

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306814

低耦合电磁式电导率测量系统的传感器优化设计*

孙斌 倪爽 朱青 陈小惠

(南京邮电大学自动化学院 南京 210046)

摘要:针对电磁式电导率传感器在低电导率测量下的优化设计问题,分析了电磁式电导率传感器的工作原理并构建了物理模型,考虑激励信号参数、磁芯尺寸、磁芯间距、激励线圈匝数和接收线圈匝数对输出电压的影响,改进现有的电磁式电导率测量模型,同时考虑激励频率的多重性,即激励频率直接影响输出电压,又通过磁致伸缩效应改变磁芯磁导率来影响输出电压。采用实验与理论相对比的方法,对频率、间距、匝数等主要参数进行理论分析,得知存在最佳频率段使得输出电压不随频率的波动产生较大的变化,通过改变间距降低两个磁芯间的耦合电压,提高有效信号占比,实现更高的精确度。并通过实验验证证明了理论模型的准确性。采用优化后的参数来设计电导率探头,配置了电导率标准液用于数据拟合,与德国宝德电导率仪进行对比实验,计算 Pearson 相关系数,证明了优化模型的准确性与高可靠性。

关键词: 低电导率;磁致伸缩;优化参数

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

Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system

Sun Bin Ni Shuang Zhu Qing Chen Xiaohui

(School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: This paper addresses the optimization design problem of electromagnetic conductivity sensors for low conductivity measurements. The working principle of electromagnetic conductivity sensors is analyzed, and a physical model is constructed. The influence of excitation signal parameters, magnetic core dimensions, core spacing, excitation coil turns, and receiver coil turns on the output voltage is considered. An improved model for electromagnetic conductivity measurement is proposed, taking into account the multiplicity of excitation frequencies. Specifically, the excitation frequency directly affects the output voltage and also modifies the magnetic permeability of the core through the magnetostrictive effect, thereby influencing the output voltage. Theoretical analyses of the main parameters, such as frequency, spacing, and turns, are conducted using a comparative approach with experimental results. It is found that it exists an optimal frequency range where the output voltage remains relatively stable despite fluctuations in frequency. By adjusting the spacing between the two magnetic cores, coupling voltage between them is reduced, resulting in a higher proportion of effective signals and improved accuracy. The accuracy of the theoretical model is verified through experimental validation. Furthermore, the optimized parameters are employed in the design of a conductivity probe, which is calibrated using conductivity standard solutions. Comparative experiments are conducted with a German-made conductivity meter from Bode to calculate the Pearson correlation coefficient, demonstrating the accuracy and high reliability of the optimized model.

Keywords: low conductivity; magnetostrictive; optimal parameters

0 引言

电导率作为液体中电导性能的量化指标,对于工业和科学领域都具有重要的应用价值。传统的电极法、化学分析法等方法需要取样分析,工作效率低且容易受到干扰。电磁式电导率传感器采用非接触式测量原理,不需要取样,能够快速准确地测量液体电导率,具有高精度、高稳定性和高灵敏度等优点。因此,在液体电导率测量领域中,电磁式电导率传感器逐渐成为主流。受限于电磁式电导率仪的结构和原理影响,低电导率的测量是重中之重。高电导率测量时,输出信号大,干扰信号占比小,此时测量精度高,电导率较低时,干扰信号占比高,此时测量难度大。低耦合式电导率仪也是未来发展的主流方向,低耦合式能提高低电导率测量时输出有用信号占比,削弱耦合磁芯间的耦合电压。

张嘉泓等^[1]对电磁感应式电导率传感器的多参数性能做了研究,有助于提高信号的准确度与分辨率;兰卉等^[2-4]持续探究提高传感器灵敏度和精度的方法;Hui等^[5]提出一种虚拟短路的方法来尽可能的减少磁环磁导率变化对输出的影响;张川等^[6]探究了磁场对于电导率传感器的影响,提出对外部磁场需要进行屏蔽;翟昆等^[7]和叶康平等^[8]探究了铁氧体材料的吸波作用,证明其可以用在对磁场的吸收上;陈旭等^[9]探究复杂环境下精确测量的问题,构建了高还原的物理模型;窦振宇等^[10-13]对于多种材料的电磁屏蔽研究,对屏蔽材料的选择提供了依据;苏淑靖等^[14-17]提出了一种高精度量程自适应检测电路,对于量程的提高有显著效果,并且依旧保持高灵敏度;何旭刚等^[18]针对电导率传感器存在邻近效应的问题,优化设计了一种非外部场传感器,提高了感应式电导率传感器测量准确度;葛声波等^[19]对于温度补偿、量程切换深入研究,实现了检测系统的高精度;高山川^[20]结合单片机作为控制核心,采用双频正弦信号实现电导率测量,并结合温度补偿,实现电导率的高精度测量;在提高传感器灵敏度和精度方面,已有研究工作,但仍需要更深入的探索和改进。本文考虑了耦合电压的影响,并探究频率的多重性,实现更高的精度和准确度。

电磁式电导率仪精度受环境影响比较大,温度和磁场都会影响其测量结果。电磁式电导率仪需要电流通过被测介质以产生磁场,而低电导率液体对电流的传输存在很大的阻抗,因此电磁式电导率仪在低电导率测量时普遍存在灵敏度差的问题。探究激励频率对于磁芯磁导率的影响以及降低耦合电压对传感器进行优化设计以实现低电导率的测量是本文研究的重点。根据多参数分析,优化了传感器设计方案,得到了电导率传感器的优化设计参数。自行设计了国产化电磁式

电导率测量系统,用宝德电导率仪与研制的系统进行对比实验,计算测量结果的 pearson 相关系数,证明了优化模型与宝德电导率仪存在非常强的线性相关性,可以相互替换使用。

1 电磁式电导率传感器原理

1.1 物理模型

磁芯外径为 R , 内径为 r , 磁芯高度为 h , 平均半径为 ρ , 磁芯截面图如图 1 所示。

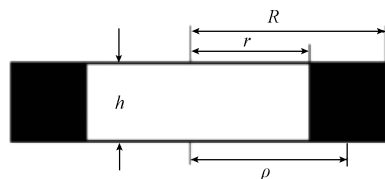


图 1 磁芯截面图

Fig. 1 Cross section view of magnetic core

在磁芯外面绕有均匀导线,叉号表示线圈向下,点号表示线圈向外。线圈绕线示意图如图 2 所示。

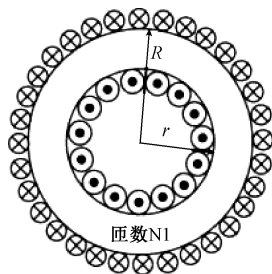


图 2 线圈绕线示意

Fig. 2 Schematic diagram of coil winding

电磁式电导率传感器由两个变压器组构成,有信号输入的是激励线圈组,输出信号的为感应线圈组。每组由磁环、导线、以及液体回路构成。本文采用相同尺寸的激励磁芯和输出磁芯,探头结构示意图如图 3 所示。

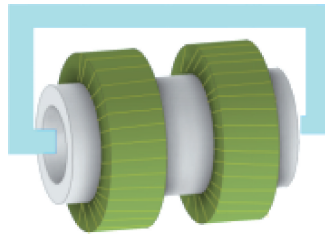


图 3 探头结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of probe structure

按照图 3 的结构构建物理模型, V_{in} 为激励信号, R_i 为激励源内阻, R_1 为激励线圈等效电阻, N_1 为激励线圈

匝数, L_1 为激励线圈自感, M_1 为激励线圈与溶液等效回路的互感, I_{in} 为激励线圈中的电流; R_2 为液体回路的等效电阻, I_2 为液体回路的电流, N_2 和 N_3 分别为液体回路在激励磁芯和感应磁芯中的匝数; N_4 为感应线圈匝数, R_3 为感应线圈等效电阻, R_o 为输出电阻, V_o 为输出电压, V_m 也被称为输出电压, I_o 为感应线圈中电流。等效物理模型如图4所示。

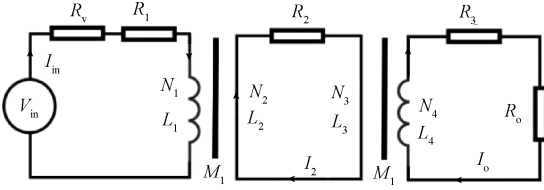


图4 等效物理模型

Fig. 4 Equivalent physical model

电磁式电导率传感器的工作原理如下。产生正弦交变信号作为激励,磁环内会产生交变磁场。液体回路穿过磁环内部,由于磁通量的变化,液体回路会激发感应电流,电流流经输出磁环,由于电流的磁效应,在输出磁环中产生交变磁场,最终输出线圈上产生感应电动势。输出的感应电动势与液体回路的电导率成正比,因此可以根据输出的感应电动势来测量溶液的电导率。

1.2 参数分析

影响输出信号的因素主要与磁芯的结构参数和信号的激励参数有关。结构参数有磁芯间距 d 、磁芯高度 h 、激励线圈匝数与感应线圈匝数以及磁芯磁导率等。激励信号参数主要有激励信号峰值和激励频率。

1.3 传递函数

激励信号为交流信号,磁场和电场的变化是周期性的,用三角函数来描述。激励电压 $V_{in} = V_m \sin(\omega t)$, 其中 V_m 为激励电压的峰值, ω 为角频率, f 为激励信号的频率。

根据安培环路定理得出:

$$H \times 2\pi\rho = N_1 I_{in} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度, ρ 为 r 到 R 之间的任意半径, N_1 为激励线圈匝数, I_{in} 为激励线圈电流。磁感应强度 $B = \mu_1 H$, μ_1 为激励磁芯的磁导率, 将式(1)代入可得激励磁芯的磁感应强度 B :

$$B = \frac{\mu_1 N_1 I_{in}}{2\pi\rho} \quad (2)$$

对磁感应强度 B 在 r 到 R 上对截面 S 进行积分可得出磁通量 Φ , 计算过程如下:

$$\Phi = \int_r^R B dS = \int_r^R \frac{\mu_1 N_1 I_{in}}{2\pi\rho} dh\rho \quad (3)$$

磁通量在复数域上展开为 $|\Phi| e^{j\omega t}$, 磁通量对时间的导数如式(6)所示:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d|\Phi| \cdot e^{j\omega t}}{dt} = j\omega\Phi \quad (4)$$

得出磁通量对时间导数增加了角速度这一变量, 也意味着频率对于磁通量对时间的导数有影响。根据磁通量可以计算出磁通链匝数以及激励线圈电感和互感, 进而计算出液体回路的电压 U :

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi}{I_{in}} = \frac{\mu_1 N_1^2 h \ln(R/r)}{2\pi} \quad (5)$$

$$U = - \frac{N_2 \Phi}{I_{in}} \frac{dI_{in}}{dt} \quad (6)$$

可得出液体回路电压的表达式, 如式(7)所示:

$$U = - \frac{\mu_1 N_1 h V_m f \times \ln(R/r)}{\sqrt{R_{in} + R_c + (\omega L_1)^2}} \cos(\omega t) \quad (7)$$

从式(7)可知液体回路电压与磁场磁导率 μ 、激励线圈匝数 N_1 、激励信号峰值 V_m 、磁芯的内径 r 、外径 R 和高度 h 、以及电源内阻、导线电阻、导线的电感值有关。由于电感值 L_1 的复杂性, 如果将电感表达式代入, 公式将会非常复杂, 此处暂不代入。

液体回路可以等效为液体柱, 用液体电导率可以计算出液体等效电阻, 计算如下:

$$R_{lq} = \frac{L_{lq}}{\sigma S_{lq}} = \frac{2h + d}{\sigma \pi r_{lq}^2} \quad (8)$$

其中, L_{lq} 为液体柱的长度, 在数值上等于两个磁芯高度 h 加上磁芯间距 d 。 S_{lq} 为液体柱的横截面积, r_{lq} 为液体柱的底部半径, 在数值上小于磁芯内径 r 。

由液体回路电压和电阻得出液体回路电流, 同理可得输出磁芯的相关参数以及输出的感应电压 V_r , 计算过程如下:

$$M_2 = \frac{\mu_2 N_4 h}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (9)$$

$$V_r = - M_2 \frac{dI_{rsp}}{dt} \quad (10)$$

考虑到输出电压由输出耦合电压与输出感应电压构成, 当探头制作完成后, 系统的耦合电压将固定不变, 因此在此处用 V_{ou} 表示耦合电压, 则输出电压 $V_o = V_{ou} + |V_r|$, 结合上述公式可得输出电压的表达式, 如式(11)所示:

$$V_o = V_{ou} + \frac{\mu_1 \mu_2 N_1 N_4 h^2}{\sqrt{R_{in} + R_c + (\omega L_1)^2}} \times \frac{f^2 V_{in} \ln(R/r)^2}{(2h + d)} (\sigma \pi r_{lq}^2) \quad (11)$$

由 V_o 的表达式可知, 忽略耦合电压后, 输出电压与磁芯磁导率、线圈匝数、激励电压峰值、频率、磁芯内外径

均有关。并且 V 与待测溶液的电导率 σ 成正比, 可以用输出电压来拟合待测溶液电导率。

2 系统设计

器材有 F10 型数字合成函数信号发生器/计数器、FLUKE 8808A 高精度万用表、DS 5062C 数字存储示波器。磁芯选用 MnZn 铁氧体和纳米晶材料来进行对照。

系统的工作流程如图 5 所示, 芯片通过 SPI 控制 AD9833 产生正弦信号, 此时信号功率小, 接了功率放大器, 将放大后的信号传入激励线圈, 由于液体电导率不同, 在输出端会产生不同的输出电压。根据此时电压的不同, 切换不同的档位来处理输出电压信号。如果输出电压比较大的, 切换高档位后, 需要对电压信号进行缩小, 原因在于有效值检测模块对输入端有限制, 大电压会烧坏有效值检测模块。对于小电压, 要进行适当的放大, 以提高系统的精确度。将正弦信号转换后, 对有效值进行差值放大, 进一步提高系统分辨率。例如有效值为 110 mV, 差值放大倍数为 50 倍, 参考电压为 100 mV, 此时经过差值放大模块后, 输出为 500 mV, 此时单片机 AD 口可以准确的转换, 否则对于微弱电压的变化, 很难提高精确度。

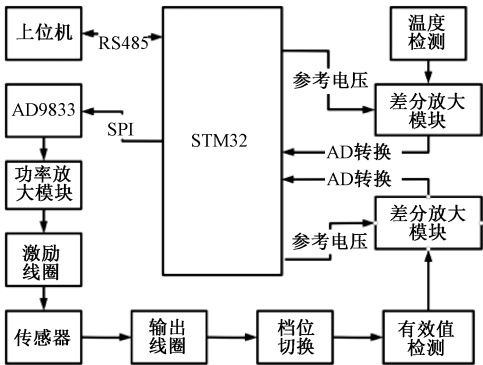


图 5 系统工作流程
Fig. 5 System workflow diagram

由于电导率受温度影响较大, 需要温度补偿系统, 设计方案于电压检测类似, 将得到的电压经过差分放大模块后 AD 转换, 然后得到具体的温度。系统由电源模块供电, 外接 220 V 转 24 V 电源适配器, 将 RS485 连接到 AB 口, 即可与上位机进行通信。图 6 为电导率激励线圈, 采用了铁氧体和纳米晶两种材质, 通过不同的匝数组合, 探究输出电压影响因素。

将激励线圈外围包裹磁场屏蔽层, 将传感器连接到指定接口, 图 7 为连接测量电路后系统连接图。



图 6 不同材质的绕线组合
Fig. 6 Winding combinations of different materials



图 7 电导率测量系统
Fig. 7 Conductivity measurement system

3 实验与讨论

3.1 频率的影响

输出电压是关于频率的复杂函数, 输出感应电压与频率的平方近似一次函数, 而液体回路电压与频率近似一次函数, 本小节选择液体回路电压来探究频率的影响。

表 1 数据是用铁氧体材料, 峰峰值 5 V, N1 为 6 匝时测得的数据, 表中随着激励频率的增加, 液体回路的激励电压随之变化, 表中记录几组典型数据, 并进行一定的计算, 得到单位频率的电压占比。

频率为 10 kHz, 峰峰值为 5 V, 磁芯高度 h 等于 7 mm, R 为 16 mm, r 为 10 mm, 总电阻测量为 0.17 Ω , 查阅此时的磁导率为 10 mH/m, 代入式 (7) 计算得出液体回路电压为 0.169 V, 与表中数据相近。

以 1 kHz 为基础频率, 5 kHz 时, 液体回路电压应为 1 kHz 时电压的 5 倍, 实际上没有达到。用液体回路电压 (单位为 mV) 除以频率 (单位为 kHz) 得到两者比值, 物

理意义为每千赫兹的液体回路电压。用不同频率的比值除以 1 kHz 的比值得到不同频率的占比。

表 1 频率与液体回路电压表

Table 1 Frequency and liquid circuit Voltmeter			
频率/kHz	液体回路电压/mV	比值	占比
1	22. 69	22. 69	1
5	102. 6	20. 52	0. 9
10	167. 4	16. 74	0. 73
50	260	5. 2	0. 23

由表 1 可知,随着频率增加,占比降低。当频率到 30 kHz 后与式(7)有着较大的差距,原因在于频率的双重性,铁氧体磁芯随着激励频率的增加,磁致伸缩效应加剧,磁芯磁导率下降,故输出电压与理论值存在差距。

因此,在频率的选择上,应将磁致伸缩效应考虑进来,不能选择过大的频率。一方面是大频率信号的产生较复杂,另一方面是大频率并不能得到高灵敏度的输出电压。经过多次实验得知,频率选择在线性增长的末端可以取得较大收益,按照上述数据,选择 30 kHz,此时放大倍数较大,磁致伸缩效应较小。

3.2 激励峰值的影响

按照式(14),随着激励峰值的增加,输出耦合电压增大,输出感应电压也增大。而耦合电压在测量低电导率溶液时是需要消除掉的,故将重点放在探究激励峰值对于输出感应电压的影响。而感应电压取决于液体回路电压,表 2 测量不同电压下,液体回路电压,并且用液体回路电压除以激励电压得到比值,数据如表 2 所示。

表 2 激励电压与液体回路电压表

Table 2 Excitation voltage and liquid circuit Voltmeter		
激励电压/V	液体回路电压/mV	比值
3	18. 28	6. 09
5	31. 27	6. 25
6	37. 8	6. 3
8	51. 26	6. 4

由于激励电压的增加,输出耦合电压也会有略微增加,忽略输出耦合电压的影响后,输出感应电压与激励电压成正比,符合构建的物理模型。

3.3 匝数及材料的影响

输出电压是关于匝数的复杂函数,随着匝数的增加,输出电压增加。但是在匝数增加的同时,激励线圈的电阻和电感也随之变大。计算出输出感应电压关于 N_1 的函数表达式:

$$V_r = \frac{K_{N_1}}{\sqrt{\frac{R_{in} + R_c}{N_1^2} + K'_{N_1} N_1^2}}$$

(12)

其中, K_{N_1} 以及 K'_{N_1} 为系数。分母存在一个最小值,输出感应电压存在一个最大值。

由于输出电压由液体回路电压决定,为了更直观的反应出匝数变化的影响,只需探究匝数对于液体回路电压的影响即可。图 8 为铁氧体材料不同匝数、频率下的液体回路电压图。

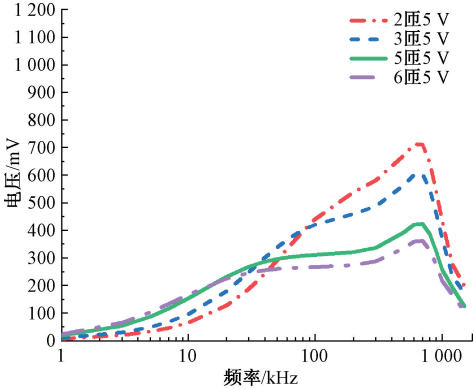


图 8 铁氧体材料不同匝数下频率与回路电压
Fig. 8 Frequency and loop voltage of ferrite materials with different turns

图 9 为纳米晶材料不同匝数、频率的液体回路电压图。

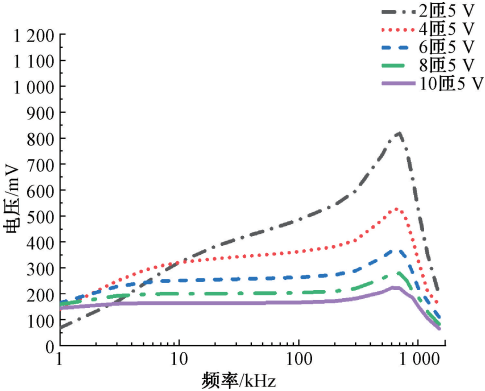


图 9 纳米晶材料不同匝数下频率与回路电压变化曲线
Fig. 9 Frequency and circuit voltage variation curves of nanocrystalline materials under different turns

匝数增加导致输出电压增加只在低频时候适用,频率高时,随着匝数增加,电压降低。匝数的另一个作用是在不同频率下输出稳定的电压,以纳米晶 10 匝为例,从 1~100 kHz 基本保持一个稳定的输出电压。而小匝数在 1~100 kHz 明显随着频率增加液体回路电压增加。

材料对于输出电压的影响以磁导率的形式呈现。由图 9 可知,纳米晶材料从 5~200 kHz 这个范围,输出电压基本呈现成直线。而铁氧体材料存在不同的上升趋势,如图 8 所示,不同匝数下随着频率的上升,其幅值增长不

同。并且输出电压不随频率改变的频率带更小。由于探头尺寸的限制,本文系统采用体积更小的铁氧体制作。

3.4 间距 d 的影响

由式(11)可知,随着磁芯间距 d 的增加,输出耦合电压减小,液体柱的长度增加,液体回路的等效电阻增加,液体回路电流减小。

便于直观的反应间距 d 对于输出电压的影响,测量随着间距 d 的增加,液体回路电压以及输出耦合电压的变化。

表 3 为频率 50 kHz,峰峰值为 5 V 时测量的部分数据。

表 3 间距与液体回路电压

Table 3 Spacing and liquid circuit voltage		
间距 d /mm	液体回路电压/mV	输出耦合电压/mV
2.5	130.4	122
4.5	130.26	84.8
7.76	130.18	70.4
14.2	130.13	52
17.1	130.1	48.8
22.4	130.8	39.2
35.5	130.5	33.6

随着磁芯间距 d 的增加,液体回路电压基本保持不变,输出耦合电压随着间距的增加迅速衰减,在间距达到 30 mm 后,下降减缓。

液体回路电压是产生输出感应电压的原因。因此输出感应电压的减小,仅因磁芯间距增加后液体柱电阻增加。总的来说,间距增加,输出耦合电压减小,输出电压减小。

3.5 对照实验

根据上述分析,制作电导率测量系统,系统采用 24 V 电源供电,选择激励信号峰值为 5 V,材料为铁氧体磁芯,磁芯内径为 22.4 mm,磁芯外径 36.3 mm,磁芯高度 15.7 mm,磁芯间距设置 5 mm,并用铁片隔开两个磁环以降低耦合电压,工作频率为 30 kHz,匝数为 6 匝,输出线圈匝数 100 匝。

配置电导率标准液,用制作好的系统进行数据拟合,数据如表 4 所示。

表 4 标准液电导率及拟合数据

Table 4 Standard liquid conductivity and fitting data	
标准电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	输出电压/mV
264	696
320	812
451	1 111
535	1 334
638	1 575

表 4 中左侧为配置的标准液的电导率,右侧为制作完成的系统在标准液下的输出电压。用最小二乘法进行数据拟合,得到输出电压与电导率的转换公式,将拟合公式写入系统中。用本机与德国宝德电导率仪作的对照实验,测量方式如图 10 所示。

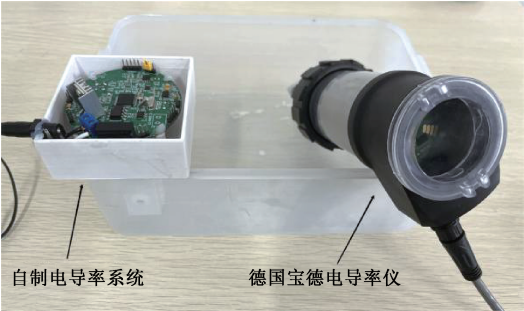


图 10 系统与宝德电导率仪对照实验

Fig. 10 Scientific control between the system and Baode conductivity meter

测量的部分数据如表 5 所示。

表 5 系统与电导率仪对照数据

Table 5 Comparison data between the system and conductivity meter		
宝德/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	本机/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	误差率/%
337	337	0
373	375	0.54
435	437	0.46
546	548	0.37
640	636	0.63
786	786	0

对于上述数据,本文采用 pearson 相关系数分析来分析数据的准确性以及稳定性。计算得知,本机与宝德电导率仪的 pearson 相关系数为 0.999 92,非常接近 1,显示这两组数据之间存在非常强的线性相关性,这进一步支持了自制系统和宝德电导率仪可以互相替代进行电导率测量的结论。

4 结 论

本文采用 MnZn 铁氧体材料,通过分析电导率仪的物理模型,研究了每一个参数对输出电压的影响,包括频率、电压、匝数、磁芯间距、磁导率等参数,证明最优参数是存在的,并选取最优参数,通过实验验证,使得系统达到预期目标,使得电磁式电导率仪的制作有理可依。

通过以上方法实现了低电导率溶液的测量,制作的电导率仪能够准确的测量低电导率,并与宝德电磁式电导率仪进行对照,误差在 1% 以内。证明了优化模型与宝

德电导率仪存在非常强的线性相关性,以及使用该模型进行测量具有高准确性与高可靠性,可以在一定程度上替代使用。

参考文献

- [1] 张嘉泓,张继军,王林军,等. 电磁感应式电导率传感器多参数性能研究[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(1): 71-79.
- ZHANG J H, ZHANG J J, WANG L J, et al. Study on the multiparameter performance of electromagnetic induction conductivity sensors [J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(1): 71-79.
- [2] 兰卉,吴晟,程敏,等. 新型感应式电导率传感器技术研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(3): 18-22.
- LAN H, WU SH, CHENG M, et al. Research on novel inductive conductivity sensor technology [J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(3): 18-22.
- [3] 陈旭,刘瑛,徐明刚,等. 一种新型电容式电导率传感器的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(8): 13-17, 80.
- CHEN X, LIU Y, XU M G, et al. Design of a novel capacitive conductivity sensor [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020(8): 13-17, 80.
- [4] WANG D, FU Y, LIU Y, et al. A comprehensive uncertainty evaluation of double-sensor conductivity probe[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 136: 103741.
- [5] HUI S K, JANG H, GUM C K, et al. A new design of inductive conductivity sensor for measuring electrolyte concentration in industrial field [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 301: 111761.
- [6] 张川,胡波. 磁场对感应式电导率传感器检定过程中的影响初探[J]. 计量学报, 2011, 32(2): 4.
- ZHANG CH, HU B. Preliminary study on the influence of magnetic field on the verification process of inductive conductivity sensor [J]. Journal of Metrology, 2011, 32(2): 4.
- [7] 翟昆. 六角铁氧体中的磁电耦合效应与相关器件研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2018.
- ZHAI K. Research on magnetoelectric coupling effect and related devices in hexagonal ferrite [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [8] 叶康平,裴文瑾,郝翔,等. 旋磁铁氧体在实现低频电磁波吸收中的作用[J]. 物理学报, 2020, 69(1): 323-331.
- YE K P, PEI W J, XI X, et al. The role of rotating magnetic ferrite in achieving low-frequency electromagnetic wave absorption [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(1): 323-331.
- [9] 陈旭,刘瑛,徐明刚,等. 一种新型电容式电导率传感器的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(8): 12-17, 80.
- CHEN X, LIU Y, XU M G, et al. Design of a novel capacitive conductivity sensor [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020(8): 13-17, 80.
- [10] 窦振宇. 取向及表面改性球磨羰基铁、铁镍高频电磁性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- DOU ZH Y. Study on high-frequency electromagnetic properties of ball milled carbonyl iron and iron nickel with orientation and surface modification [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [11] GHOSH M K, GAO Y, DOZONO H, et al. Numerical modelling of magnetic characteristics of ferrite core taking account of both eddy current and displacement current[J]. Heliyon, 2019.
- [12] PAN P, ZHANG N. Hysteresis behavior of the magnetodielectric effect in Mn-Zn ferrite [J]. Physica Status Solidi(b), 2018: 1700551.
- [13] BOGGI S, FANO W G. Numerical response and causality study of the magnetic permeability-frequency function of NiZn ferrites using genetic algorithm [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 500: 166305.
- [14] 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. A high-precision range adaptive conductivity detection circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 137-144.
- [15] 李文,张志永,吕赫,等. 一种高精度电导率水质检测传感器的设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 19-24, 5.
- LI W, ZHANG ZH Y, LYU H, et al. Design of a high-precision conductivity water quality detection sensor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 19-24, 5.
- [16] 唐桃波,余厚全,郭帅,等. 一种高精度电导率测量方法研究[J]. 仪器仪表用户, 2016, 23(9): 22-24.
- TANG T B, YU H Q, GUO SH, et al. Research on a high-precision conductivity measurement method [J]. Instrument User, 2016, 23(9): 22-24.
- [17] 王昕. 海洋盐度高精度传感器批量制备及测试[D]. 宁波: 宁波大学, 2021.
- WANG X. Batch preparation and testing of high-precision sensors for ocean salinity [D]. Ningbo: Ningbo

- University, 2021.
- [18] 何旭刚,李红志,兰卉,等. 基于非外部场的感应式电导率传感器优化设计[J]. 传感技术学报, 2022, 35(3):291-297.
- HE X G, LI H ZH, LAN H, et al. Optimization design of inductive conductivity sensors based on non-external fields [J]. Journal of Sensing Technology, 2022, 35 (3): 291-297.
- [19] 綦声波,黄霖,尹保安. 一种基于两电极体系的电导率检测系统[J]. 机电工程, 2019, 36(2):158-162.
- QI SH B, HUANG L, YIN B AN. A conductivity detection system based on a two-electrode system [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2019, 36 (2): 158-162.
- [20] 高山川. 双频正弦信号电导率测量仪设计[D]. 大连:

大连理工大学, 2010.

GAO SH CH. Design of dual frequency sine signal conductivity meter [J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

作者简介



孙斌,副教授,2008 年于江苏科技大学获得学士学位,2015 年于南京理工大学获得博士学位,主要研究方向为光电探测与信号处理。

E-mail: ffgz366@163.com

Sun Bin, associate professor, received a B. Sc. degree from Jiangsu University of Science and Technology in 2008 and a Ph. D. from Nanjing University of Technology in 2015. His main research interests include optoelectronic detection and signal processing.