

基于磁感应的水质电导率检测系统研究^{*}

柯 丽 刘 晶 杜 强

(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

摘 要: 根据电磁感应特性中的涡流检测原理,设计了一套电磁感应式水质检测系统,该系统根据电磁感应测量技术设计了系统激励-检测线圈测量模型;以 Arduino 为核心处理器,利用数字频率合成技术(DDS)产生正弦激励源,基于鉴相芯片 AD8302 设计了相位检测器;并对系统中的信号进行处理(滤波、放大)增加系统的可靠性;通过串口和液晶显示实现人机交互界面显示磁感应信号检测数据。最后,通过对不同种类的水样本实验,实验结果表明该磁感应式水质检测系统,可以测量出水样本的电导率差异,判别出水质的类别。

关键词: 涡流检测;正弦激励源;相位检测;电导率

中图分类号: TH878⁺.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Study on water-quality conductivity measuring system based on magnetic induction tomography

Ke Li Liu Jing Du Qiang

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: According to the eddy current testing principle of electromagnetic induction characteristics, this paper designs a set of electromagnetic induction water quality monitoring system. According to the electromagnetic induction measuring technical to design system excitation-detection coil measurement model, the system is in the Arduino core processor, using digital frequency synthesis (DDS) to create sinusoidal excitation source and then based on the phase AD8302 chip to design the phase detector. And processing a signal of system (filtering, amplification) to increase system reliability, through the serial port and LCD display to achieve human-machine interface to show magnetic induction signal detection data. Finally, through testing the different types of water samples, the results show that the magnetic induction water quality monitoring system can measure conductivity differences in the water samples as well as determine the water quality categories.

Keywords: eddy current testing; sinusoidal excitation source; phase detector; conductivity

1 引 言

目前,电磁式检测法是国内外研究热门的生物组织电导率方法之一^[1]。电磁式检测方法不同于电极式测量法^[2],由于不使用电极,所以不存在电极极化和污染水质问题,还可在高温高压、强酸强碱等恶劣的环境下使用。电磁式检测法是一种非接触无污染的新型检测技术,国外有多个科研小组都开展了相关研究。其中, SCHARFETTER H 等人^[3]设计了激励线圈检测线圈排成圆形的实验模型,采用直接鉴相测量方式测量目标导体感应出的涡流; GRIFFITHS H 等人^[4]仿真了电

磁感应特性中的涡流场,指出激励磁场穿过被测物之后,由被测物内部涡流的影响所导致的原磁场相位变化与被测物电导率呈近似线性关系; LIONAHEART WRB 等人^[5]建立了非接触式的数据采集系统,利用上位机控制锁相放大器,实现对生物组织的电导率测量;近年来,国内电磁感应技术人员也对磁感应式系统进行了大量的研究^[6],可实现对浅层电导率异常目标进行检测,能检测的电导率最小值为 0.2 S/m ^[7]。

然而,通过以上实验模型进行水质检测,则系统的抗干扰能力、处理速率、体积以及系统的便携性等因素都有待改善。因此,利用电磁感应技术设计了一套非接触式

收稿日期:2015-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51377109)、辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目(LZ2014011)支持。

电磁感应水质检测系统。首先,本系统根据电磁感应技术设计实验模型,实现了系统具备抗干扰能力强且便于携带的特点。同时,系统以 Arduino 为核心处理器,利用数字频率合成技术(DDS)产生正弦激励源,然后基于鉴相芯片 AD8302 设计了相位检测器,实现了系统具备控制灵活且处理速率快的特点。另外,采用激励源的频率准确度和鉴相器的精度以及水质检测系统的相位分辨率和电导率分辨率作为衡量该系统的主要性能指标。最后,通过该系统测量不同电导率水质的相位变化情况,鉴定水质的类别。

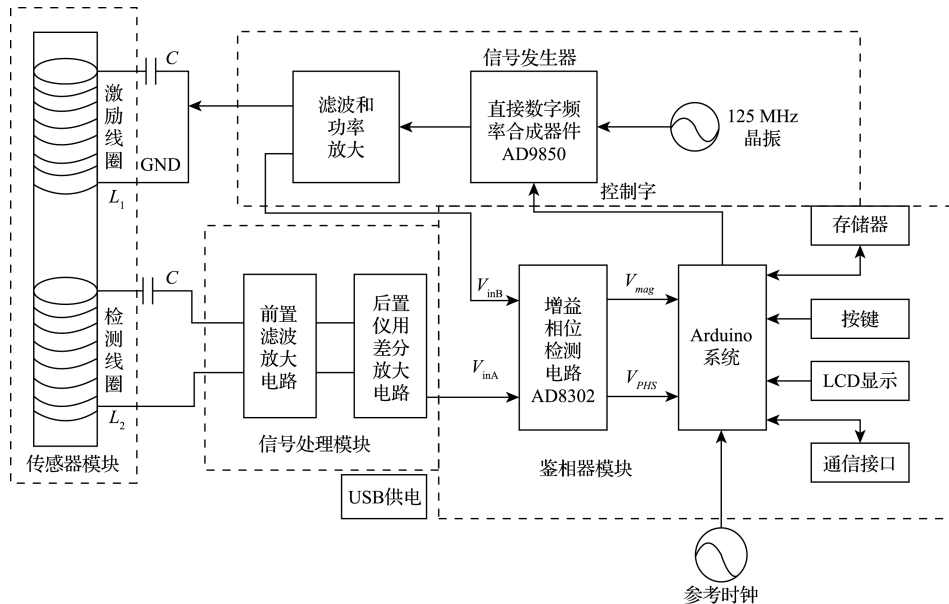


图1 电磁感应水质检测系统

在信号的接收端,当接收线圈 L_2 感应出磁感应信号后,首先经由接收线圈 L_2 和电容 C 构成谐振回路;然后通过前置滤波放大电路和后置仪用差分放大电路处理获得检测信号,所得到的检测信号包含了被测水质内部的相关信息;最后再将该检测信号 V_{inA} 和正弦激励源产生的参考信号 V_{inB} 通过基于专用的鉴相芯片(AD8302,ADI)和 Arduino 控制平台构成的鉴相器,得出相位变化信息。系统供电可用 USB 供电,通过通信接口 USB 与 PC 通信,实现相位数据在 LCD 和 PC 上显示。

2.2 系统的测量模型

为使水质检测系统更灵活方便,系统采用激励线圈和检测线圈分别位于被测物上、下两侧,在激励-检测线圈之中有内外两个细管,线圈缠绕并固定在外细管上,而内部细管作为被测物水样本容器,便于取出清洗,避免污染线圈而引起对系统的干扰。如图 2 所示为线圈和磁场相对分布示意。

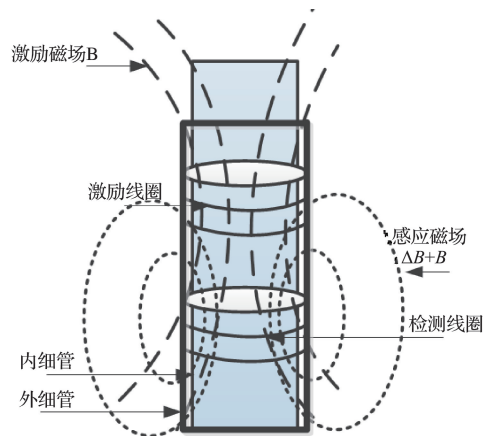


图2 线圈和磁场相对分布示意

从图中可以看到,激励线圈产生恒定的磁场 B ,在被测物中感应出涡流,检测线圈中的总磁感应强度为 $\Delta B + B$,检测线圈感应到的磁场相角会滞后于原磁场相角 Φ 度, Φ 角的大小反映了被测物电导率的变化。

激励-检测线圈采用同轴同结构模式,保证了谐振频率一致,同时消除了激励磁场干扰。另外,将激励-检测线圈相当于电感 L_1 ,串联电容 C ,形成了带通滤波,可去除一些噪声干扰。其中感抗和容抗相等时(数学表达式如式(1))发生谐振,电路中感抗和容抗引起的相移相互抵消^[9]。

$$2\pi f_r L - \frac{1}{2\pi f_r C} = 0 \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1)$$

根据式(1)能够得出谐振频率 f_r ,即为激励源需要产

生的频率值。

3 激励部分设计及性能测试

3.1 激励源的设计

设计激励部分信号发生系统结构如图3所示,以Arduino控制平台为处理器核心,向直接数字合成器件AD9850模块发送控制字,结合滤波和放大模块构成激励源。AD9850器件是美国ADI公司推出的采用先进的CMOS技术的高集成度直接频率合成芯^[10],该芯片内部有40位控制字,32位用于频率,串行输入模式下,在时钟脉冲引脚的上升沿把1位数据移入,当移动到40位后,串行引脚变为上升沿即可更新输出频率和相位^[11]。

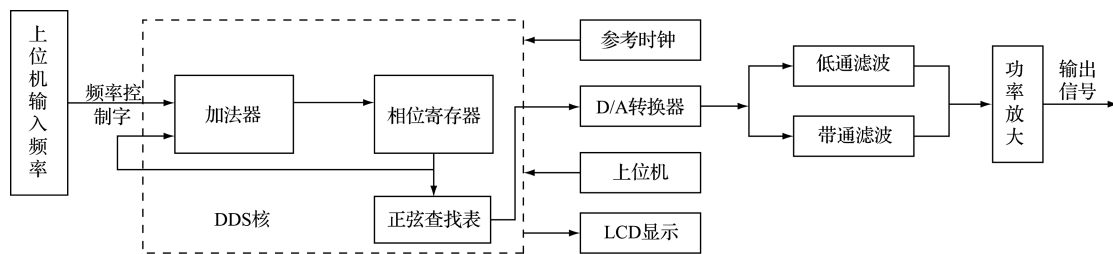


图3 信号发生器系统结构

相位累加功能由一个加法器与一个 N 位相位寄存器级联实现,每个时钟周期内,由频率控制字 K 决定相位增量的大小用以控制输出频率。设相位累加器位数为 N ,参考时钟频率为 f_c ,则信号输出频率 f_a 和频率分辨率 Δf_a 分别为:

$$f_a = f_c \times K / 2^N \quad (2)$$

$$\Delta f_a = f_c / 2^N \quad (3)$$

从D/A转换器输出的正弦信号中,含有大量的呈现阶梯状的高次谐波。为解决该问题,首先设计了一个7阶椭圆滤波器,具体电路原理如图4所示。该滤波器具有十分良好的矩形系数,带内波动小,适合DDS输出。

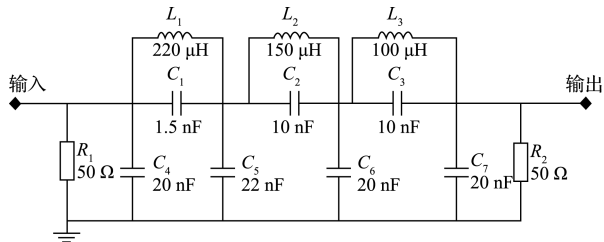


图4 椭圆滤波器电路原理

然后通过Multisim仿真出幅频特性曲线,如图5所示能够看到在通带和阻带的波动较小,该系统的激励频率为100 kHz,所以设计的7阶椭圆滤波器的截止频率为100 kHz,有近40 dB的带外抑制,低通效果理想;最后用示波器看到经滤波放大后的激励源输出的正弦波波形如图6所示,波形比较理想。

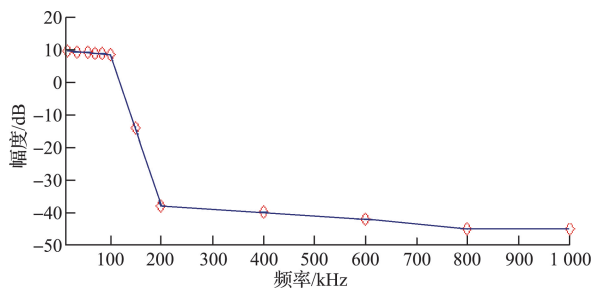


图5 椭圆滤波器幅频特性曲线

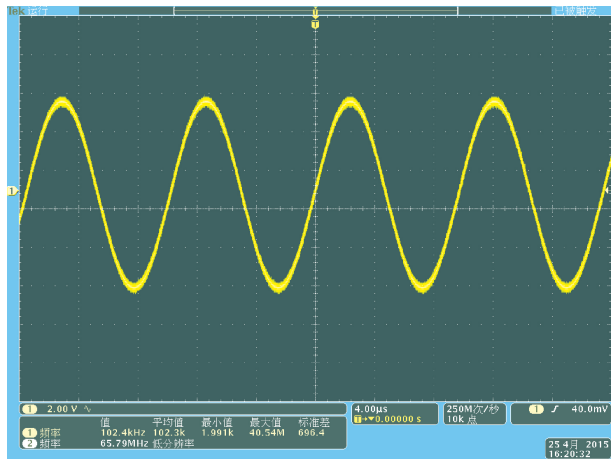


图6 输出正弦波形

经实验验证,本系统可使频率分辨率达到 0.03 Hz,输出频率范围为 0.1 Hz~40 MHz,输出信号具有高稳定性,低失真度、低噪声、宽频带的特点,满足于水质检测系统中激励源部分。

3.2 激励源性能测试

频率准确度也是衡量信号源好坏的一个极其重要的性能指标。为测量本系统激励源的频率准确度,设置信号源频率初始值 f_0 ,测试中通过示波器测出并记录激励源实际的频率值 f_1 ,其频率准确度的数学表达式为:

$$\Delta = \left| \frac{f_0 - f_1}{f_1} \right| \times 100\% \quad (4)$$

对比设定值 f_0 和测量值 f_1 ,实验结果如表 1 所示。

表 1 信号源频率准确度

设定值 /kHz	测量值 /kHz	相对误差 (%)	设定值 /kHz	测量值 /kHz	相对误差 (%)
20	20.39	1.90	500	515.8	3.10
60	61.31	2.10	600	617.2	2.80
100	102.4	2.40	700	720.6	2.90
200	206.2	3.00	800	825.5	3.10
300	308.1	2.70	900	929.7	3.20
400	409.7	2.40	1 000	1 033.3	3.20

由于在磁感应水质检测系统中,只需要得到不同水质的相位相对值,由表可看出,相对位差为 1.9%~3.2%,在常用的激励源频率范围内相对稳定,其测量的精度完全满足磁感应信号的检测要求。

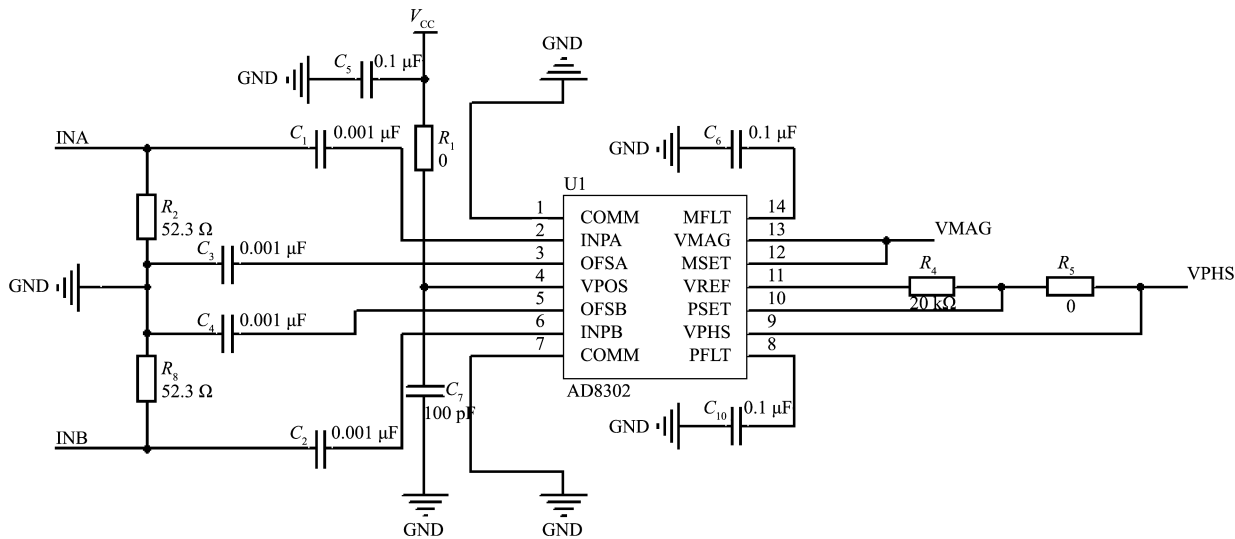


图 7 AD8302 相位检测电路

4.2 鉴相器的性能测试

鉴相器的主要性能包括灵敏度和精度。采用信号发生器和电压表分别对相位检测系统进行灵敏度和精度的测试,为了测量鉴相系统的灵敏度,则改变两路信号的相位差,得到相位差和输出电压到的关系如图 8(a)所示;为

4 相位检测部分设计及性能测试

4.1 相位检测器的设计

相位检测是整个水质检测系统的关键,相位检测电路常见的实现方法有:采用高速乘法器做相位正交解调,或者采用专用的集成鉴相芯片。然而前者对电路的要求极高,得到的相位直流电压输出与幅值电压直接相关,得到的电压与相位之间的线性度较差^[12]。采用美国 ADI 公司的 AD8302 芯片,能够同时测量从低频到 2.7 GHz 内的输入信号的幅度比和相位比,同时在一定程度上降低鉴相部分的复杂程度,使误差源及相关温度漂移减小到最低限度。此外,可将两路输入信号转换为直流电压输出,减小信号幅度变化对输出相位电压值的影响,提高输出的线性度^[13]。AD8302 的相位测量原理主要根据芯片内部集成的对数放大器的对数压缩功能,其数学表达式为:

$$V_{OUT} = V_{SLP} \log(V_{IN}/V_Z) \quad (5)$$

式中: V_{IN} 为输入电压, V_Z 为截距, V_{SLP} 为斜率。该芯片正式利用上述原理,通过两个精密的宽带对数检波器实现两路输入信号相位测量^[14],其数学表达式为:

$$V_{PHS} = -R_F I_\phi (|\Phi_{(INA)} - \Phi_{(INB)}| - 90^\circ) + V_{CP} \quad (6)$$

式中: $\Phi_{(INA)}$ 和 $\Phi_{(INB)}$ 分别为 A、B 两通道的输入信号相位; V_{CP} 为参考电压 $V_{CP} = 900 \text{ mV}$;理论上 $R_F I_\phi = 10 \text{ mV}/(^{\circ})$ 。

AD8302 相位检测电路如图 7 所示,当幅度比较输出端 VMAG 与反馈端 MEST 相连,可测得输出幅度电压,且利用外部参考电压 VREF 重新定位相位比较输出端与反馈端 REST 相连后的中心点。

了测出鉴相系统的精度,利用信号发生器产生的两路信号分别接入到 AD8302 的 A、B 通道。测试 20 kHz~1 MHz 范围内的 50 个频率点,测得每个频率点中 $0^\circ \sim 18^\circ$ 相位误差的最大值如图 8(b)所示。

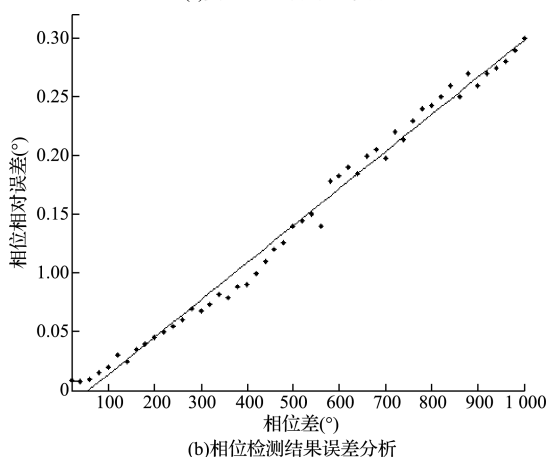
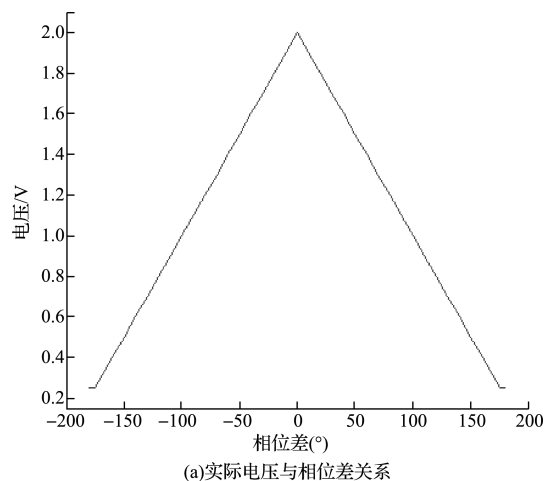


图 8 鉴相器性能测试

从图 8(a) 中分析数据得到以下结果, 当相位差改变 1° 时, 对应输出电压改变 10 mV , 鉴相灵敏度为 $10 \text{ mV}/(^{\circ})$ 。利用式(6)验证 $R_F I_\Phi$ 的实际值, 得到相位差检测电路的相位斜率为 $R_F I_\Phi = 10 \text{ mV}/(^{\circ})$, 与理论值一致。因此, 两路电压信号经过 AD8302, 通过 ATmega328 单片机自带的 10 位 ADC 后, 得到相位参数。同时, 相位差值与电压在 $0^\circ \sim 160^\circ$ 呈线性关系, 且输出稳定, 而水质检测系统中的相位差值完全在线性区域中变化。

从图 8(b) 中可以看出, 随着注入激励频率的增加, 系统的抗干扰能力降低, 测量信号中的噪声明显变强, 鉴相结果会越来越不精确。所以, 1 MHz 时的鉴相误差最大为 0.3° , 得出相位差检测系统测得的相位精度小于 0.30° 。在实际的应用中, 18° 的相位差动态范围足以满足磁感应水质检测系统的需求, 而水质检测系统要求的注入频率为 100 kHz , 此时的鉴相精度小于 0.02° , 满足磁感应式水质检测系统的要求。

5 信号处理电路及性能测试

5.1 滤波放大电路的设计

系统的磁感应信号是由微弱的交变磁场产生, 且检测线圈输出的信号很微弱很难满足后续鉴相芯片伏特级的要求。为解决此问题的一个方法是采用如图 9 所示的前置全差分滤波运算放大器 LT6600-20 (信噪比 76 S/N , 截止频率 20 MHz) 和后置仪用差分放大器 AD8130 (共模抑制比 $80 \text{ dB}@2 \text{ MHz}$) 构成滤波和差分放大模块^[14]。

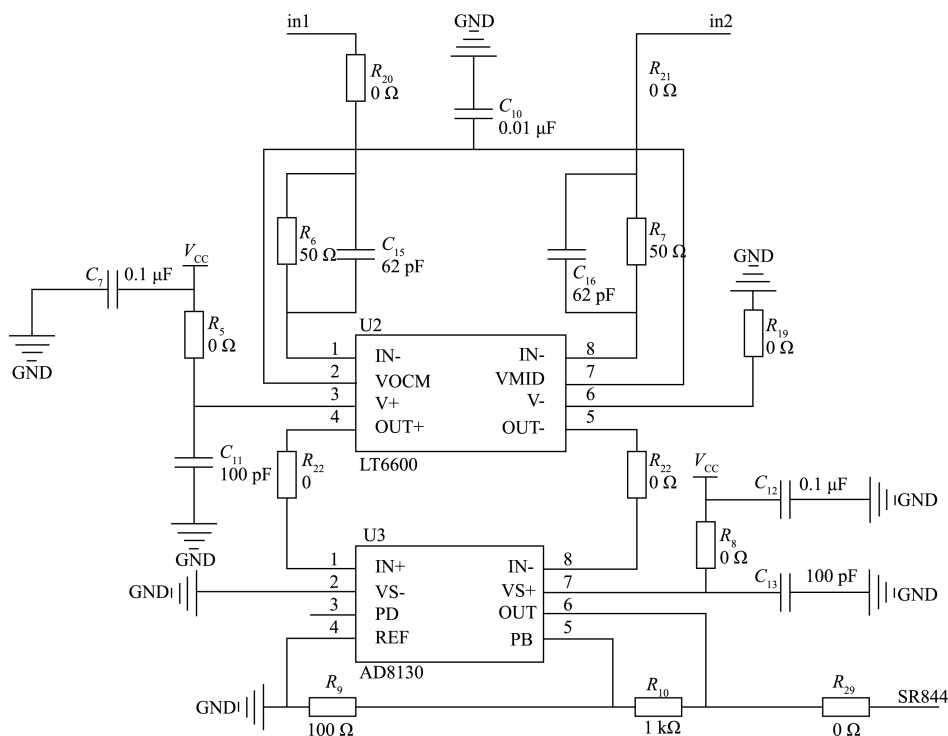


图 9 差分放大滤波电路

检测信号经过前置滤波放大器,具有滤波功能相当于4阶切比雪夫低通滤波器,调节外端电阻,控制放大器的放大倍数,保持信号差分形式,避免接地的干扰。后置的仪用差分放大器,能将差分信号转化成单端信号输出,便于进行相位检测。

5.2 系统的性能测试

系统搭建完毕并做好调试后,首先验证系统的分辨率,用万用表测得系统鉴相输出的噪声水平平均为0.2 mV,结合鉴相模块中已经得出的鉴相灵敏度为10 mV/(°)。所以,该系统的相位分辨率为0.02°。然后配置不同浓度的氯化钠溶液取50 mL对系统进行测试,表2为不同电导率氯化钠溶液的相位差统计表。

表2 不同电导率氯化钠溶液的相位差

电导率 σ (S/m)	相位差 $\Delta\theta$ (°)	电导率 σ (S/m)	相位差 $\Delta\theta$ (°)
0.5	0.98	2.5	5.38
1.0	2.45	3.0	6.85
1.5	3.42	3.5	7.82
2.0	4.4	4.0	9.29

由以上数据可以看出,溶液的电导率与相位差呈同步递增趋势,且趋势稳定。该实验结果的稳定验证了被测物内部涡流的影响所导致的原磁场相位变化与被测物的电导率的正相关的关系,同时也证实了整个水质检测系统的稳定性和可靠性。另外,结合水质检测系统的相位分辨率以及表2数据可以得出水质检测系统的电导率分辨率为0.009 S/m。

6 水质检测实验

6.1 实验步骤

1)选取3大类水质样本:第一类为矿物质水,在纯净水中加入食品添加剂(KCL、MgSO₄);第二类为饮用天然矿泉水来自天然水源,水中含有Na、Mg、K、Ca、偏硅酸等微量元素;第三类为功能型饮料,水质中含有一些维生素、烟酰胺、牛磺酸等。

2)利用电导率仪校准盐水的电导率,得出7种水质的电导率。

3)通过设计的水质检测系统对水样本进行测试,第一步将空置的内细管置于系统中,测量空气场的相位数据,并记录。然后量取实验溶液50 mL,注入内细管中,待数据稳定后读取相位数据,将采集到的空气场和非空气场状态下的相位数据做差,即可得出该溶液所需的相位差数据,记为对不同水质的测量值 $\Delta\theta$ 。清洗试管后重复以上步骤测量其他水质。

6.2 实验结果分析

根据上述步骤,利用磁感应式水质检测系统测得不同水质的测量值如表3所示。

从表3可以分析出,因为水质检测系统的电导率分辨率为0.009 S/m,而矿物质水的电导率小于水质检测系统的分辨率,所以检测矿物质水时相位几乎不发生变化,对矿物质水进行多次实验,并取均值值得检测出的矿物质水的测量值大约为0.01°;饮用天然矿泉水的测量均值为0.13°;功能性饮料的检测值大约为0.49°。因此,通过相位的大小就能够鉴定出水质的类别。

表3 被测水质电导率和相位测量值统计

样本水质	电导率 σ (S/m)	测量值 $\Delta\theta$ (°)	测量均值 (°)
矿物质水-1	0.005 4	0.01	0.01
饮用天然矿泉水-2	0.033	0.08	
饮用天然矿泉水-3	0.05	0.13	0.13
饮用天然矿泉水-4	0.053	0.17	
功能饮料-5	0.122	0.41	
功能饮料-6	0.159	0.5	0.49
功能饮料-7	0.179	0.55	

通过电导率仪测得的电导率值可以判别出水质的类别,而本文上述描述的通过相位的大小也可以鉴定出水质的类别。所以,结合7种水质样本的电导率和相位差值,得出相位差和水质样本的电导率的关系如图10所示。

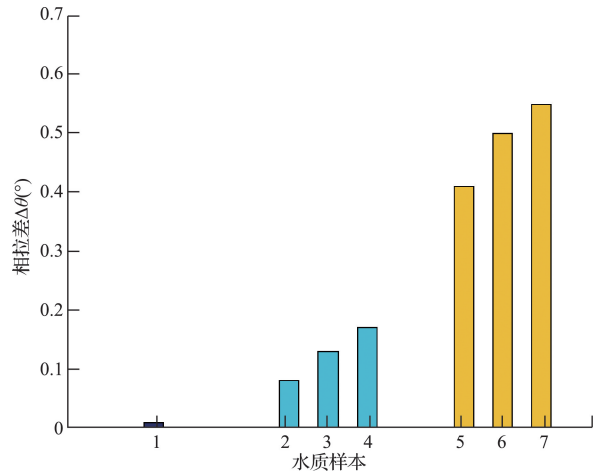


图10 水质相位差与水质样本的关系柱状

由上图可知,相位差与电导率的函数呈递增趋势。实验中对水质电导率的测量利用了电导率仪来进行,但电导率仪的测量是通过电极完全接触溶液的方式测量的,会对电极造成腐蚀,同时也会给水质带来污染;而本文设计的系统是非接触式的,是通过该系统测量待测溶液的相位差来说明不同类别的水质溶液,上述分析验证了被测物电导率与其相位差的正相关的关系,依照此结论,可以利用本文所设计的系统对被测物进行相位差的测量,从而鉴别出水质的类别。

7 结 论

该系统通过对涡流检测原理的深入研究,利用直接数字频率合成技术结合滤波和放大实现了正弦信号的产生方式,并对检测线圈检测出的信号进行一定的处理使其满足鉴相要求,通过 AD8302 鉴相芯片相位差与电压之间的线性关系设计了鉴相器。本系统是非接触式的,所以对被测物无污染、无腐蚀,并且系统成本低廉、控制灵活、测量精度高。实验结果表明,该水质检测系统的激励源频率准确度的误差为 2.4%,相位检测器的精度小于 0.02° ,水质检测系统的相位分辨率为 0.02° ,以及电导率的分辨率为 0.009 S/m ,并且利用不同浓度的生理盐水溶液和不同可饮用的水质做了一系列的实验,实验结果符合电磁场的基本原理,验证了系统的可靠性,鉴定了水质的类别。

参 考 文 献

- [1] 张英杰,潘超,程亮.一种电磁感应水处理器关键技术的研究[J].电源学报,2013,25(5):93-98.
- [2] VOLFKOVICH YU M, MIKHALIN A A, RYCHAGOV A YU. Surface conductivity measurements for porous carbon electrodes[J]. Russian journal of electrochemistry, 2013, 49(6): 594-598.
- [3] SCHARFETTER H, MERWA R, PILZ K. A new type of gradiometer for the receiving circuit of magnetic induction tomography[J]. Physiol Meas, 2005, 26(2): 307-318.
- [4] GRIFFITHS H, ZOLGHARNI M, LEDGER P D, et al. Imaging cerebral haemorrhage with magnetic induction tomography numerical modelling [J]. Physiol Meas, 2009, 30(2): 187-200.
- [5] MANUCHEHR S, LIONHEART WRB. Absolute conductivity reconstruction in magnetic induction tomography using a nonlinear method[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 25(12): 1521-1529.
- [6] 柯丽,曹冯秋,杜强. MIT 中反投影矩阵的计算与数据处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2256-2262.
- [7] 何为,王俊峰,徐征.多通道开放式磁感应成像测量系统研究[J].中国生物医学工程学报,2010,29(6): 877-881.
- [8] 曾志刚,李吉申,王钊.基于 mega328p 和 Android 手机的数字血压计[J].计算机系统应用,2013,22(6): 200-203.
- [9] 赵友全,刘潇,陈玉榜,等.微型涡流电导率测量传感器的优化设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(4): 598-603.
- [10] 董亚男,马俊,周泉,等.基于单片机的智能信号发生器设计与仿真[J].电子测量技术,2014,37(1): 62-65.
- [11] 董建晶,张晓青.基于 FPGA 与 AD9854 的宽带扫频信号源设计[J].国外电子测量技术,2013,32(11): 65-69.
- [12] 杨宇祥,王钰.基于 AD8302 的生物阻抗频谱测量仪的研制[J].仪器仪表学报,2006,27(6): 168-170.
- [13] JIN G, SUN J, QIN M Y, et al. E. A special phase detector for magnetic inductive measurement of cerebral hemorrhage[J]. PLoS ONE, 2014, 9(5): 1-7.
- [14] 冉鹏,何为,徐征.基于数字处理的频差电阻抗成像系统的设计[J].仪器仪表学报,2013,34(2): 448-454.

作 者 简 介

柯丽,1977 年出生,工学博士,教授,博士生导师,辽宁省医学信息与健康工程学会副理事长。主要研究方向为生物阻抗测量与成像等。

E-mail: ke.l@live.cn

刘晶,1991 年出生,在读工学硕士。主要研究方向为电磁感应技术与信号处理等。

E-mail: 602711559@qq.com

杜强,1975 年出生,博士,讲师。主要研究方向为生物电磁成像、人体电信号检测与分析等。

E-mail: 309053216@qq.com