

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407560

非侵入式差频电解质溶液电导率测量系统

花一鸣 吴帅 张军 朱建平 吕春峰

(上海海洋大学工程学院 上海 201306)

摘要:针对传统接触式电解质溶液电导率测量中存在测量电极被极化、被测溶液易受污染等问题,提出一种基于电涡流效应的非侵入式双线圈电解质溶液电导率测量系统。通过建立有限元分析模型,深入探讨了激励频率、线圈几何参数等对测量系统灵敏度的影响,为系统探头设计以及误差分析提供了理论基础。实验部分,优化了线圈探头参数,搭建了基于FPGA的双线圈差频式测量系统,该系统能够将电感变化转换为频率变化,实现数字信号输出。双线圈由检测线圈和参考线圈组成,其中检测线圈用于测量被测溶液,参考线圈远离被测溶液且仅受环境影响,二者信号实现差动输出,可消除外界干扰。对比实验显示,该系统能有效测量不同电导率溶液,验证了仿真模型的正确性。进一步的温度和抗干扰实验表明,双线圈差动结构在确保测量精度的同时,显著增强了系统的抗干扰性能,整体误差控制在1.2%以内,展现了该系统的实用性和可靠性。

关键词:非侵入式;电涡流;双线圈;差频;电导率测量

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420

Contactless differential frequency electrolyte solution conductivity measurement system

Hua Yiming Wu Shuai Zhang Jun Zhu Jianping Lyu Chunfeng

(School of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the problems of polarization of the measuring electrode and contamination of the measured solution in the traditional contact electrolyte solution conductivity measurement, a non-invasive double-coil electrolyte solution conductivity measurement system based on eddy current effect is proposed. Through the establishment of a finite element analysis model, the effects of excitation frequency and coil geometry parameters on the sensitivity of the measurement system are discussed in depth, which provides a theoretical basis for the design of the system probe as well as the error analysis. In the experimental part, the coil probe parameters are optimized, and the FPGA-based dual-coil differential-frequency type measurement system is built, which is capable of converting inductance changes into frequency changes and realizing digital signal output. The dual-coil consists of a detection coil and a reference coil, in which the detection coil is used to measure the measured solution, the reference coil is far away from the measured solution and is only affected by the environment, and the signals of the two are realized as differential outputs, which can eliminate external interference. Comparison experiments show that the system can effectively measure different conductivity solutions, which verifies the correctness of the simulation model. Further temperature and anti-interference experiments show that the dual-coil differential structure significantly enhances the anti-interference performance of the system while ensuring the measurement accuracy, and the overall error is controlled within 1.2%, which demonstrates the practicality and reliability of the system.

Keywords: contactless; double coil; eddy current; differential frequency; conductivity measurement

0 引言

电解质溶液电导率测量在化学实验分析、水质环境

监测、农业土壤样品检测、食品安全评估、生物医学工程等领域应用广泛。电解质溶液的电导率检测主要分为侵入式(电极式)测量法和非侵入式(电磁、电容式)测量法。

传统的电极式电导率传感器为接触式测量^[1],电极与电解质溶液接触后会产生微小电解,容易对待测溶液的成分产生影响。若电极长时间在恶劣环境下使用易发生污损和腐蚀,可能会影响实验精度,导致测量误差。而电磁式测量是非侵入式且无污染的电导率测量方法,所以不存在电极污染和对测溶液产生影响等问题。

非侵入式电导率测量主要分为电容耦合式测量(capacitively coupled contactless conductivity detection, C⁴D)和电涡流感应式测量。近年来,国内外学者针对不同检测目标,利用电容耦合式电导率测量进行了一些研究。Wei 等^[2]提出了一种基于 C⁴D 的土壤速效养分含量检测方法,其样品测试相对偏差小于 20%。Wang 等^[3]提出将 C⁴D 应用在分离血清中的金刚烷及类似物,实验在 1 min 内从水溶液和复杂基质中成功提取了金刚烷及类似物。汪毅峰等^[4]为了解决目前心电图采集需要电极与皮肤贴合的情况,设计了一种可以隔着多层绝缘介质还对信号保持较高耦合率的电极,其采集结果与标准结果相似度在 91% 以上。Hoang 等^[5]将 LC 无线传感结构集成在微流控平台中,该设备能较好地检测 0.01 ~ 1 mol/L 的 NaCl 溶液电导率。熊浩等^[6]在探测线圈与电解质溶液中插入一只由线圈及电容元件组成的无源线圈,通过对无源线圈介入前后的敏感特性分析,发现无源线圈可显著提高传感器灵敏度。刘宁等^[7]提出了一种基于磁耦合谐振的电导率测量模型,推导出适用于海水电导率测量的回路补偿公式。Hu 等^[8]设计五电极 C⁴D,并在电极之间增加了铜网作为接地屏蔽,减少了杂散电容的干扰。电容耦合式测量由于原理的限制,被测容器多为小尺寸管道,使用环境受限且测量量程也偏小。

而涡流感应式传感器不受被测容器限制,可以保持被测样品的原有形状。Chen 等^[9]使用 LC 谐振器作为测量探头,利用探头的谐振频率与谐振电阻之比与电导率的对数成线性关系来表征材料的电导率,该方法测量电导率的相对误差在 5% 以内。Feldkamp 等^[10]发现在单线圈结构下,线圈沿其轴线的一部分空间的涡流非常微弱,使用图像重建算法发现了涡流微弱处所在。Mizukami 等^[11]将涡流探头信号表示为碳纤维复合材料各向异性电导率的函数,并利用其阻抗变化估计了材料的各向异性电导率,其平均误差为 0.6 S/m。周海婷等^[12]针对扩散氢在材料内部渗透引起的氢脆问题,提出了一种基于涡流信号的表征方法,得到在时谐电磁场作用下涡流信号与氢脆程度呈线性相关的结论。Xie 等^[13]提出了一种基于扫频策略的电导率测量方法,利用交叉频率与电导率成反比的特性可准确测量电导率。孙斌等^[14]对传感器系统频率、线圈间距、匝数等主要参数进行理论分析,得到了使输出电压稳定的最佳频率段。袁恺涵等^[15]通过改进信号处理电路,将压控振荡器应用于涡流信号提

取,其测量系统灵敏度约为 44.5 Hz/(S·m⁻¹)。

由于传统电极式测量是一个较为繁琐的电化学系统,该系统极易腐蚀电极,而基于电容耦合式的电导率测量虽然避免了电极极化与腐蚀,但多应用于小尺度管道且易受干扰。基于上述研究,设计了一种双线圈结构的涡流感应式电导率测量系统,该系统为非侵入式测量,且不受被测容器影响。系统将压控振荡器应用于涡流信号提取,利用线圈电感的变化来测量溶液电导率的大小,具体分析了影响测量系统的关键因素,并根据分析结果搭建了双线圈差频式测量系统,并通过实验验证了测量方法的可行性。

1 非侵入式电导率测量系统工作原理

非侵入式电导率测量系统是基于涡流感应的双线圈检测系统。测量系统由两个相同的线圈组成,其中检测线圈接近被测溶液,参考线圈保持与被测溶液以及检测线圈足够远的距离,以实现差动功能,消除外界干扰。在高频的激励电流驱动下,检测线圈产生交变磁场,将电解质溶液置于检测线圈的下方,电解质溶液的外表面感应出涡流,同时电解质溶液中的涡流会产生一个新的方向相反的二次磁场来阻碍原磁通的变化,从而影响检测线圈的阻抗^[16]。测量系统等效模型如图 1 所示。

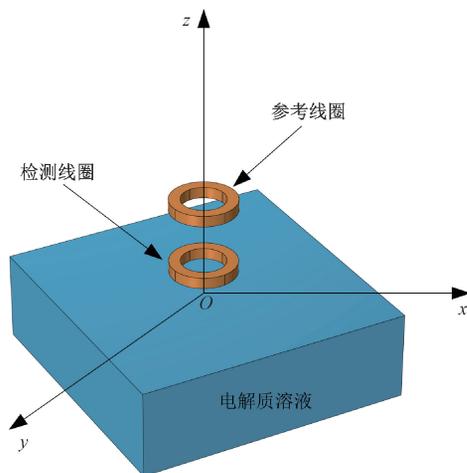


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

非侵入式差频电导率测量系统的等效电路如图 2 所示,其中 \dot{U} 为检测线圈激励电压, C_1 为检测线圈电路谐振电容, R_a 、 R_b 、 L_a 、 L_b 分别为检测线圈等效电阻、电解质溶液等效电阻,检测线圈等效电感和电解质溶液等效电感, M 为检测线圈与电解质溶液间的互感。 \dot{U}' 、 C_1' 、 R_a' 、 L_a' 分别为参考线圈的激励电压、参考线圈电路谐振电容、参考线圈等效电阻和参考线圈等效电感。参考线圈放置

在当外界环境改变时,其受到影响与检测线圈相同的位置以消除干扰,同时参考线圈与检测线圈不会发生互感,也不会对被测电解质溶液产生涡流效应。

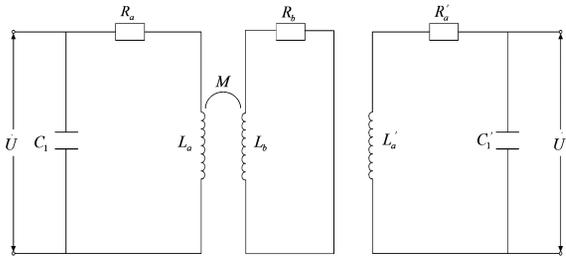


图2 电导率测量系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit for conductivity measurement system

由上述分析可将线圈阻抗用函数表示为 $Z = (\mu, \sigma, r, d, \dot{I}, f, \dots)$ 。由此可见,线圈阻抗的影响因素有很多,如电解质溶液的磁导率 μ 、电导率 σ 、几何形状 r 、线圈到被测物的距离 d ,以及电流 \dot{I} 、激励频率 f 等参数。在实际测量中若保持除被测物电导率 σ 以外的参数恒定不变时,线圈阻抗变化即可成为电导率变化的单变量函数,从而实现电导率的测量。

2 非侵入式电导率测量系统仿真分析

2.1 有限元仿真模型建立

非侵入式电导率测量系统的关键结构参数可以先通过有限元仿真来确定。与经验法、解析法相比,利用有限元分析法可有效减少缩短研制周期,加快实验进程。实验使用专业电磁仿真软件 COMSOL 建立非侵入式电导率测量系统的仿真模型。COMSOL 建模流程图如图3所示。

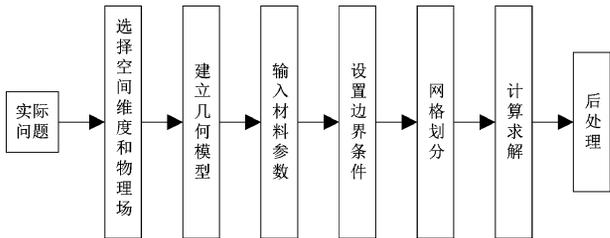


图3 COMSOL 建模流程

Fig.3 COMSOL modeling flowchart

非侵入式电导率测量系统的二维轴对称仿真等效模型如图4所示。其中参考线圈仅受环境影响,其阻抗值当做常数处理。为了提高仿真模型的运行效率,可以以检测线圈—待测溶液为检测对象,电解质溶液等效为一个半无限大导体,检测线圈和参考线圈简化为具有矩形截面的圆柱体,空气域等效为半圆形来建立,其中线圈外

半径 r_1 ,内半径 r_2 ,厚度为 h 。

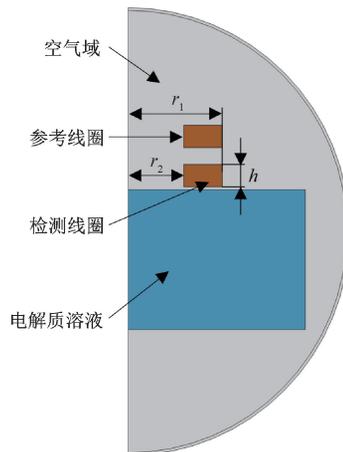


图4 COMSOL 二维轴对称模型

Fig.4 COMSOL 2D axisymmetric model

2.2 线圈参数规律分析

1) 激励频率对电感变化的影响

非侵入式电导率测量系统的主要研究对象为检测线圈阻抗变化,重点研究线圈电感变化量 ΔL_a 的规律。激励频率的大小直接影响着电涡流透射深度 δ 和检测线圈电感变化量 ΔL_a 。故在非侵入式电导率测量系统的结构设计前需要对激励频率先进行仿真分析,获得最适合的激励频率。检测线圈电感变化量与激励频率的相关性如图5所示。

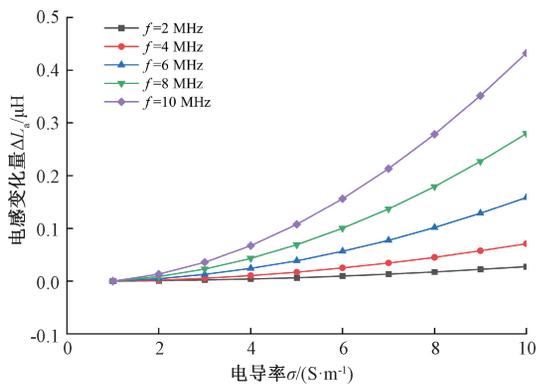


图5 检测线圈电感变化量与激励频率的相关性

Fig.5 Correlation between detected coil inductance variation and excitation frequency

线圈电感变化量由激励频率、线圈形状、几何参数等因素共同影响,由图5可知,随着激励频率的提高,电感变化量迅速提升^[17-18]。同时,激励频率的提高也会带来线圈电阻的变化。线圈电阻 R_0 与激励频率的相关性如图6所示。分析图6,随着线圈激励频率的提高,线圈电阻快速增长。这是由于趋肤效应^[19],如式(1)所示,随着

激励频率的增加,电流越发趋向于从导体的外表面通过,此时线圈电阻也会增大,功耗增加,影响线圈探头使用寿命。因此不能为了增加灵敏度而一味增加激励频率。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1)$$

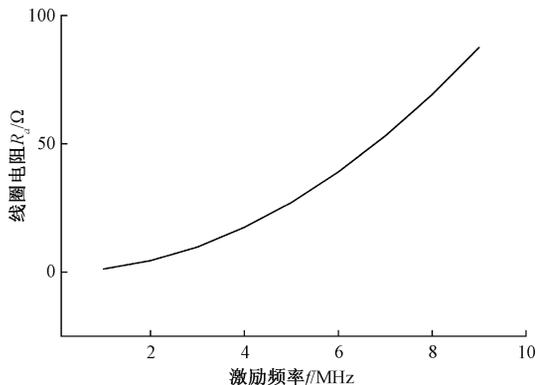


图 6 检测线圈电阻与激励频率的相关性

Fig. 6 Correlation between detected coil resistance and excitation frequency

2) 线圈几何形状对电感变化的影响

检测线圈的形状影响着被测电解质溶液表面的涡流分布。为了研究线圈几何形状对电感变化的具体影响,设计了圆形、矩形以及菱形线圈,来分析不同几何形状线圈的电感变化规律。为了避免其他因素对仿真结果的影响,使 3 种线圈的体积、线宽、匝数等均相同,仅改变线圈的形状。如图 7 所示,分析 3 种不同形状的线圈对电感变化量的影响。3 种检测线圈电感变化量与线圈形状的相关性如图 8 所示。

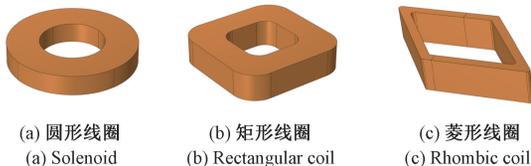


图 7 3 种线圈示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the three types of coils

由图 8 可知,矩形线圈电感变化量随电解质溶液电导率变化较明显,即 3 种线圈中选用矩形线圈灵敏度最高,菱形线圈灵敏度最低。但对线圈电阻而言,圆形线圈的电阻最小,而矩形线圈的电阻最大。考虑到线圈工艺的复杂性,不同形状的线圈下的电感灵敏度提升不明显,所以选用圆形线圈即可。

3) 线圈匝数对电感变化的影响

为研究线圈匝数与线圈电感变化量的相关性,当线圈其他几何参数固定时,分析不同线圈匝数对测量系统

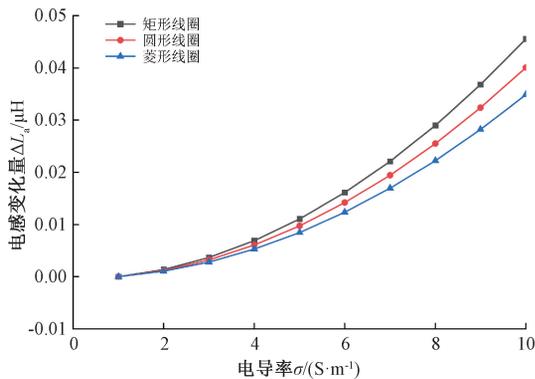


图 8 检测线圈电感变化量与线圈形状的相关性

Fig. 8 Correlation between detected coil inductance variation and coil shape

灵敏度产生的影响。检测线圈电感变化量与线圈匝数的相关性如图 9 所示。

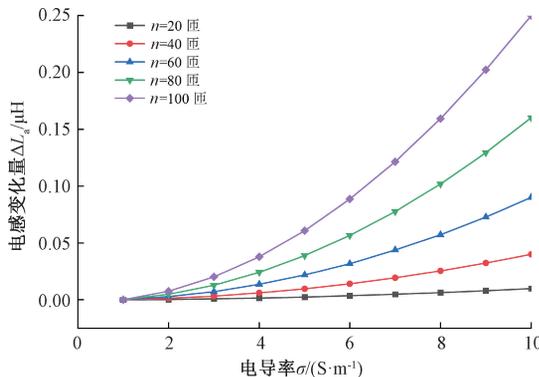


图 9 检测线圈电感变化量与线圈匝数的相关性

Fig. 9 Correlation between the amount of change in detected coil inductance and the number of turns in a coil

由图 9 可知,检测线圈电感变化量与线圈电感匝数呈现出正相关的关系,随着检测线圈匝数的增多,电感变化量急剧上升。但随着线圈匝数的增加,检测线圈的厚度也会增加,检测线圈的外围与电解质溶液的距离变远。此时需要分析在线圈匝数密度不变的情况下,线圈厚度与电感变化量的相关性。检测线圈电感变化量与线圈厚度的相关性如图 10 所示。

由图 10 可知,在线圈匝数密度固定的情况下,增大线圈匝数,线圈厚度也随之增大,此时电解质溶液中电感变化量增加不明显^[17]。

4) 线圈内径对电感变化的影响

线圈探头内径是影响测量系统灵敏度的关键因素。线圈内半径为 4、6、8、10 和 12 mm 时检测线圈电感变化量与电导率的相关性如图 11 所示。由图 11 可知,检测线圈电感变化量随着线圈内半径的增大而呈现增大趋势。综合考虑测量系统的灵敏度和和便携性,线圈内径不应过大。

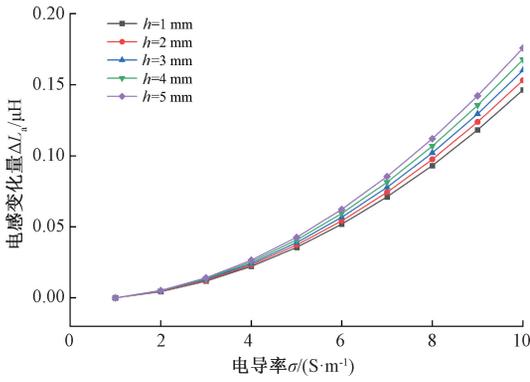


图 10 检测线圈电感变化量与线圈厚度的相关性
Fig. 10 Correlation between the amount of change in detected coil inductance and the coil thickness

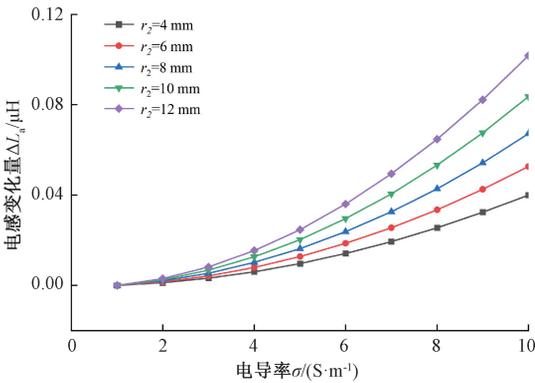


图 11 检测线圈电感变化量与线圈内径的相关性
Fig. 11 Correlation between the amount of change in detected coil inductance and coil inner diameter

3 电导率测量系统硬件设计

因为仿真模型只能分析出线圈电感变化规律,但在实际测量中很难直接测得线圈电感变化量,因此在测量电路中需要将电感变化量转换为电压或者频率变化输出,以便观测。与之对应的测量电路有调幅式测量电路和调频式测量电路两大类。在调幅式测量电路中,通过固定频率的振荡电路供电,当被测溶液电导率发生变化时,检测线圈上电压值相应的发生变化,此时经过同步解调检波器后,转换为模拟电压输出,由此实现电导率测量。在调频式测量电路中,当被测目标电导率变化引起的线圈电感变化时,将使得谐振电路的谐振频率产生变化,调频电路产生的调频信号经过门电路整形和同步后,进入处理电路进行计数和处理,得到其频率值。调频式测量电路的测量和传输可直接应用于数字技术,相比于调幅式测量电路来说调频式测量电路具有功耗低、速度快以及结构简单等优点,因此本文选择调频式测量电路,通过测量频率变化即可得到与之对应的电导率值。

非侵入式差频电解质溶液电导率测量系统由线圈探头,信号处理模块,FPGA 测频模块等模块组成。首先将线圈探头紧贴容器壁,保持测量过程中与溶液的间距不变。利用压控振荡器生成激励信号,由于电涡流效应,溶液产生的二次磁场会对激励信号产生一定影响,将受到影响的激励信号进行放大,整形,降噪,最后送入 FPGA 中进行计算。其中测频模块采用全同步测频法对信号频率进行计数,通过信号频率变化来计算溶液电导率浓度。测量系统框图如图 12 所示。

非侵入式差频电解质溶液电导率测量系统由线圈探头,信号处理模块,FPGA 测频模块等模块组成。首先将线圈探头紧贴容器壁,保持测量过程中与溶液的间距不变。利用压控振荡器生成激励信号,由于电涡流效应,溶液产生的二次磁场会对激励信号产生一定影响,将受到影响的激励信号进行放大,整形,降噪,最后送入 FPGA 中进行计算。其中测频模块采用全同步测频法对信号频率进行计数,通过信号频率变化来计算溶液电导率浓度。测量系统框图如图 12 所示。

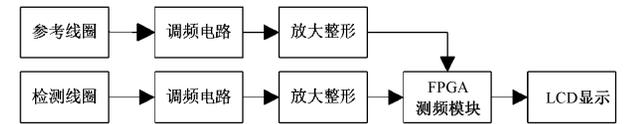


图 12 测量系统框图

Fig. 12 Block diagram of the measurement system

3.1 信号处理电路

信号处理模块由压控振荡电路,放大电路和过零比较电路组成。信号处理电路如图 13 所示。

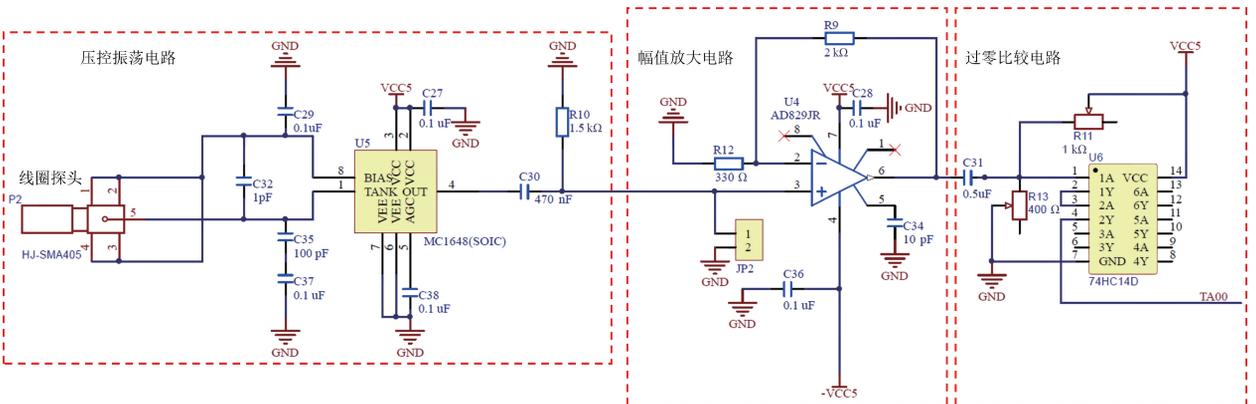


图 13 测量系统框图

Fig. 13 Block diagram of the measurement system

振荡电路以压控振荡器 MC1648 为核心,利用其压控特性在输出 4 脚产生频率信号,组成电感检测电路,可间接测量线圈电感。在线圈处并联小电容可以提高测量稳定性,并增加多处电容对信号进行滤波处理。实验所用的 FPGA 开发板使用的是 TTL 电平,而振荡电路输出信号幅值约为 0.4 V,所以不能被 FPGA 识别,需要对输出信号幅值进行放大处理。放大电路以高速运算放大器 AD829 为核心,输出噪声低,经过放大后的信号幅值约为 2.4 V,符合实验要求。振荡电路输出信号为正弦波信号,并且经过放大电路后的信号噪声较大,所以需要将正弦波信号转换为方波信号。过零比较电路采用施密特触发器 74HC14,将正弦波信号转换为方波信号。综合考虑,优化后的测量系统线圈探头参数如表 1 所示。

表 1 实验线圈参数

Table 1 Experimental coil parameters

线圈参数	数值
激励频率 f /MHz	3
外半径 r_1 /mm	12
内半径 r_2 /mm	8
厚度 h /mm	3
线径/mm	0.2
匝数/ n	80
提高高度/mm	1.5

3.2 FPGA 信号采集模块

测量系统采用 EP4CE10F17C8 作为主控芯片对信号处理电路的输出信号进行采集,利用全同步测频法对信号频率进行测量,根据系统输出的频率变化来测量出电导率的差异。为了消除空气,温度等外界因素的影响,采取了双线圈结构,通过差动的方式,提高测量的稳定性。FPGA 及其外围电路框图如图 14 所示。

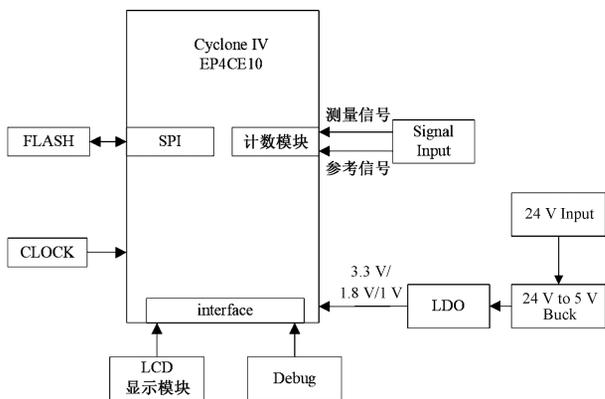


图 14 FPGA 系统框图

Fig. 14 FPGA system block diagram

测量系统对检测线圈采集的信号频率进行测量,再通过标定处理将信号输出频率转化为溶液电导率的大小,所以对信号频率的精准测量是研究的关键。系统采用全同步测频法进行测频,其原理如图 15 所示。

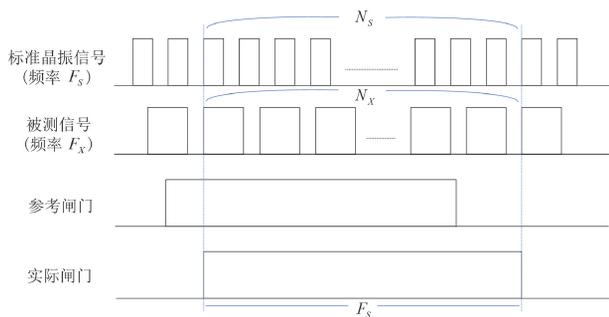


图 15 全同步测频法原理

Fig. 15 Schematic diagram of the fully synchronized frequency measurement method

图 15 中 F_s 、 F_x 、 T_s 分别为标准晶振信号频率、被测信号频率、实际闸门时间,设定被测信号每次上升沿触发一次脉冲,实际闸门时间内脉冲个数为 N_x ,标准晶振信号脉冲个数为 N_s ,由于两路信号实际闸门时间相同,被测信号频率 F_x 为:

$$F_x = \frac{N_x}{N_s} F_s \quad (2)$$

在一次测量中,当参考闸门开启时,计数器先不开始计数,当被测信号上升沿到来时,两组计数器同时对被测信号和标准频率信号进行计数,当参考闸门信号关闭时,计数器先不停止计数,计数器等到被测信号上升沿到来时才停止计数,该方法可以有效消除 ± 1 周期计数误差,实现频率的精准测量^[20]。

4 实验性能分析

为验证本文的仿真实论,搭建了完整的非侵入式电导率测量系统。系统主要包括上位机、示波器、FPGA 及显示模块、线圈探头、电解质溶液和电路板。电导率测量系统实验平台如图 16 所示。

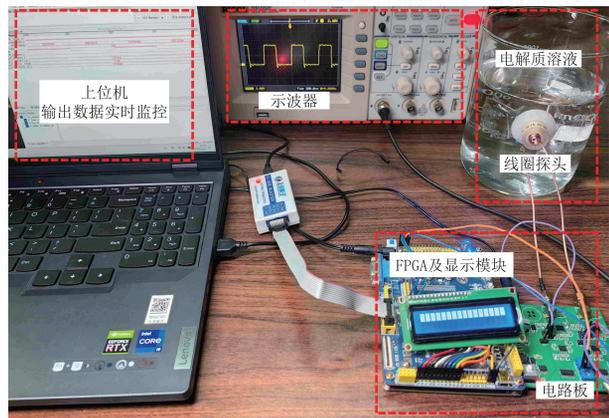


图 16 电导率测量系统实验平台

Fig. 16 Conductivity measurement system experiment platform

实验通过在室温下配置不同浓度的 NaCl 溶液来作为被测溶液进行测试。溶液配制完成后使用上海雷磁 DDSSJ-307A 电导率仪标校溶液的电导率,该仪器电导率量程为 $0 \sim 10 / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ 、在环境温度 $0 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下测量误差小于 1%,可自动切换量程,且拥有自动温度补偿和电导电极常数补偿功能。电导率仪实物如图 17 所示。



图 17 雷磁 DDSSJ-307A 电导率仪

Fig. 17 DDSSJ-307A conductivity sensor

4.1 非侵入式电导率测量系统验证实验

测量系统有两个相同的线圈,一个检测线圈和一个参考线圈。设检测线圈信号经处理后得到的频率为 f_1 ,参考线圈输出频率为 f_2 ,由于检测线圈与参考线圈参数一致,因此在没有被测对象时 $f_1 = f_2 = f_s$,此时系统输出其差值 $f_1 - f_2 = 0$ 。当检测线圈接近被测溶液开始测量时,检测线圈的输出频率为 $f_1 = f_s + \Delta f$,而参考线圈不受被测物以及检测线圈的影响,输出频率仍为 $f_2 = f_s$,此时系统的输出值 $\Delta f = f_1 - f_2 \neq 0$,此频率差值直接与被测溶液电导率相关。而当外界环境如温度发生改变时,检测线圈与参考线圈同时受到影响且影响程度相同,可知两个线圈输出频率改变程度均为 Δf_i ,经系统处理差动输出后即可消除干扰,系统输出值仍为 $\Delta f = f_1 + \Delta f_i - (f_2 + \Delta f_i)$ 。由此可见,采用双线圈差频结构的测量系统在实现了频率测量的同时也消除了由于外界环境变化带来的干扰。

实验在室温下随机配置不同浓度的 NaCl 溶液且覆盖大部分测量范围的方式,利用该测量系统进行标定,经过拟合得到的标定曲线与仿真曲线进行比较。仿真曲线和标定曲线如图 18 所示。

由于线圈工艺的限制和系统的误差,实际线圈电感要小于仿真值。由图 18 可知,测量系统输出结果与仿真结果趋势一致,可以验证仿真的准确性。同时,也给出了 6 组实际测量的结果。其中标定曲线与实际测量的误差如表 2 所示。

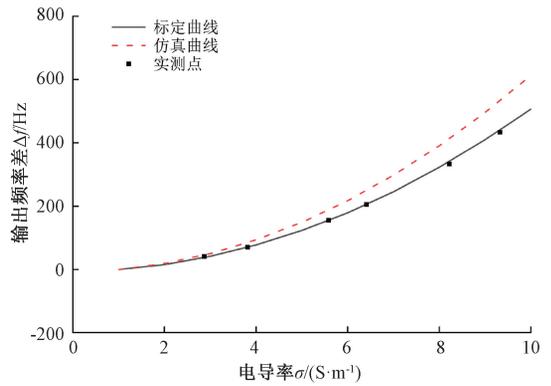


图 18 标定曲线与仿真曲线

Fig. 18 Calibration and simulation curves

表 2 实测结果与误差

Table 2 Test results and errors

标准电导率/ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	输出频率 $\Delta f / \text{Hz}$	拟合电导率/ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	相对误差/%
2.87	41	2.90	1.04
3.81	70	3.78	-0.79
5.58	156	5.61	0.53
6.41	206	6.42	-0.16
8.22	334	8.13	-1.11
9.32	434	9.25	-0.76

由表 2 可知,在所有实验点上,测量误差均小于 1.2%。这说明该系统可以实现较精确的电导率测量。将拟合曲线输入到 FPGA 中,系统输出即为电导率。

4.2 温度特性实验

为测试非侵入式电导率测量系统的温度特性,设计了一组对称实验。通过该改变控温仪的温度,测量温度从 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 升到 $35 \text{ } ^\circ\text{C}$,每隔 $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 设置 1 次,控温 5 min 后,使用该系统重新对电解质溶液电导率进行测量。为了减小实验的系统误差,使用同样的步骤再进行 1 次 $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 降到 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的对称实验,重复进行测量,同时对升温 and 降温的各温度点的电解质溶液电导率重新进行标定。实验使用国华仪器公司的 HH-4 型数显恒温水浴锅进行控温,该水浴锅可实现室温至 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的控温,且误差不超过 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$,工作中水温均匀,有温度偏差警报和定时功能。取升温 and 降温两次测量的平均结果作为实测点。温度特性实验结果与误差如表 3 所示。

表 3 温度特性实验结果与误差

Table 3 Temperature characterization results and errors

温度/ $^\circ\text{C}$	标准电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	拟合电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	相对误差/%
25	4.34	4.38	-0.92
27	4.51	4.47	-0.89
29	4.71	4.74	0.64
31	4.92	4.87	-1.02
33	5.2	5.25	0.96
35	5.49	5.54	-0.91

由表 3 可知,在各个温度节点下的非侵入式电导率测量系统对于电解质溶液电导率的测量效果一致,且误差均低于 1.2%。因此可以说明此系统在不同温度下可以保证稳定测量。

4.3 抗干扰实验

为测试系统的抗干扰性,实验过程中,将电机靠近测量系统 10 cm 处,在 10 s 时开启电机,20 s 时关闭电机。双线圈差频式测量和单线圈式测量对比结果如图 19 所示。

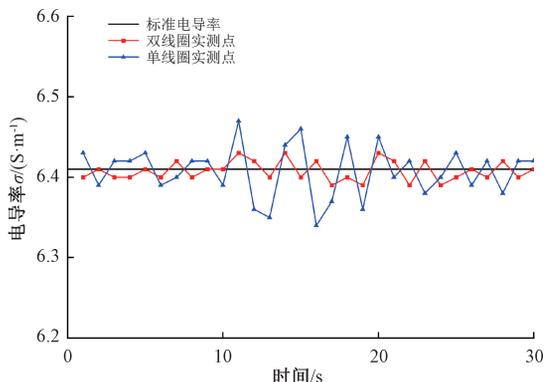


图 19 抗干扰实验结果

Fig. 19 Anti-interference experiment results

由图 19 可知,单线圈模式下的输出电导率受到干扰较大,而双线圈差频式测量的电导率输出几乎不受到干扰,且总体误差在 1.2% 以内,从而证明双线圈差频模式测量具有良好的抗干扰性。

5 结 论

提出了一种基于电涡流的双线圈差频式电解质溶液电导率测量系统,设计了基于线圈电感变化的测量结构,通过理论分析及有限元仿真,分析并优化了系统设计的关键参数。并根据优化结果搭建了电解质溶液电导率测试平台,进行实验验证。结果表明,测量系统的相对误差均小于 1.2%,验证了电导率测量的可行性与仿真实理论的有效性。且双线圈结构的测量系统的抗干扰性明显优于传统单线圈结构。该系统实现了非侵入式测量,且不受被测容器形状限制,可应用于强酸强碱等恶劣环境中。系统由于基准频率稳定性不够,差频测量电路输出频率在小范围内仍有抖动,因此进一步提高测量电路的稳定性以及灵敏度是未来的工作重点。理论分析中双线圈探头的仿真分析和优化对高精度涡流感应式电导率传感器具有一定的参考意义,未来的检测线圈可以设计为 PCB 线圈或者 FPC 线圈来实现测量的便捷性。

参考文献

[1] 苏淑靖,郭杨盛,吴梦香,等. 一种高精度量程自适

应电导率检测电路[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3): 137-144.

SU SH J, GUO Y SH, WU M X, et al. High-precision self-calibrating range adaptive conductivity detection circuit[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 137-144.

[2] WEI Y Y, WANG R J, ZHANG J Q, et al. Partition management of soil nutrients based on capacitive coupled contactless conductivity detection [J]. Agriculture, 2023, 13(2): 313.

[3] WANG ZH R, HSIEH M M, SUNG Y Y. Ultrasensitive determination of underivatized adamantane analogs in biological fluids by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection [J]. Microchemical Journal, 2021, 169: 106602.

[4] 汪毅峰,李江涛,徐峥一,等. 基于电容耦合式电极的非接触式 ECG 采集方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 138-147.

WANG Y F, LI J T, XU ZH Y, et al. A non-contact ECG measurement method based on capacitance coupling electrodes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 138-147.

[5] HOANG B A, TRAN THANH H, NGUYEN THI NGOC H, et al. A wireless passive capacitively coupled contactless conductivity detection (WPC4D) for microfluidic flow monitoring [C]. 2021 IEEE Sensors, 2021.

[6] 熊浩,董永贵. 无源线圈在电磁感应溶液测量中的增强效应[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 721-729. XIONG H, DONG Y G. Enhancement effect of a passive coil in electromagnetic induction solution measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 721-729.

[7] 刘宁,王韬,王海涛,等. 基于磁谐振测量海水电导率的模型分析[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(8): 61-67.

LIU N, WANG T, WANG H T, et al. Model analysis of seawater conductivity measurement based on magnetic coupling resonance[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(8): 61-67.

[8] HU CH Q, XIE B, LI H M, et al. A five-electrode capacitively coupled contactless conductivity detector with a low limit of detection[J]. Analytical Methods, 2023, 15(18): 2253-2261.

[9] CHEN W, WU D. Resistance-frequency eddy current method for electrical conductivity measurement [J]. Measurement, 2023, 209: 112501.

[10] FELDKAMP J R, QUIRK S. Coil geometry effects on

- scanning single-coil magnetic induction tomography [J]. *Physics in Medicine Biology*, 2017, 62(17): 7097-7113.
- [11] MIZUKAMI K, WATANABE Y, OGI K. Eddy current testing for estimation of anisotropic electrical conductivity of multidirectional carbon fiber reinforced plastic laminates [J]. *Composites Part A*, 2021, 143: 106274.
- [12] 周海婷, 叶东东, 朱晨曦, 等. 材料氢脆涡流评价的有限元仿真研究 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(21): 156-160.
ZHOU H T, YE D D, ZHU CH X, et al. Finite element simulation study on eddy current evaluation of material hydrogen embrittlement [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(21): 156-160.
- [13] XIE Y, HUANG P, DING Y, et al. A novel conductivity measurement method for non-magnetic materials based on sweep-frequency eddy current method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-12.
- [14] 孙斌, 倪爽, 朱青, 等. 低耦合电磁式电导率测量系统的传感器优化设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(2): 131-138.
SUN B, NI SH, ZHU Q, et al. Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(2): 131-138.
- [15] 袁恺涵, 朱武. 非侵入式电解质溶液电导率测量的研究 [J]. *电子设计工程*, 2024, 32(9): 80-84.
YUAN K H, ZHU W. Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system [J]. *Electronic Design Engineering*, 2024, 32(9): 80-84.
- [16] 李博阳, 廖柯熹, 何国玺, 等. 弱磁检测技术研究进展与展望 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(3): 1-14.
LI B Y, LIAO K X, HE G X, et al. Research progresses and prospects of weak magnetic testing technology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(3): 1-14.
- [17] 李满宏, 王经天, 吴玉, 等. 电涡流传感器性能优化关键技术 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 233-243.
LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 233-243.
- [18] 郭文超, 陈昌鑫, 马铁华. 线圈参数对大半径涡流传感器性能的影响 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(3): 235-239, 252.
GUO W CH, CHEN CH X, MA T H. Simulation about influence of coil parameters on performance of large radius eddy current sensor [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(3): 235-239, 252.
- [19] 金超武, 叶周斌, 周瑾, 等. 磁悬浮轴承横向磁通传感器设计与分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(9): 228-238.
JIN CH W, YE ZH CH, ZHOU J, et al. Design and analysis of the transverse flux sensor of active magnetic bearing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 228-238.
- [20] 缪凯祥, 石磊, 王刚毅, 等. 基于 FPGA 的多通道自适应频率测量方法 [J]. *船舶工程*, 2019, 41(6): 86-90, 134.
LIAO K X, SHI L, WANG G Y, et al. Measurement method of multi-channel self-adapting frequency based on FPGA [J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(6): 86-90, 134.

作者简介



花一鸣, 2022 年于铜陵学院获得学士学位, 现为上海海洋大学硕士研究生, 主要研究方向为智能感知技术。

E-mail: yiminghua0107@163.com

Hua Yiming received his B. Sc. degree from Tongling University in 2022. He is now a M. Sc. candidate at Shanghai Ocean University. His main research interest includes perceptive technology.



吕春峰 (通信作者), 2014 年于上海交通大学获得博士学位, 现为上海海洋大学副教授, 主要研究方向为智能感知技术。

E-mail: cflv@shou.edu.cn

Lyu Chunfeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University. He is now an associate professor at Shanghai Ocean University. His main research interest includes perceptive technology.