【电子与信息科学 / Electronics and Information Science】

基于电容感测的盐水质量分数测量

黄 健

西京学院信息工程学院, 陕西西安 710123

摘 要: 采用基于电容式的传感技术, 通过检测寄生电容容量的变化, 实现准确检测盐水质量分数. 将长条形金属薄片插入盐水中, 当盐水质量分数发生变化时, 金属薄片上的寄生电容会发生相应的变化. 数字式的高精度电容感测传感器能够感知这种微弱变化, 并将其转换为 28 bit 的二进制数数字量输出, 再通过集成电路总线 (inter-integrated circuit, IIC) 接口传输到高性能微处理器 STM32H743IIT6 进行采集和处理. 用桥式压力传感器制作的电子秤测量盐水质量, 用串口超声波测距模块测量盐水液位高度. 采用多传感器数据融合方法, 计算得到准确的盐水质量分数. 实验结果表明, 该方法检测盐水分数的精度可达 0.1%.

关键词: 电子技术; 电子电路; 仪器仪表技术; 传感器技术; 盐水质量分数测量; 电容感测; 桥式压力传感器; 超声波测距

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.01092

Brine mass fraction measurement based on capacitance sensing

HUANG Jian

School of Information Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, Shaanxi Province, P. R. China

Abstract: In order to accurately detect the mass fraction of brine, we design a new type of brine mass fraction measuring instrument. In this instrument, the capacitive sensing technology is adopted to detect the change of parasitic capacitance on the metal sheet. The digital high-precision capacitance sensor can sense this weak change and convert it to 28 bits binary digital output. The data is transmitted to the high performance microprocessor STM32H743IIT6 through the interface of integrated circuit (IIC) for acquisition and processing. The quality of brine is measured by the electronic scale made of bridge pressure sensor, and the height of brine level is measured by the serial port ultrasonic ranging module. The accurate brine mass fraction is calculated by using the multi-sensor data fusion method. The experimental results show that the method can detect the brine mass fraction with an accuracy of 0.1%.

Key words: electronic technology; electronic circuit; instrument technology; sensor technology; brine mass fraction measurement; capacitance sensing; bridge pressure sensor; ultrasonic ranging

盐水浓度检测在水资源保护、食品加工、医疗卫生等方面有广泛应用. 常用的测量方法有比重计

法和天平法等, 近年来也出现了其他电子测量方法, 如杨璇等^[1]采用超声波测量乙醇溶液密度, 对

Received: 2019-11-20; Accepted: 2020-01-21; Online: 2020-10-07

Foundation: Scientific and Technological Plan Projects of Shaanxi Province (2016GY141)

Corresponding author: Associate professor HUANG Jian. E-mail: 565200245@qq.com

Citation: HUANG Jian. Brine mass fraction measurement based on capacitance sensing [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 92-97. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

回波信号进行数据拟合分析, 测量乙醇溶液密度; 吴黎杰等^[2]以声速测量为基础, 用曲面拟合算法测量盐水质量分数; 张述仁等^[3]用超声波测量液体中的悬移物质的质量分数, 并用蚁群算法进行了反演, 测量误差最小达到10%。但是, 这些方法均基于超声波进行测量, 方法单一, 且测量精度不高^[4-7], 如文献[1]的测量精度达到1.2%, 文献[2]的测量误差大于0.1%。同时, 算法需对大量数据进行建模分析, 算法复杂度较高, 可靠性有待进一步验证。为此, 本研究提出一种新的盐水质量分数测量方法, 基于非接触式电容感测技术, 用新型数字式电容传感器 FDC2214 检测盐水液位和质量分数变化。将单面覆铜板插入盐水中, 铜板上的寄生电容会随盐水液位或质量分数的变化而变化。FDC2214 传感器能够感知这种微弱变化, 并将其转换为 28 bit 的二进制数, 再从集成电路总线 (integrated circuit, IIC 或 I2C) 接口输出给微处理器。同时, 使用超声波测量液位高度, 得到被测液体的体积; 使用高精度电子秤测量液体的质量, 进而得到液体的比重, 融合处理后最终得到输出信号与盐水质量分数的关系。

1 系统设计

本研究设计的盐水质量分数检测系统框图如图 1。其中, 主控采用新型嵌入式微处理器 STM32H743IIT6, 该处理器基于 Cortex-M7 架构, 主频高达 480 MHz, 具有丰富的硬件配置和接口。微处理器 STM32H743IIT6 采用 3.3 V 的直流供电。

图1 盐水质量分数检测系统设计框图

Fig. 1 Design diagram of brine mass fraction detection system

将薄铜片插入盐水中作为传感器, FDC2214 的通道 1 与其相连, 检测液体环境下铜片上的寄生电容值, 并在内部将其转换为 28 bit 的二进制数, 再用 IIC 接口传送给微处理器 STM32H743IIT6。电子

秤模块能够准确测量容器质量, 测量数据通过模数转换 (analog to digital converter, A/D) 接口传送给 STM32H743IIT6 微处理器进行处理。超声波测距模块用于测量液位高度, 测量结果通过串口传送到 STM32H743IIT6 微处理器。采用 C 语言对微处理器编程, 对采集到的数据进行融合, 处理结果通过串口传输给电脑或液晶屏。

2 硬件设计

2.1 电容感测基本原理

电容计算公式为

$$C = \epsilon_0 \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; A 为一个板极的面积 (单位: m^2); d 为板极之间的距离 (单位: m); ϵ 为相对于空气的介电常数^[14]。常见介电质的相对介电常数如表 1。

表1 不同介质的相对介电常数

Table 1 Table of relative dielectric constant ϵ values

介质	ϵ	介质	ϵ
空气	1.0	云母	5.0
聚四氟乙烯	2.0	玻璃	7.5
纸	2.5	氧化铝	10.0
油	4.0	陶瓷	1 200.0

由式(1)可见, 电容容量与相对介质常数 ϵ 、板极的面积 A 成正比, 与板极之间的距离 d 成反比。介质变化 (如盐水质量分数变化) 会引起 ϵ 的变化, 从而引起 C 的变化^[5-8]。电容传感器 FDC2214 能够感知这种变化, 并将其转换为数字量输出。FDC2214 共有 4 个通道, 标号为通道 0~3, 对应的数字输出量为 $\text{DATA}_0 \sim \text{DATA}_3$, 每个通道的工作原理都相同。以通道 0 为例, 电容检测的等效电路如图 2。

图2 FDC2214 通道0 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of channel 0 in FDC2214

图 2 中, 感知板 1 为单面覆铜板, 裸露在空气中, 其值基本保持不变; 感知板 2 是插入水中的单面覆铜板, 当液位或浓度发生变化时, 其值发生变化. 感知板 1 和感知板 2 构成目标检测传感器, 二者串联后与电感 L 和电容 C 构成振荡电路, 振荡频率 f_s 和参考频率 f_r 分别为

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C + C_x)}}, \quad x = 1, 2 \quad (2)$$

$$f_r = \frac{f_{\text{clk}}}{\text{ch0_sel}} \quad (3)$$

其中, C_x 为感知板 1 和感知板 2 的电容 C_{x1} 和 C_{x2} 串联后的等效电容, C_1 为图 3 中通道 1 的电容, C_2 为图 3 中通道 2 的电容, $1/C_x = 1/C_{x1} + 1/C_{x2}$; f_{clk} 为 FDC2214 传感器的输入频率, 本研究设 $f_{\text{clk}} = 40$ MHz; ch0_sel 是通道 0 的分频系数, 通过软件设置 FDC2214 内部寄存器 0X14 来实现对 f_{clk} 的分频, 本研究设置为二分频.

由于 C_{x2} 的变化, 会引起 C_x 变化, 进而引起 f_s 的变化, 而式(3)中的 f_r 基本不变, 因此, 转换后的 28 bit 二进制数为

$$\text{DATA}_0 = \frac{f_s}{f_r} \quad (4)$$

2.2 盐水质量分数检测原理

本研究设计的盐水质量分数电容感测的原理图如图 3. 其中, FDC2214 传感器外接 40 MHz 有源晶振, 可提高数据采集的速率. 为增强盐水质量分数测量系统的可靠性和实用性, 需对所处环境进行检测. FDC2214 的通道 0 检测当前空气环境下电容值, 通道 2 检测被测量液体的电容值, 将其完全浸入液体中, 并以这两个测量值作为参考值. 在实际测量中, 若当前环境未发生大的变化, 则空气环境下电容值和被测量液体的电容会基本保持不变. 但若在不同的时间或季节进行测量, 温度变化会令测量值发生微小变化, 导致盐水质量分数和电容感测值之间拟合曲线的函数关系也会略有变化. 本研究正是基于此原因研究温度对盐水质量分数变化测量的影响. 通道 1 连接一个单面覆铜板, 将该覆铜板部分插入液体中, 部分裸露在空气中, 当液位发生变化时, 单面覆铜板上寄生电容的容量会发生变化. FDC2214 传感器敏锐的感知此变化, 并将此变化转换为 28 bit 的二进制数字量, 再通过 IIC 接口传送给 STM32H743IIT6 微处理器.

2.3 称重电路设计

称重电路设计采用桥式压力传感器, 如图 4.

图 3 盐水质量分数电容感测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of capacitance sensing of brine mass fraction

重物令压力桥产生形变, 导致电阻阻值发生变化, 桥式传感器产生电压差并被传送给 24 bit A/D 转换器芯片 HX711-BF, 再经内部放大和转换后传送到微处理器 STM32H743IIT6. 称重电路可检测物体质量, 其中, 桥式压力传感器测量精度为 1 g.

图 4 桥式压力传感器电路图

Fig. 4 Circuit diagram of bridge pressure sensor

HX711-BF 模块满量程输出电压为激励电压与灵敏度的乘积. 若供电电压为 5 V, 灵敏度为 1.0 mV/V, 则满量程为 5 mV, 相当于有 5 kg 质量产生 5 mV 的电压. HX711-BF 模块 A 通道带有 128 倍信号增益, 输出 24 bit A/D 转换后的值, 而 STM32H743IIT6 微处理器通过 A/D 转换接口将 24 bit 数据读出, 该过程可通过以下两步进行.

1) 计算传感器供电电压. V_{CC} 为 HX711-BF 模块的供电引脚电压, GND 为地线. 设模块基准电压 $V_{\text{BG}} = 1.265$ V, $R_1 = 20.0$ k Ω , $R_2 = 8.2$ k Ω , 则

$$V_{\text{CC}} = V_{\text{BG}}(R_1 + R_2)/R_2 = 4.3 \text{ V} \quad (5)$$

2) 将 HX711-BF 输出的 A/D 转换值转换为质量值. 设桥式传感器的量程小于 5 kg, 并假设压力桥上的物体质量为 m (单位: kg), 桥式传感器将此质量转换为电压. 在将此电压输入 H711-BF A/D 转换模块, 经过内部放大器放大 128 倍后, 转换成二进制数字量. 为便于计算此处用十进制表示, 即

$$m \left(\frac{4.3 \times 10^{-3}}{5.0} \times 128 \right) \times \frac{2^{24}}{4.3} = D \quad (6)$$

则可得桥式传感器上物体质量为

$$m = D / (429.5 \times 10^3) \quad (7)$$

2.4 超声波测距电路设计

串口超声波测距模块如图 5, 采用 5 V 直流电压供电, 数据输出引脚 OUT 可连接到 STM32H743IIT6 串口 4 的 RXD 引脚 PC11. 因此, 接收到的数据帧格式为: 0XFF + H_DATA + L_DATA + SUM. 其中, 0XFF 为起始字节; H_DATA 为测量数据的高 8 bit; L_DATA 为测量数据的低 8 bit; SUM 为 8 bit 的校验和^[9-13]. 测量距离 H (单位: mm) 通过式(7)计算. 测量精度达 1 mm, 测量范围为 2 ~ 3 500 mm.

$$H = H_DATA \times 256 + L_DATA \quad (7)$$

图5 串口超声波模块

Fig. 5 Serial port ultrasonic module

3 软件设计

3.1 软件流程图

用 C 语言编写程序, 在 KEIL MDK 开发环境下编译并调试通过后下载到微处理器 STM32H743IIT6 中. 图 6 为盐水质量分数测量系统的软件流程图. 首先, 对 STM32H743IIT6 微处理器的串口、串行外设接口 (serial peripheral interface, SPI)、IIC、A/D 转换采集接口和定时器等初始化, 并设置采集次数. 然后, 判断是否达到采集次数, 若没有, 则循环读取超声波测距、压力桥和电容感测数据, 并对其进行软件滤波处理. 若达到采集次数, 对所有数据进行融合分析, 得到盐水质量分数值与电容感测值之间的函数关系 (测试部分给出). 最后, 将实验得到的信息通过串口发送给电脑或显示屏.

图6 盐水质量分数测量系统软件流程图

Fig. 6 Software flow chart of brine mass fraction measurement system

3.2 软件滤波算法

为降低误差、提高测量精度, 需对电容感测、压力桥和超声波测距的数值进行均值滤波处理. 本实验对每组数据均重复采集 100 次, 再按升序排序, 去掉最大值和最小值各 20 个, 将剩余数据的均值作为最终值.

4 测试及结果分析

按上述原理设计硬件电路并编写程序, 调试后制作测试样品, 如图 7. 其中, 显示屏幕为 4.3 in (1 in = 25.4 mm) RGB 真彩屏; 超声波测距模块放

图7 盐水质量分数电容感测量系统样品

Fig. 7 Sample of brine mass fraction capacitance sensing measurement system

在玻璃容器正上方,用于测量液位高度.实验时将 $15.0\text{ cm} \times 10.5\text{ cm}$ 的单面覆铜板一端插入液体中,另外一端裸露在空气中.玻璃容器是带刻度的圆形器皿,高 21 cm ,直径为 16 cm .

测试时,每次按照表 2 配置好的不同质量分数的盐水,倒入玻璃容器中,然后读取超声波测距、电容感测 FDC2214 和压力传感器 HX711-BF 的数据.如表 2.

表 2 盐水质量分数电容感测实验结果

Table 2 Experimental results of capacitance sensing of brine mass concentration

盐水 总质量/g	液位 高度/mm	电容 感测值	$w(\text{盐水})/\%$
103	53	22 289	0.650
207	58	22 278	1.172
309	63	22 271	1.536
411	69	22 264	1.840
513	73	22 257	2.078
615	78	22 251	2.353
716	83	22 245	2.554
817	88	22 239	2.724
918	93	22 233	2.949
1 018	98	22 227	3.074
1 119	103	22 220	3.157
1 212	108	22 215	3.252

由表 2 可见,随着液位的增高,盐水质量增大,盐水的质量分数亦逐渐增大,而电容感测值逐渐减小.为了得到准确的盐水质量分数和电容感测值之间的关系,继续提升盐水质量分数,并记下测量值,并采用 Matlab 软件对数据进行拟合分析,结果如图 8.

由图 8 可见,拟合曲线近似为直线,对应函数关系为

$$C = -30.48w(\text{盐水}) + 22\,330 \quad (8)$$

其中, $w_{\text{盐水}}$ 为盐水的质量分数.可见,在保证液位保持不变的情况下,盐水质量分数和电容感测测量值之间为较好的线性关系.实验中,为保证测量精度,用量程为 500 g ,精度为 0.01 g 的高精度电子秤测量盐的质量,用量程为 100 mL 的量杯盛装水,

<http://journal.szu.edu.cn>

图 8 盐水质量分数和电容感测值之间拟合曲线图

Fig. 8 Fitting curve between brine mass fraction and capacitance sensing value

准确配置出不同质量分数的盐水,将其加入图 7 的大量杯中进行测量.这样配置的盐水质量分数精度已超过 0.1% .若要保证液位高度不变,则每次只需改变盐的质量,调整加水量,即改变盐水质量分数,再进行测量.这种测量方法,可将整个系统的盐水质量分数的测量精度提高到 0.1% .

结 语

提出一种基于电容感测技术的盐水质量分数测量方法,设计对应的硬件电路和软件,并制作出测试样品.通过融合实测得到的液位高度和盐水质量信息,确定了盐水质量分数和电容感测值之间的函数关系.相比简单的超声波测量技术,本研究测量方法的测量精度更高、抗干扰能力更强.

基金项目: 陕西省科学计划资助项目 (2016GY141)

作者简介: 黄 健 (1973—), 西京学院副教授. 研究方向: 嵌入式开发技术. E-mail: 565200245@qq.com

引 文: 黄 健. 基于电容感测的盐水质量分数测量[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(1): 92-97.

参考文献 / References:

- [1] 杨 璇, 苏明旭, 蔡小舒, 等. 超声波多次回波反射法测量乙醇溶液密度研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(7): 937-940.
YANG Xuan, SU Mingxu, CAI Xiaoshu, et al. Measurement of the density of the ethanol solutions using multiple reflections of ultrasonic waves [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(7): 937-940. (in Chinese)
- [2] 吴黎杰, 蒋志迪, 吴振谦. 基于曲面拟合的超声波液体浓度高精度测量方法[J]. 传感技术学报, 2018,

- 31(8): 1169-1175.
- WU Lijie, JIANG Zhidi, WU Zhenqian. High precision measurement method of ultrasonic liquid concentration based on curved surface fitting [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(8): 1169-1175. (in Chinese)
- [3] 张述仁, 徐 雅, 谢代梁, 等. 基于蚁群算法的超声波水体悬移质浓度测量研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1163-1168.
- ZHANG Shuren, XU Ya, XIE Dailiang, et al. Ultrasonic water suspension mass concentration measurement based on ant colony algorithm [J]. Journal of Sensing Technology, 2019, 32(8): 1163-1168. (in Chinese)
- [4] 李文杰, 张帅帅, 杨胜发, 等. 利用 ADV 测量细颗粒泥沙浓度的试验研[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 98-104.
- LI Wenjie, ZHANG Shuaishuai, YANG Shengfa, et al. Experimental study on the measurement of fine sediment concentration by ADV [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2014, 33(4): 98-104. (in Chinese)
- [5] 黄 睿, 张庆河, 邢恩博, 等. 基于光纤传感的多通道泥沙浓度测量研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 1-9.
- HUANG Rui, ZHANG Qinghe, XING Enbo, et al. Multi-channel measurement method of suspended sediment concentration based on optical fiber sensing [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2019, 38(9): 1-9. (in Chinese)
- [6] 胡红利, 唐凯豪, 唐晨晖, 等. 基于电容传感器的两相流参数检测原理及应用[J]. 西北大学学报自然科学版, 2019, 49(5): 681-690.
- HU Hongli, TANG Kaihao, TANG Chenhui, et al. Fundamentals of electrical capacitance sensing and its applications for two-phase flow parameter detection [J]. Journal of Northwest University Natural Science Edition, 2019, 49(5): 681-690. (in Chinese)
- [7] 周 昊, 吴剑波, 杨 玉, 等. 旋流燃烧器出口气固两相流场的光学波动法测量研究[J]. 浙江大学学报工学版, 2012, 46(12): 2189-2193.
- ZHOU Hao, WU Jianbo, YANG Yu, et al. Experimental measurement of gas-solid two-phase flow of a swirl burner by optical wave method [J]. Journal of Zhejiang University Engineering Edition, 2012, 46(12): 2189-2193. (in Chinese)
- [8] 杨加力. 船用锅炉自动冲洗液位计设计[J]. 船海工程, 2018, 47(3): 18-22.
- YANG Jiali. Design of automatic flushing water gauge for marine boiler [J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(3): 18-22. (in Chinese)
- [9] 付一鸣, 王玉恒, 郭 峰. 基于线性自抗扰的余热锅炉汽包水位控制[J]. 热能动力工程, 2018, 33(10): 83-89.
- FU Yiming, WANG Yuheng, GUO Feng. Design of linear active disturbance rejection controller for drum water level of heat recovery boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(10): 83-89. (in Chinese)
- [10] 张业明, 李智国, 王 耿, 等. 机械式旋转脉冲水深水位测量装置的设计与应用[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(10): 72-75.
- ZHANG Yeming, LI Zhiguo, WANG Geng, et al. Design and application of mechanical rotation pulse device for water depth and water level measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(10): 72-75. (in Chinese)
- [11] 孙 斌, 张长胜, 刘子裕, 等. HVPL 算法在双色水位计液位视觉检测中研究[J]. 控制工程, 2015, 22(3): 413-417.
- SUN Bin, ZHANG Changsheng, LIU Ziyu, et al. Research for visual detection of bicolor water level gauge based on HVPL [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(3): 413-417. (in Chinese)
- [12] 范优飞, 胡红利, 杨 帆, 等. 一种 48 电极可配置电容层析成像系统模型[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 110-115.
- FAN Youfei, HU Hongli, YANG Fan, et al. A model of electrical capacitance tomography system with configurable 48 electrodes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 110-115. (in Chinese)
- [13] YANG Wuqiang. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 447-453.
- [14] BUCHLA D M, FLOYD T L. 电子学: 电路分析基础[M]. 施慧琼, 夏 琳, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 290-293.
- BUCHLA D M, FLOYD T L. The science of electronics, DC/AC [M]. SHI Huiqiong, XIA Lin, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 290-293. (in Chinese)

【中文责编: 英 子; 英文责编: 木 柯】