.652	4.421	4.421	0
51.399	4.429	4.466	0.037
64.443	4.637	4.683	0.046
101.781	5.329	5.303	-0.026
217.127	7.260	7.218	-0.042
470.667	11.372	11.426	0.054
508.324	12.007	12.051	0.044
987.962	19.996	20.013	0.017

用 WAYNEKERR6500B 阻抗分析仪对常用固定电容进行测量,将结果作为实际电容值,用变送器部分电路将信号转换,电路回地电流见表 3,经过线性拟合,线性度约 3‰,说明变送电路部分的精度满足设计要求,从而推证,电容传感器部分的加工制作精度对整个液位变送器的精度影响是不可忽略的。如果对这部分进行精加工,将显著提高整个系统的精度。

## 7 结 语

本文针对传统电容式液位传感器的缺点,基于电容充放电原理电路实现微电容精准测量,设计了基于 MSP430 单片机的两线制电容式液位变送器。应用电容充放电公式测量电容式液位传感器电容值的方法,使液位变送器的测量电路大大简化,测量精度大大提高。由于采用 DC24V(4~20) mA 的环路供电,即要求整个系统的静态工作电流低于 4 mA。采用了一系列措施,比如硬件上选用低功耗芯片,合理利用芯片资源;软件上设置 CPU 工作在合适的低功耗模式等。该变送器对液位的测量范围为 0~700 mm,最大偏差值为 4.206 mm,精度达到 6‰。本系统为低功耗两线制变送器的设计方法做了一次探究,不足之处在于未修正传感器的结构误差导致变送器的精度不够高,下一步的研究重点将集中在提高系统测量精度上。

## 参考文献:

- [1] 安宗权,冷护基,林宗良. 储罐液位检测技术的现状与展望[J]. 芜湖职业技术学院学报,2005,7(4):9-10.  
An Zongquan, Leng Huji, Lin Zongliang. Review and prospect on the measurement technology of liquid level[J].
- Journal of Wuhu Vocational Technical College, 2005, 7(4):9-10.
- [2] 冯斌. 一种与介质无关的电容式液位测量方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.  
Feng Bin. Study on a Medium-Independent Capacitive Liquid-Level Measurement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [3] Toth F N, Meijer G C M, Vander Lee M. A new capacitive precision liquid-level sensor[J]. Precision Electromagnetic Measurements Digest, 1996, 38:356-357.
- [4] Lu Guirong, Chen Shuyue. A capacitive liquid level sensor with four electrodes[J]. IEEE Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, 37(4):628-632.
- [5] Seliskar D P, Waterbury R G, Kearney R E. Proportional Microvolume Capacitive Liquid Level Sensor Array: IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, Shanghai, China[C]. Shanghai, 2005:7258-7261.
- [6] Khan S, Khalifa, Htike K K, et al. A Non-Contact Capacitance Type Level Transducer for Liquid Characterization; Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, May 13-15, 2008, Kuala Lumpur, Malaysia [C]. Kuala Lumpur, 2008:1264-1269.
- [7] 赵珍强. 基于 MSP430 的低功耗两线制流量变送器[J]. 微计算机信息, 2008, 24(11-2):116-117.  
Zhao Zhenqiang. A low-power two-line flowmeter based on MSP430[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(11-2):116-117.
- [8] 唐正茂. 基于 CAV424 的电容式液位传感器信号调理电路研究[J]. 计量技术, 2008, (1):10-13.  
Tang Zhengmao. Signal conditioning circuit of capacitance level transducer based on CAV424[J]. Measurement Technique, 2008, (1):10-13.

(责任编辑 王卫勋)