

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416085

单线圈磁谐振式海水导率测量模型分析^{*}

冯书艺 刘宁 王韬

(国家海洋技术中心 天津 300112)

摘要: 针对咸潮等海水低电导率环境的测量,本文提出了一种基于磁谐振和电涡流技术的单线圈测量模型。建立了适用于单线圈磁谐振的海水涡流等效耦合电路模型,从理论上分析了涡流损耗对电路参数的具体影响,采用理论与仿真对比的方式,分析了串联、并联两种谐振方式对海水电导率测量效果的影响,证明了并联负载电压虚部变化较串联时更加稳定。搭建单线圈海水导率测量系统进行了实验室试验,试验结果表明,回路谐振对海水涡流具有明显的增强效应,谐振时负载电压随电导率增长而呈线性变化,且并联谐振方式在测量中效果优于串联谐振方式。磁谐振式单线圈模型具备海水导率测量的可行性,在低电导率、非接触式传感器方向具有良好的发展前景。

关键词: 电导率测量;磁谐振;涡流损耗;无损测量

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420

Analysis of single-coil resonant seawater conductivity measuring model

Feng Shuyi Liu Ning Wang Tao

(Nation Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: For the measurement of seawater low conductivity environments such as salty tide, this paper proposes a single-coil measurement model based on magnetic resonance and eddy current technology. An equivalent coupled circuit model of seawater eddy current applicable to single-coil magnetic resonance is established, and the specific influence of eddy current loss on the circuit parameters is theoretically analyzed. The influence of series and parallel resonance on seawater conductivity measurement is investigated by comparing theory and simulation, and it is proved that the variation of the imaginary part of the voltage of the parallel load is more stable than that of the series resonance. The single-coil seawater conductivity measurement system was built for laboratory tests, and the test results show that the loop resonance has an obvious enhancement effect on seawater eddy currents, the load voltage at resonance varies linearly with the growth of conductivity, and the parallel resonance method is better than the series resonance method in the measurement. The magnetic resonance single-coil model has the feasibility of seawater conductivity measurement and has a good development prospect in the direction of low conductivity, non-contact sensors.

Keywords: conductivity measurement; magnetic resonance; eddy current loss; non-destructive measurement

0 引言

海水导率是研究海洋理化过程的基本参数之一,测量海水导率对于理解海洋环境和全球气候变化具有重要的意义。近年来,我国沿海河口区域咸潮问题十分严重^[1],然而海水与淡水混合后导致水的电导率偏低,已达到传统的电极式电导率传感器^[2]和磁感应式电导率传感器^[3]的测量下限,无法满足咸潮环境下的海水电导率测量需求。如何实现非接触式、小型化的低电导率传感器,已成为近年的研究热点。相比而言,电涡流传感器^[4-5]具有结构简单、可靠性高等优点,线圈通过高频交流电在导电介质中感应出

电涡流,导致线圈阻抗产生涡流损耗,从而通过检测系统的阻抗变化来达到测量电导率的目的,目前,电涡流技术在金属^[6-7]、碳纤维复合材料^[8]的电导率测量以及材料的缺陷检测^[9]方面已得到了较多的研究和应用。

海水因具有导电性,可在交流信号的激励下形成涡流回路,涡流对线圈的损耗是实现电导率测量的核心。Wu等^[10]利用二阶矢量势计算了任意形状线圈所产生的电磁场,给出了线圈阻抗的解析表达式;Liu等^[11]将磁矢量势以级数的形式表示推导了浸入水中线圈的互阻抗计算公式,并分析了电导率对阻抗的影响;张克涵等^[12]针对海水环境

收稿日期:2024-05-21

*基金项目:天津市自然科学基金(23JCYBJC00590)项目资助

计算了电涡流损耗的近似公式，并验证了涡流损耗与水体厚度及电导率相关。但是，与金属介质相比，海水的电导率要低得多，成为电涡流技术在海水电导率测量应用上的主要局限，为了提升在低电导率环境下的测量效果，袁恺涵等^[13]利用全同步测频法对信号频率进行测量，通过频率的变化来显示电导率的变化；孙斌等^[14]通过试验得知最佳激励频段在实现低电导率海水的高灵敏度测量中是存在的；熊浩等^[15]在研究中发现，介入无源线圈的测量系统可以在谐振频率点提升探测性能；Kobayashi 等^[16]在电涡流试验中设置了磁谐振耦合，发现电压增益增加了 6 倍以上；刘宁等^[17]利用无线电能传输领域的磁耦合双线圈系统，结合电路谐振进行了海水电导率的测量，验证了这一技术的可行性。

与双线圈结构不同，单线圈系统中线圈既作为激励线圈产生电磁场，又作为接收线圈读取测量信号，由于这种结构在海水的微弱涡流中缺乏强耦合特性，导致测量难度大大增加。然而，单一线圈在传感器体积和重量方面具备一定的优势，并且谐振技术对电涡流的增强性，使得单线圈结构具有了测量低电导率介质的可能。本文针对谐振条件下的单线圈系统，构建了海水电导率测量模型，具体分析了涡流损耗对电路参数的影响，深入探究了不同谐振方式的电导率测量效果，并通过试验验证了该模型的可行性。

1 理论分析

1.1 单线圈谐振式测量系统模型建立

单线圈谐振式海水电导率测量系统如图 1 所示，该系统由交流电源、探测线圈、谐振电路和信号处理电路构成。单个线圈被绝缘材料包围浸没在海水中防止线圈与海水通电，线圈通入高频交流电后在海水空间中产生高频交变磁场，交变磁场在导电介质中会感应出电涡流。根据楞次定律，海水涡流会在线圈中产生与原磁场方向相反的副磁场，从而对线圈造成涡流损耗，考虑到海水与空气的磁导率非常接近，因而电导率便是影响涡流的主要因素。

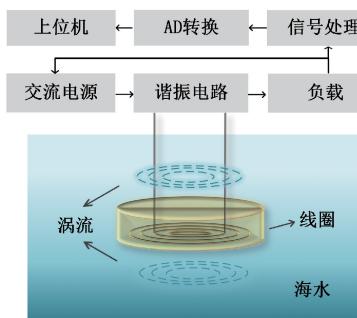


图 1 单线圈谐振式海水电导率测量系统

Fig. 1 Single-coil resonant seawater conductivity measurement system

海水等效回路模型如图 2(a)所示，在电路层面，海水涡流回路可以等效为一个电感和电阻串联，涡流等效回路与激励线圈通过电感分量产生耦合，由基尔霍夫定律可得

回路矩阵：

$$\begin{bmatrix} R_0 + j\omega L_0 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_e + j\omega L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， I_0 、 L_0 、 R_0 分别为线圈回路电流、电感和电阻， I_e 、 L_e 、 R_e 分别为海水等效回路电流、电感和电阻， M 为两个回路间的互感，整理后可将回路电流表示为式(2)。

$$I_0 = \frac{V}{R_0 + \frac{(\omega M)^2 R_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} + j\omega \left(L_0 - \frac{(\omega M)^2 L_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} \right)} \quad (2)$$

因此可得线圈反射阻抗模型，如图 2(b)所示，在海水涡流影响下回路阻抗产生变化，变化后的线圈电阻为 R_1 ，线圈电感为 L_1 ：

$$R_1 = R_0 + \frac{(\omega M)^2 R_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} = R_0 + \Delta R \quad (3)$$

$$L_1 = L_0 - \frac{(\omega M)^2 L_e}{R_e^2 + \omega^2 L_e^2} = L_0 - \Delta L \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知，涡流影响的结果是使探测线圈阻抗的实部分量增大、虚部分量减小，探测线圈的阻抗即是反映海水电导率的特征量，而变化的阻抗会对回路电流产生影响，因此可通过测量负载电压来达到测量海水电导率的目的。

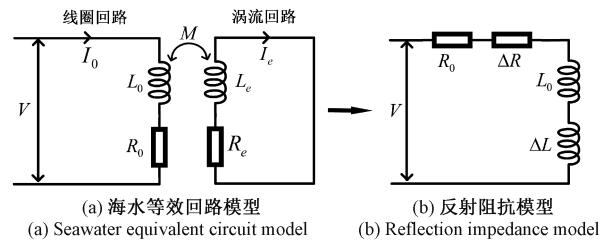


图 2 电路模型

Fig. 2 Circuit model

1.2 系统谐振影响分析

在含有电感、电容和电阻的交流电路中，电路两端的电压与电流一般是不同相的，若调节频率使电压电流同相，则电路两端呈纯电阻性，此时称为电路谐振。系统输入谐振频率时，可最大程度地将电容的电能转化为电感的磁能，增大海水涡流对线圈阻抗的影响，使电路面对海水电导率变化得更加敏感，利用此特性，可以降低海水低电导率带来的测量难度。

根据电容和电感分布的不同，谐振方式可以分为串联谐振和并联谐振。谐振电路模型如图 3 所示， U_s 为电源电压， C 为谐振电容， L 为线圈电感， R 为线圈等效电阻， R_L 为负载电阻。

根据电路理论和反射阻抗模型，可以分别列出串联和并联两种方式浸入海水后的负载电压如式(5)、(6)所示。

$$U_{s1} = R_L U_s \cdot \frac{1}{R_L + (R + \Delta R) + j(\omega(L - \Delta L) - \frac{1}{\omega C})} \quad (5)$$

$$U_{pi} = R_L U_S \cdot \frac{[R_L + (R + \Delta R) + j\omega(L - \Delta L)] \frac{1}{j\omega C}}{R_L + (R + \Delta R) + j\omega(L - \Delta L) + \frac{1}{j\omega C}} \quad (6)$$

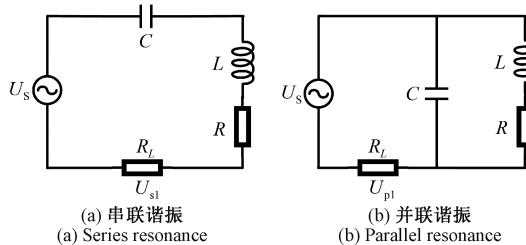


图 3 谐振方式

Fig. 3 Resonant mode

由于海水电导率相比金属等铁磁性介质低了至少 7 个数量级,在海水中感应出的涡流较小,导致电感损耗远小于线圈自身电感 ($\Delta L \ll L$),因此海水电导率对电感的影响可忽略不计,只考虑对线圈电阻的影响。当海水电导率产生变化时,会引起负载电阻两端电压值的变化,定义负载电压相对变化率 K 为评价指标,其计算方法如式(7)所示,其中 U_0 为电导率为 0 时的负载电压值。

$$K = \frac{|U_1 - U_0|}{U_0} \times 100\% \quad (7)$$

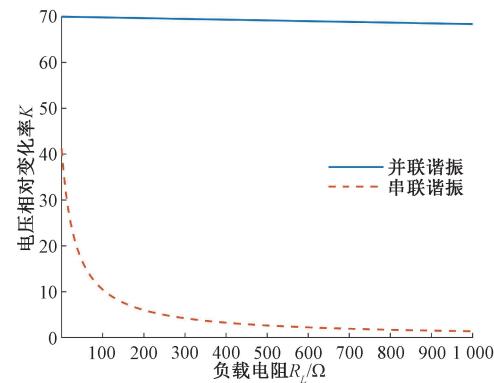
谐振状态下电流与电压同相,此时回路阻抗只包含实部分量,在串联谐振频率 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 时,回路阻抗可简化为 $Z = R_L + R$;而对于并联谐振,代入含线圈电阻时的谐振频率 $\omega = \sqrt{1 - CR^2/L}/\sqrt{LC}$,回路阻抗可简化为 $Z = R_L + L/CR$,将简化后的阻抗代入式(7)可得串联与并联谐振时的 K 值计算方法:

$$K_s = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R_L + R}} \quad (8)$$

$$K_p = \frac{R_L + \frac{L}{CR}}{R_L + \frac{L}{C(R + \Delta R)}} - 1 \quad (9)$$

取线圈电感为 0.131 mH,谐振电容为 100 pF,根据有限元仿真测得在电导率 $\sigma = 3$ S/m 时线圈电阻变化 ΔR 为 14 Ω,根据 K 值计算式,计算可得在 0~1 000 Ω 不同负载电阻下并联和串联两种不同谐振方式的变化趋势,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着负载电阻值的增大,并联谐振和串联谐振的电压变化率均逐渐减小,但即使增长到 1 000 Ω 时,并联谐振的 K 值也仅有不到 3% 的减小,而串联谐振 K 值趋近于 0,并且相对串联谐振,并联谐振一直维持在较高的水平。因此从电压变化率的角度考虑,并联谐振方式优于串联谐振方式。

图 4 两种谐振方式的 K 值变化Fig. 4 The K value change of two resonant modes

而在非谐振状态时,电流与电压不同相,此时回路阻抗同时包含实部与虚部分量,忽略变化微小的电感损耗 ΔL ,将式(5)、(6)中的虚数项单独列出并整理如下:

$$U_{si} = R_L U_S \cdot \frac{-(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{(R_L + R + \Delta R)^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (10)$$

$$U_{pi} = R_L U_S \cdot \frac{\frac{L}{C}(\omega L + \frac{1}{\omega C}) + \frac{(R_L + R + \Delta R)^2}{\omega C}}{\frac{(L)}{C}^2 + \frac{(R_L + R + \Delta R)^2}{\omega C}} \quad (11)$$

观察式(11)、(12)发现,在串联电路中,电压虚部分量 U_{si} 与电阻损耗 ΔR 间具有复杂的反比关系,而在并联电路中,电压虚部分量 U_{pi} 随电阻损耗 ΔR 呈正相关的增长,在有限元仿真软件中对此关系进行验证,如图 5 所示。

图 5(a)、(b)分别为串联、并联谐振时负载虚部电压的变化趋势,从图中可以看到,串联时电压虚部分量以谐振频率为中心点呈中心对称,低于谐振点时电压值为正,高于谐振点时电压值为负,不同电导率间具有较大的电压差;而并联谐振时电压虚部分量随频率的增加单调增长,不同电导率在同一频率点的电压值几乎相等。这一现象反映到负载电压上时,会出现非谐振状态下的曲线并非为单调的,而是先增加后减少,或先减少后增加的情况,使测量电压变化趋势不确定。因此,从曲线变化趋势角度考虑,规律更为简单、确定的并联谐振方式优于串联谐振方式。

2 试验验证

为验证谐振对涡流的增强效应,对比串联与并联谐振方式的优劣性,搭建实验系统如图 6 所示。探测线圈采用标准印刷电路板(printed circuit board, PCB)制作的平面螺旋线圈(图 7),铜箔厚度为 1oz,通过将环氧树脂材料灌入放置线圈的模具中,进行线圈及谐振电路的防水处理。试验在稳定的室温下进行,所用电导率溶液通过往纯水中加

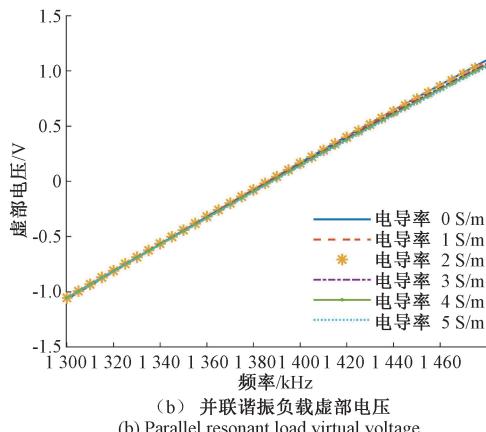
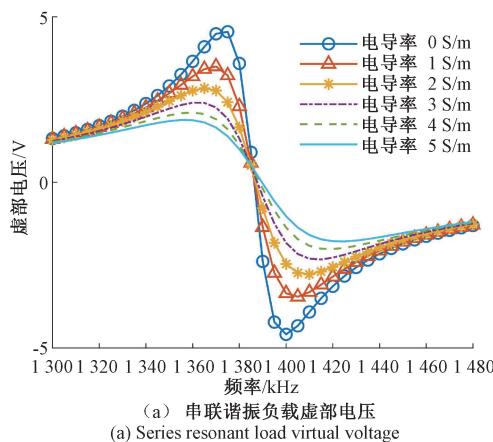


图 5 负载虚部电压变化趋势

Fig. 5 Trend of virtual part of load voltage

入 500 g 的盐 (NaCl) 配置得到，并使用精度 $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的 DDS-11A 电极式电导率仪对比控制，被测溶液体积保持在 3.5 L。为了适应仪器的测量范围，并考虑到串联谐振时在阻值较低时才具有较高电压变化率，所以串联谐振线圈负载电阻选择 1Ω ，串联谐振线圈负载电阻选择 1000Ω 。利用矢量网络分析仪测量线圈的固有阻抗，其电阻和电感分别为 19.4Ω 和 $143.6 \mu\text{H}$ ，具体电路参数如表 1 所示。

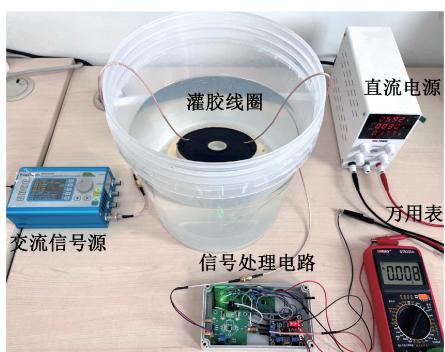


图 6 现场试验图

Fig. 6 Field test drawing

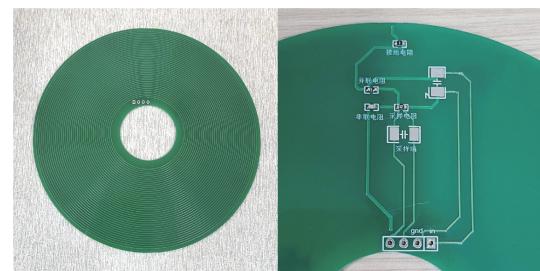


图 7 PCB 线圈及谐振电路实物

Fig. 7 PCB coil and resonant circuit object

表 1 试验电路参数

Table 1 Test circuit parameter

参数	取值
谐振电容	100 pF
线圈电阻	19.4Ω
线圈电感	$143.6 \mu\text{H}$
正弦交流源	20 Vpp
线圈内径	20 mm
线圈外径	60 mm
线圈截面宽度	2.54 mm
线圈匝数	40

中，负载电阻上的电压信号经处理后通过万用表显示。由于海水低电导率生成的涡流非常微弱，为了在负载电阻两端获得更明显的电压变化，设计了由 AD8421 差分运算放大芯片构成的 10 倍电压放大电路，并采用 AD637 芯片对高频交流信号进行有效值检测，降低电源纹波和噪声干扰带来的测量误差。

3 试验分析

在实验中，进行了并联和串联两种方式以及谐振与非谐振状态下的数据测量，分别记录了在电导率为 $0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 \text{ S/m}$ 共 11 个点的负载电压值，以谐振频率为中位从低到高每隔 10 Hz 记录一次数据。由于串并联两种方式的谐振原理不同，线圈在固 5ye 定电容的情况下会存在一定的谐振频率差异。

3.1 并联谐振影响分析

图 8、9 分别为并联方式下同组测量数据的负载电压 U_1 和电压差 $\Delta U = U_1 - U_0$ 的变化曲线。观察图 8 可以发现，曲线有非常清晰的谐振峰值，在谐振点 $f = 1422 \text{ kHz}$ 处 U_1 处于最低值，并且随着电导率的增加，电压值不断增大。这是由于随电导率的增加，海水涡流损耗增大，而在并联回路中，LC 端的阻抗与线圈电阻间为负相关，回路总阻抗随电导率的增加而下降，导致回路总电流增大，负载电压增大，这种关系在图 9 中可以更明显看到， ΔU 随电导率的增加呈线性的正比增长，并且谐振频率也并未随海水电导率改变而改变。

信号发生器输出高频正弦信号到浸没在容器的线圈

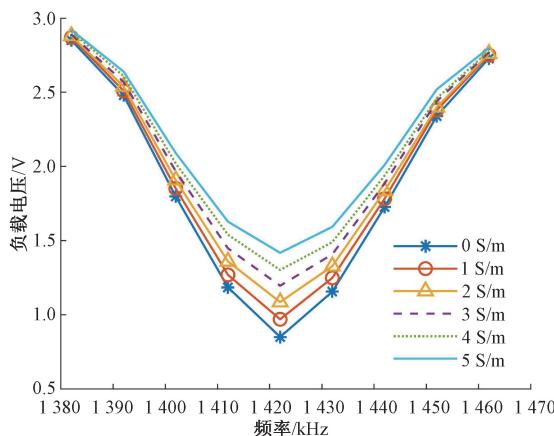


图 8 并联电路不同电导率电压随频率变化曲线

Fig. 8 Frequency variation curve of different conductivity voltage of parallel circuit

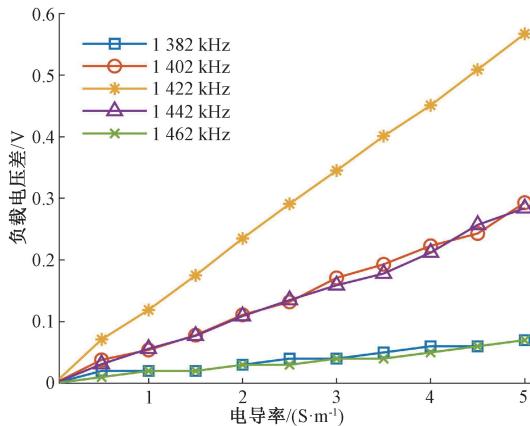


图 9 并联谐振与非谐振状态下电导率对电压的影响

Fig. 9 Influence of electrical conductivity on voltage in parallel resonant and non-resonant states

曲线在谐振点 $f = 1422 \text{ kHz}$ 处具有最大的变化量 ΔU ，而非谐振点随着远离谐振点 ΔU 逐渐减小，并呈现较为对称的情况，该现象验证了在同等条件下，谐振对海水涡流具有增强效应。

目前常用的感应式电导率传感器是工作在非谐振状态下，未经谐振处理的电路产生的无功损耗会对电磁耦合的效率产生影响，感应式电导率传感器往往通过磁芯来增强磁场，但这一做法会增加传感器的重量，回路谐振可以替代性地突出电压值的变化，因此更有利传感器的轻量化设计。

3.2 串联谐振影响分析

图 10、11 分别为串联方式下同组测量数据的负载电压 U_1 和电压差 $\Delta U = U_1 - U_0$ 的变化曲线。如图 10 所示，与并联方式相反，在谐振点 $f = 1348 \text{ kHz}$ 处 U_1 处于最高值，并且 U_1 随电导率增加而逐渐减小。这是由于在串联谐振回路中，总阻抗与线圈电阻间为正相关，海水电导率上升导致涡流损耗增大，因此回路总阻抗随电导率的增加而增加，

回路总电流下降，负载电压下降。

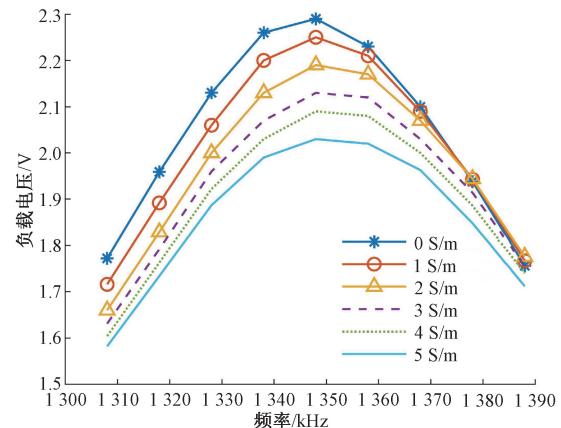


图 10 串联电路不同电导率电压随频率变化曲线

Fig. 10 Frequency variation curve of different conductivity voltage of series circuit

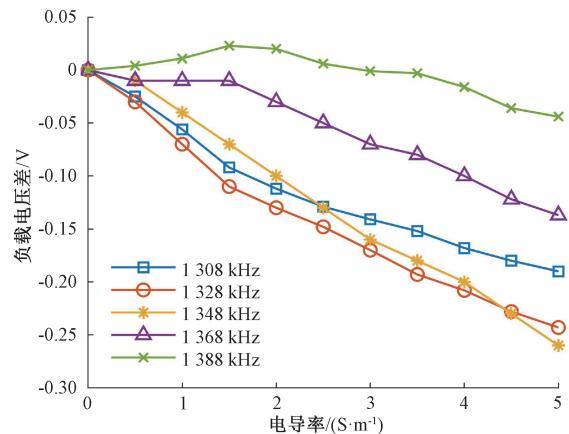


图 11 串联谐振与非谐振状态下电导率对电压的影响

Fig. 11 Influence of electrical conductivity on voltage in series resonant and non-resonant states

与并联有较大差异的是，串联方式下，虽然在谐振频率 $f = 1348 \text{ kHz}$ 处具有最大的电压差 ΔU ，但在低于谐振频率的非谐振点处 ΔU 同样也较大，如图 11 中，频率在 1328 kHz 时的 ΔU 几乎与谐振时的 ΔU 相等，而高于谐振频率的非谐振点 ΔU 则较小，曲线对称性减弱，在频率 1388 kHz 时还出现了 ΔU 先正后负的情况，这与公式(11)的推导和仿真结果具有一致性，串联电路非谐振状态的虚部电压复杂的变化对测量电压的影响很大，不利于电导率的提取。串联相比并联的谐振增强效应并不明显，但是，在实际测量中若电路无法完全达到谐振状态，选择串联方式也可以获得较大 ΔU 。

表 2 为根据式(8)、(9)计算的，电路谐振状态下负载电压相对变化率 K 在不同电导率时的数据，其中串联谐振已根据仿真结果选择变化率较高的小电阻。从表中可以看到，两种谐振方式的 K 值(变化率)均随电导率的增加而增

长,而在电导率相同时,并联谐振的 K 值远高于串联谐振,与理论分析一致。

表 2 两种谐振方式电压相对变化率 K

Table 2 The voltage relative change rate of the two resonant modes K

电导率/(S·m ⁻¹)	串联谐振 K 值	并联谐振 K 值
1	1.747	13.983
2	4.367	27.615
3	6.970	40.541
4	8.733	52.997
5	11.354	66.628

不论是从图 9、11 还是表 2 的数据中都可以发现,即使是在易受到干扰的高频状态下,并联谐振时负载电压随电导率变化呈现出非常稳定的线性增长,并且在小于 5 S/m 的低电导率范围内也并未从出现突变的情况,这使得后续在传感器系统设计时拟合的转换公式与实际数据间的相关性更强,有利于提高电导率传感器测量的精确度。

4 结 论

本文提出了一种单线圈谐振式海水电导率测量模型,通过建立等效耦合电路模型和搭建测量系统试验,验证了涡流损耗与海水电导率的相关关系,对比了串、并联两种谐振方式,得出如下结论:

从模型参数变化趋势角度分析,线圈阻抗与海水电导率相关,随着海水电导率增加,线圈电阻增大,电感变化可忽略不计,导致负载电压随电导率的增加而线性变化,因此,海水电导率可通过负载电压的变化来实现测量;从串并联谐振负载选择角度分析,串联谐振的电压变化率随负载阻值的增加而反比例的下降,而并联谐振的负载阻值对电压变化率影响较小,且维持在高于串联的水平,使电阻可选择范围较大,因此,从测量电压变化率的角度考虑,并联谐振方式优于串联谐振方式;从串并联谐振变化趋势比较分析,串联谐振会出现非谐振状态下的曲线并非为单调的,而是先增加后减少,或先减少后增加的情况,因此,变化规律更为简单、确定的并联谐振方式优于串联谐振方式。

本文将常用于测量金属电导率的螺旋单线圈应用于测量电导率较低的海水中,并改进为平面线圈结构,利用谐振频率对海水涡流的增强效应降低了低电导率条件下微弱涡流导致的测量困难,为海水低电导率测量的研究提供了新的发展方向。但本文对线圈磁场在高频环境下受到的干扰因素还需进一步探索,同时未考虑到温度对测量电路的影响,对于传感器的整体设计有待进一步开展。

参考文献

[1] 李文善,左常圣,王慧,等.中国主要入海河口咸潮入侵变化特征[J].海洋通报,2019,38(6): 650-655.

LI W SH, ZUO CH SH, WANG H, et al. Salt tide intrusion characteristics in main estuaries of China[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 650-655.

- [2] 孙风光,张洪泉,刘秀洁,等.四电极海水电导率传感器设计[J].传感器与微系统,2018,37(12): 86-89.
- SUN F G, ZHANG H Q, LIU X J, et al. Design of four-electrode seawater conductivity sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(12): 86-89.
- [3] 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 the key technologies of a novel inductive conductivity sensor [J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(3): 18-22.
- [4] 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.
- ZHAO Y Q, LIU X, CHEN Y B, et al. Optimizing design for miniature eddy current conductivity measurement sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (4): 598-603.
- [5] 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.
- [6] 曹丙花,淦方鑫,范孟豹.非铁磁性材料电导率涡流检测仪器研发[J].中国科技论文,2022, 17 (6): 686-690.
- CAO B H, GAN F X, FAN M B, et al. Research and development of eddy current testing instrument for conductivity measurement of non-ferromagnetic materials [J]. China Sciencepaper, 2022, 17 (6): 686-690.
- [7] 付剑津,雷银照.铁磁平板参数的正弦涡流检测方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(3): 617-622.
- FU J J, LEI Y ZH. Study on sinusoidal eddy current test method for ferromagnetic plate parameters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 617-622.
- [8] JI H, SHEN W X, ZHANG CH, et al. Conductivity inversion of unidirectional CFRP laminate based on ECT using neural network[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(14): 1431-1438.

- [9] 黄曼,王婕,周伟,等. 单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 182-187.
HUANG M, WANG J, ZHOU W, et al. Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 182-187.
- [10] WU D H, YANG F, WANG X H, et al. Impedance calculation of arbitrary-shaped thin-walled coils for eddy-current testing of planar media[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2018, 279: 537-542.
- [11] LIU P ZH, GAO T D, MAO ZH Y. Analysis of the mutual impedance of coils immersed in water[J]. Magnetochemistry, 2021, 7(8): 113.
- [12] 张克涵,阎龙斌,闫争超,等. 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 334-342.
ZHANG K H, YAN L B, YAN ZH CH, et al. Modeling and analysis of underwater non-contact power transmission system based on magnetic resonance loss analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 334-342.
- [13] 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. Study on non-invasive electrolyte solution conductivity measurement [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(9): 80-84.
- [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] 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.
- [16] KOBAYASHI N, UENO S, NOMURA K, et al. Basic characteristics of eddy current testing using resonant coupling [C]. Toronto: ASME Pressure Vessels & Piping Conference, 2012.
- [17] 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.

作者简介

冯书艺,硕士研究生,主要研究方向为电涡流检测技术。
E-mail:m15860162610@163.com

刘宁(通信作者),博士,正高级工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:liun0726@163.com