

基于浮标原理的原位高频检测电导率变送器设计

王聪¹, 李道亮¹, 张领先^{1*}, 丁启胜^{1,2}, 傅泽田¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 徐州师范大学电气工程及自动化学院, 徐州 22111)

摘要: 为了实时监测水域盐度的变化及动态分析其盐度值常年分布规律, 该文设计了一种基于浮标原理原位高频检测电导率的变送装置。所设计变送器选用低功耗的 MSP430F149 微处理器, 通过 SIM300 的 GPRS 通讯模块, 在河流、湖泊和水产养殖场等水域实现了 GPRS 网络覆盖区域内的远程数据采集。系统选用线性插值的方法对其中的温度电导率传感器进行了温度补偿, 补偿精度为±5%FSC。该研究成果可为野外水域水质在线监测提供一种有效的解决方法。

关键词: 电导率, 检测, 温度校正, 原位高频, GPRS

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.022

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0129-05

王聪, 李道亮, 张领先, 等. 基于浮标原理的原位高频检测电导率变送器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 129—133.
Wang Cong, Li Dao-liang, Zhang Ling-xian, et al. Development of conductivity transmitter in-situ detection with high frequency by buoy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 129—133. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在盐度的过程检测中电导率的测量与监控具有十分重要的地位, 它是利用溶液的成分和电导率之间具有一定关系的特性来分析介质溶液的导电现象及其规律性的测量方法^[1-2]。由于电导测试技术具有灵敏度高、可测范围宽、结构简单、便于实现连续测量等优点, 被广泛应用于自动/连续监测如水质的监测和水/土壤中盐分的测定^[3-4]、工业流程中常压渣油胶体稳定性的检测^[5-6]、医学中肾脏功能和尿液浓缩功能好坏关键因素评价等^[7-8]。

电导率传感器根据测量原理与方法的不同可以分为电极型电导率传感器、电感型电导率传感器以及超声波电导率传感器。电极型电导率传感器根据电解导电原理采用电阻测量法对电导率实现测量, 其电导测量电极在测量过程中表现为一个复杂的电化学系统^[9-10]; 电感型电导率传感器依据电磁感应原理实现对液体电导率的测量^[11]; 超声波电导率传感器根据超声波在液体中变化对电导率进行测量^[12], 其中以前 2 种传感器应用最为广泛。

在电导率的测量中, 过程的连续观测尽管能捕捉到部分典型过程, 但毕竟人工布局进行观测, 监测的密度和频率不会太高, 并且时间序列上都是“离散”的, 往往无法捕捉到水动力、气象变化过程短时间尺度上对水体盐度的影响。随着监测和观测技术的迅速发展, 目前

发展起来的一些监测仪器已能够开展高频自动监测, 如德国 Qualilog 湖泊水质多参数在线监测无线传输系统可搭载、悬挂多种类型传感器或仪器设备, 能定点、自动、长期、连续地进行采集、处理、存储和传输常规的水文气象数据^[12]。美国 ISOC 公司和 HYDROLAB 等公司, 日本日立制作所和卡斯米国际株式会社等已经生产技术成熟的在线水质自动监测系统^[13-14]。而国外此类电导率测量系统体积大, 操作起来不方便, 再加上昂贵的维护费用, 使得研究低成本浮标式载动原位高频水质测量系统具有一定的实际意义。

本文研制了一种基于浮标原理原位高频检测电导率的变送装置, 其研制主要以太阳能为能源, 将电极式电导率变送装置与浮标的设计结合, 实现对水产养殖场、野外湖泊等自然水域中电导率的原位高频检测。

1 伏安法测量液体电导率的原理

电导率是物质传送电流的能力, 是电阻率的倒数。在液体中常以电阻的倒数——电导来衡量其导电能力的大小。液体电导率的测量可采用伏安法定测定平行电极间溶液部分的电阻, 再经计算得出液体电导率。由于直流伏安法测溶液电阻时存在化学极化和浓差极化现象^[15], 从而影响测量结果。化学极化是由于溶液在外电场作用下电极发生化学反应, 其反应生成物在电极与溶液间形成电势, 产生了与外加电压方向相反的“原电池”, 等效地增加了溶液的电阻; 另外某些生成物附着在电极表面, 使溶液与电极的有效接触面积减小, 等效地增加了溶液的电阻, 也会给测量带来误差。浓差极化是溶液中正负离子在极板间电场的作用下反向运动, 离子不平衡产生内电场, 内电场方向与外电场方向相反, 产生阻止离子导电的作用, 相当于增大溶液的电阻, 因而引起了测量误差。因此, 现有液体电导率传感器一般都采用正

收稿日期: 2011-07-01 修订日期: 2011-09-24

项目资助: 北京市自然科学基金资助项目(4092024); 国家科技重大专项(2010ZX03006-006)

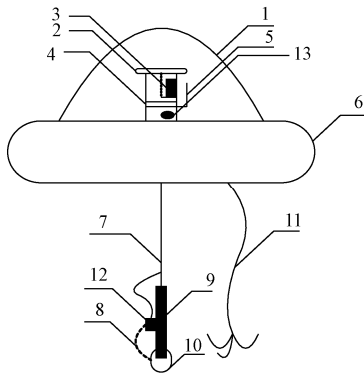
作者简介: 王聪(1986—), 男, 陕西宝鸡人, 主要从事信号检测与信息处理研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: ouyangyucong2005@163.com

*通信作者: 张领先(1970—), 男, 河南固始人, 博士, 副教授, 主要从事农业信息化技术方面研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: zlx131@163.com

弦交流电压驱动方式。从抑制极化的角度，电压的频率越高越好，但高频时分布电容的影响会降低测量精度，因此不同溶液、不同温度、不同探头都对应有其最佳频率范围。本文采用双极性方波驱动，用频率为 720 Hz，幅值为 0.2 V 的方波电压加到电导电极一端，另一端连接整流滤波电路，最终将被测液体电导率的变化转化成相应的电压输出。

2 浮标载动电导率变送装置设计

本文设计的浮标载动电导率变送装置包括浮标、电导率变送器、电源管理模块等部分组成。浮标采用浮体力学设计，最大内径为 1.5 m，厚度为 0.3 m 载物台上端的玻璃罩内置变送器，完成信号的采集、存储和无线传输。载物台中心位置设计了一个内径 0.015 m 的内腔贯穿载物台顶部和底部，载物台下方挂载的电极式电导率探头通过电缆与变送器相连。为了防止液体进入内腔，在电缆通过载物台内腔时，采用了防水接头的接法（如图 1 所示）。



1.高强度玻璃罩 2.太阳能板 3.锂电池 4.变送器电路板 5.射频频天线
6.浮动载物台 7.电缆 8.导气管 9.电极式电导率探头 10.防护罩 11.固定锚 12.清洗泵 13.干燥剂

图 1 浮标载动电导率变送装置结构简图

Fig.1 Buoy-type conductivity transmitter device structure diagram

2.1 变送器信号调理电路设计

变送器信号调理电路原理图见图 2。在水体电导率的测量中，为了减少电极的极化作用，本系统采用正负电源供电的迟滞比较器 LM319 和精密阻容器件组成双极性方波产生电路。当电路中元件的选择满足： $R_2=R_4=R_5$ 且 $R_1、R_2>10\times R_3$ 时，振荡频率为： $f=1/2\times 0.694R_1C_1$ 。此时迟滞比较器的输出端输出的双极性方波幅值大于 2 V，考虑到电压过高会使极化现象更明显，在 LM319 的输出端和电导率探头（EC_Probe）电极 A 端之间设计了幅值微调电路，确保送到电导率电极 A 端的激励信号为频率 720 Hz，幅值为 0.2 V 的双极性对称方波电压信号。

从电导电极 B 端输出的电信号 U_1 带有正负极性，需要合适的整流电路将输出的电压信号转换成直流信号，然后送到单片机 A/D 采样端进行采集。从电导电极 B 端到 AD_EC 端之间是一个信号整流模块，具体的整流过程如图 2 所示：运算放大器 MCP6042 和电阻 $R_{11}、R_{12}$ 构成

同相比例放大电路，该电路具有高输入阻抗、低输出阻抗的优点，通过选择 $R_{11}=R_{12}$ ，获得 $U_3=2U_2$ ；运放 MCP6042、 $R_{13}、R_{14}、R_{16}$ 和 R_{17} 分别组成 2 组反向比例放大电路，电路中选择 $R_{13}=R_{14}$ ，此时 $U_4=-U_3$ ；AD802 芯片是一款单极性单刀单掷模拟开关，导通电阻小于 0.4Ω，开关转换速率小于 35 ns，S 端接输入电信号，D 端输出电信号，当 IN 端输入电压大于 2 V 时，模拟开关截止，当 IN 端输入电压小于 0.8 V 时，模拟开关导通；电路中当迟滞比较器输出正极性幅值时，ADG802 模拟开关断开，只要选择 $R_{15}=R_{17}$ ，则有 $U_5=-U_3$ ，当迟滞比较器输出负极性幅值时，ADG802 模拟开关导通，此时 $R_{15}\sim R_{17}$ 与 MCP6042 构成反向叠加器，只要选择 $R_{16}=1/2R_{17}$ ，那么 $U_5=U_3$ ；由于 U_3 的极性与迟滞比较器输出的幅值极性相反，所以该整流电路很好的保证了 U_5 输出为正极性直流信号；最后将输出的 U_5 电压信号经过电阻分压和隔直电路调整到合适的量程（0~1 V）方便单片机模数转换。 U_5 电导率电压信号输送到 MSP430F149 单片机的 ADC0 端。

温度补偿电路，本文选择 MF51 系列的热敏电阻作为温度探头，该热敏电阻在 25℃ 条件下，阻值为 20kΩ，经过外围的电容电阻匹配电路，实现对温度电压信号的滤波和分压处理，将温度信号调整到适合单片机采样的范围。温度电压信号输送到 MSP430F149 的 ADC1 端。

信号调理模块的设计中，选择低功耗、高共模抑制比、低温漂的运算放大器 MCP6042 和高精密电阻、低温漂的电容是关键。通过合理的 PCB 走线和接地的处理，减少外界环境对变送器电路的影响。

2.2 变送器微处理器和无线传输模块设计

本文选用 TI 公司生产的一款超低功耗的 MSP430F149 单片机作为信号处理器^[16]，MSP430F149 具有 12 位 8 路模数转换器（ADC）功能和 DMA 控制单元，可以分别为系统采样电路和数据传输部分采用，使得系统的硬件电路更加集成化、小型化。可通过 MSP430 单片机内的 ADC 对电导率电压信号和温度电压信号进行模拟数字转换生成数字化的电导率电压信号和温度电压信号。由于上述转换后的结果可在微控制器内部根据温度和电导率之间的相互影响进行拟合，并通过软件的方法来消除温度电导率探头由于自身工作环境改变而引起的采集的数据信号的变化，因此可保证数据客观准确。另外此系统在 MSP430F149 单片机外围扩展了实时时钟模块，采用 RX-8025SA 作为实时时钟模块的主要器件。RX-8025SA 是低功耗的 CMOS 实时时钟/日历芯片，可提供一个可编程的实时时钟。一个中断输出和掉电检测器，所有的地址和时钟数据通过 I²C 总线接口串行传递。

本系统选择 SIMCOM 公司生产的 SIM300 实现在 GPRS 网络覆盖区域内的远程数据采集。SIM300 是一款三频段 GSM/GPRS 模块，能够提供 GPRS 多信道类型多达 10 个。该模块内部还集成了 TCP/IP 协议栈，并且扩展了 TCP/IP AT 指令，便于用户开发数据传输设备。系统采用 ZIF 连接器外接 SIM 卡，单片机通过发送 AT 指

令与 SIM300 进行通信,实现连接网络、数据发送等功能。由于 MSP430F149 和 SIM300 之间的电平不相同,就需要在中间加上 RS232 转换电路。由于系统中的传感器长期

浸泡在水中而受到严重的腐蚀,会影响系统测量结果和缩短传感器的寿命,因此安装了一个直流清洗泵清洗传感器探头,清洗周期是 12 h,1 次清洗时间为 5 s。

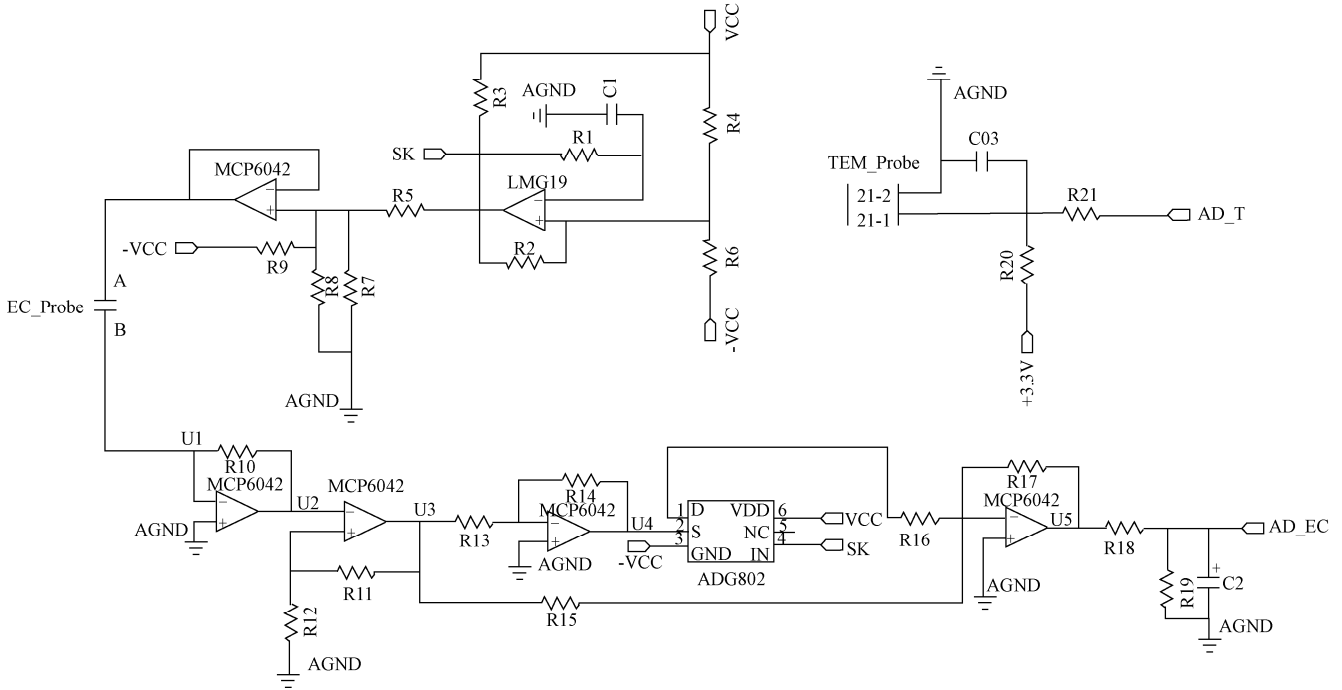


图 2 信号调理电路

Fig.2 Signal conditioning circuit

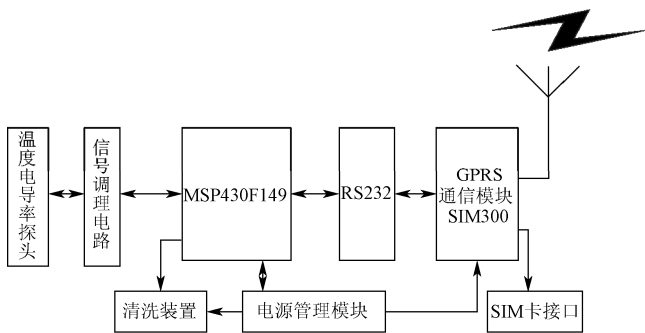


图 3 变送器系统硬件框图

Fig.3 Transmitter system hardware block diagram

2.3 电源管理模块

选用 4 节美国产的劲量 5 号 1.5 V 锂电池串联组成电池组作为外部供电装置。锂电池的寿命决定了整个系统的寿命,在不影响系统工作前提下,减少锂电池的充放电次数,可延长系统寿命。锂电池组在系统单片机控制下采用太阳能板对其进行充电,当锂电池电压充到 5.8 V 后结束充电,然后一直放电,直到电压低于 5.4 V 再次充电。

在电源分配之前,系统选用 LP2981-5V 芯片对总电源进行稳压处理,降低充放电过程中电源波动对整个系统的影响。由于系统中 MSP430F149 单片机工作电压是 3.3 V,信号调理模块运算放大器和迟滞比较器的工作电压是±3.3V,所以采用 LP2981-3.3 芯片稳压输出+3.3V,

配合芯片 LMC7660 输出±3.3V。对于 SIM300 模块采用的 4 V 供电,由于该电源部分的输出电流必须达到 1.2 A,因此采用 MICREL 公司的 MIC29302 芯片。

2.4 系统工作流程

本系统软件设计涉及上位机程序设计和下位机程序设计,设计流程如图 4 所示。

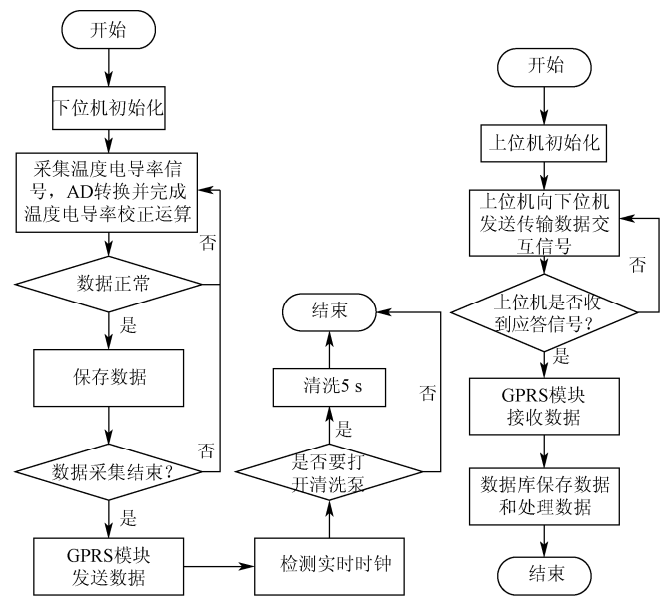


图 4 系统程序设计框图

Fig.4 System software flow chart

3 电导率传感器标定及温度校正

在做电导率传感器实验室标定时, 为了便于操作将温度电导率探头和变送器模块从浮标上分离出来。系统选用电极常数为 0.990 的上海傲乐石墨电导电极作为电导率检测探头, 将事先配好的 0 (去离子水)、8.79、21.4、34.6、57.8 mS/cm 的 KCL 标准溶液置于高低温交变试验箱里, 对每种溶液依次做 0℃、10℃、20℃、30℃和 40℃条件下电导率-电压值试验, 并且同时对温度传感器做标定处理。温度标定公式选择线性插值的方法, 温度标定精度为±2%FSC。

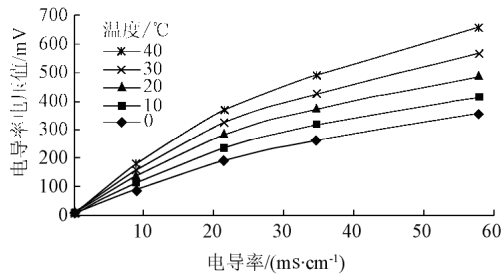


图5 不同温度下电导率值与电压值的关系

Fig.5 Relationship between conductivity and voltage value at different temperatures

图5为0~40℃温度条件下各种溶液对应的电导率值-电压值。结果显示, 水溶液的电导率受温度影响较大, 温度越高, 电导率值越大。而温度补偿就是为了克服温度的影响, 将溶液在实际温度下的电导率值转换为参考温度(一般为25℃)下的电导率值, 使得溶液在不同温度下的电导率具有可比性。根据JJG376-2007, 对于电导率大于 1×10^{-4} S/cm的强电解质, 电导率值与温度存在线性关系^[17]: $K_t = K_0 / [1 + a(t - 25)]$ 。其中, K_0 为水溶液在室温25℃下的电导率值, K_t 为 t ℃时的电导值, t 为现场测试温度, a 为温度补偿系数。为了进一步提高温度补偿精度, 对不同浓度的溶液均做了0~40℃的温度试验, 分别对所得温度曲线进行线性回归和拟合, 结果发现 a 值变化很小, 取其均值0.0148作为系统温度补偿系数, 从而得到适合本系统的温度校正公式: $K_0 = K_t / [1 + 0.0148(t - 25)]$ 。

表1 温度补偿效果和稳定性试验

Table 1 Temperature compensation effect and stability test			
温度/℃	三组溶液参考温度(25℃)下的电导率值/(mS·cm ⁻¹)		
	9.28	21.04	34.87
0	9.18	20.99	34.79
10	9.26	21.02	34.82
20	9.37	21.20	34.99
30	9.39	21.29	35.01
40	9.22	20.97	34.80

表1为电导率传感器温度补偿效果和稳定性试验结果。从表中可以看出, 经过温度补偿, 由外界温度带来的电导率的测量误差小于0.3 mS/cm, 基本满足了电导率变送器的测量要求。

4 结论与讨论

1) 本文设计了一种基于浮标载动式的电导率变送装置, 选择太阳能对其充电, 数据传输方面使用GPRS通讯模块完成数据的远程传输和系统的监测, 具有很好的实用性。

2) 本文利用简单的运放电路和模拟开关设计了新颖的整流电路, 经过试验结果分析, 这种电路整流效果很好。

3) 本文进行了大量的温度试验, 根据试验数据计算出的电导率温度校正公式, 具有很好的温度补偿效果, 系统测量范围可达到0~60 mS/cm, 测量精度可达到±5% FSC。

本文所设计的浮标载动式电导率变送仪在河流湖泊、水产养殖场的盐度测量中效果比较好, 稳定性高。而在盐度较大的水域, 比如海水盐度检测试验做的相对比较少, 下一步将展开海水盐度分析的试验设计和仪器的改进。

[参 考 文 献]

- [1] 周明军, 尤佳, 秦浩, 等. 电导率传感器发展概况[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(4): 9-11.
Zhou Mingjun, You Jia, Qin Hao, et al. Overview on the development of conductivity sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(4): 9-11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 向波荣. 工业电导率测试系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Xiang Borong. The Development of Industrial Electrical Conductivity Measure Instrument[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [3] Sudduth K, Drummond S, Kitchen N. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 239-264.
- [4] Sudduth K, Kitchen N, Bollero G, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472-482.
- [5] 张龙力, 杨国华, 孙在春. 质量分数电导率法研究中东常压渣油中的沥青质聚沉[J]. 石油学报: 石油加工, 2002, 18(6): 56-60.
Zhang Longli, Yang Guohua, Sun Zaichun. Study on the occurrence of asphaltene precipitation in middle east ar through mass fraction normalized conductivity[J]. Acta petrolei sinica: petroleum processing section, 2002, 18(6): 56-60. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李美霞, 刘晨光, 梁文杰. 用电导率法研究石油中沥青质沉积问题[J]. 石油学报: 石油加工, 1998, 14(4): 74-79.
Li Meixia, Liu Chenguang, Liang Wenjie. Study on deposition of asphaltene by electrical conductivity method[J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 1998, 14(4): 74-79. (in Chinese with English abstract)
- [7] 姜文玲, 彭佑铭. 在肾病检查中尿液电导率与渗透压相关性分析[J]. 实用医技杂志, 2005, 5(12): 2687-2688.
Jiang Wenling, Peng Youming. The correlation between urine freezing point osmotic pressure and conductivity in renal disease

- examination[J]. *Journal of Practical Medical Techniques*, 2005, 5(12): 2687–2688. (in Chinese with English abstract)
- [8] 秦桂娥. 尿液电导率、渗透压、比重关系讨论[J]. *中国医学检验杂志*, 2004, 5(4): 31–32.
Qin Guie. Correlation among conductivity, osmotic pressure and specific gravity of urine[J]. *Chinese Journal of Medical Laboratory Technology*, 2004, 5(4): 31–32. (in Chinese with English abstract)
- [9] 傅卫卫, 应伯根. 工业水处理过程中电导率测量方法的研究[J]. 1999, 33(2): 204–208.
Fu Weiwei, Ying Bogen. Research on electrical conductivity measurement in industrial water processing[J]. 1999, 33(2): 204–208. (in Chinese with English abstract)
- [10] 徐海滨. 双向电流法测量溶液电导[J]. *自动化与仪器仪表*, 1995(5): 15–17.
Xu Haibin. Bipolar current method for determination of solution conductance[J]. *Automation and Instrumentation*, 1995(5): 15–17. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐征, 何为, 何传红, 等. 生物组织电导率磁感应测量原理及系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(9): 1878–1882.
Xu Zheng, He Wei, He Chuanhong, et al. Study on the principles and system of measurement biological tissue conductivity with magnetic induction method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(9): 1878–1882. (in Chinese with English abstract)
- [12] Sudduth K A, Kitchen N R, Bollero G A. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of electrical conductivity[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(3): 472–482.
- [13] Thomas A. Frankovich, Ronald D. Jones. A rapid, precise and sensitive method for the determination of total nitrogen in natural waters[J]. *Marine Chemistry*, 1998, 60(3/4): 227–234.
- [14] 王奎兰, 吴清平, 邓金花, 等. 水质快速分析技术现状及发展趋势[J]. *现代仪器*, 2005(5): 54–56.
Wang Kuilan, Wu Qingping, Deng Jinhua, et al. The present situation and developing tendency of water quality analysis field[J]. *Modern Instruments*, 2005(5): 54–56. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘燕群. 影响电导率测量准确度的综合因素[J]. *河北化工*, 2004(1): 63–64.
Liu Yanqun. The Integrated factors of affect the conductivity measurement accuracy[J]. *Hebei Chemical*, 2004(1): 63–64. (in Chinese with English abstract)
- [16] 沈建华, 杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 2–7.
- [17] 张国城. 电导率仪温度补偿两套公式的根源及其优劣[J]. *中国计量*, 2010, (8): 86–88.
Zhang Guocheng. The origin, strengths and weaknesses of two temperature compensated conductivity meter formula [J]. *China Metrology*, 2010(8): 86–88. (in Chinese with English abstract)

Development of conductivity transmitter in-situ detection with high frequency by buoy

Wang Cong¹, Li Daoliang¹, Zhang Lingxian^{1*}, Ding Qisheng^{1,2}, Fu Zetian¹

(1. *Department of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *Department of Electrical engineering and Automation, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)*

Abstract: In order to real-time monitor changes of water salinity and dynamically analyze its perennial salinity distribution, this paper designed an in-situ high-frequency conductivity transducer with a buoy. The transducer uses a low power MCU (MSP430F149) and a SIM300 GPRS communication module, and the remote data acquisition is realized within the coverage of GPRS signals in water areas, such as rivers, lakes and aquafarms. The system was designed with a linear interpolation to compensate the temperature conductivity sensor, and the compensation accuracy is $\pm 5\%$ FSC. The study can provide a feasible solution for online water monitoring in field waters.

Key words: electric conductivity, measurements, temperature compensation, in-situ detection of high frequency, GPRS