

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513670

电调制海洋电场测量原理研究*

李文来¹, 文玉梅^{1,2}, 叶敬昌¹, 李平¹

(1. 上海交通大学自动化与感知学院 上海 200240; 2. 上海交通大学海底科学与划界全国重点实验室 上海 200240)

摘要:目前海洋电场测量,普遍采用自然电位法,使用Ag/AgCl这样的非极化电极或碳纤维电极等超稳定电极浸入海水中测量电极间的电压以间接测得电场。一方面,自然电位法要求测量中电极与海水必须是导通的,电极特性必然受到海水影响逐步发生变化,不可避免影响测量稳定性。另一方面,自然电位法中由于测量灵敏度和电极间距成正比,电极间距通常为数米至数千米,两电极所处环境温度、盐度的差异会产生电压漂移,造成测量误差。针对上述问题,提出了电调制测量海洋电场原理,即:通过电子开关控制电极连接对电场进行调制,产生交变电场诱导生成感应电流作为电场传感信号,在检测电极和海水绝缘不导通的情况下拾取海洋电场信号,杜绝电极与海水发生反应,检测电极特性可以保持长期稳定,并且由于传感信号的强度与电极间距负相关,电极间距远小于自然电位法,极大减小环境因素产生的电势差及其漂移对测量信号的影响造成测量误差。搭建了模拟水下电场测试平台对提出原理进行实验验证,应用该原理对模拟海水中的直流电场进行测量,设计的电极间距为25 mm,电极尺寸为50 mm×50 mm×1 mm,实验结果表明,海水中电场测量灵敏度可达117.87 mV/(V·m⁻¹),最小分辨率为5.786 μV/m,10 h内的漂移极差<50.9 μV/m。

关键词:海洋电场;电子开关;调制;极化;感应电流

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.50

Research on the principle of electro-modulation for measuring the marine electric field

Li Wenlai¹, Wen Yumei^{1,2}, Ye Jingchang¹, Li Ping¹

(1. School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: At present, the self-potential method is widely used in the measurement of marine electric fields. Non-polarized electrodes such as Ag/AgCl or super-stable electrodes such as carbon fiber electrodes are immersed in seawater to measure the voltage between the electrodes and indirectly obtain the electric field. On the one hand, the self-potential method requires the electrodes to maintain electrical contact with seawater during measurement. The characteristics of the electrode may change gradually under the influence of seawater, which will inevitably affect the measurement stability. On the other hand, in the self-potential method, since the measurement sensitivity is proportional to the electrode spacing, the electrode spacing is usually several meters to several kilometers. The difference in environmental temperature and salinity between the two electrodes will cause voltage drift, resulting in measurement errors. In response to the above problems, this paper proposes the principle of electrical modulation for measuring marine electric fields. By controlling the electrode connection through electronic switches to modulate the electric field, an alternating electric field is generated to induce an induced current as the electric field sensing signal. When the detection electrode is insulated from seawater and does not conduct, the marine electric field signal is picked up to prevent the electrode from reacting with seawater, and the characteristics of the detection electrode can remain stable for a long time. Moreover, since the intensity of the sensing signal is negatively correlated with the electrode spacing, the electrode spacing is much smaller than that of the self-potential method, which greatly reduces the influence of the potential difference and drift caused by environmental factors on the measurement signal and the resulting measurement error. A simulated underwater electric field test platform was built to experimentally verify the proposed principle, and the direct current electric field in the simulated seawater was measured by applying this principle. The designed

收稿日期:2025-01-10 Received Date: 2025-01-10

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC2202803)资助

electrode spacing was 25 mm and the electrode dimensions were 50 mm×50 mm×1 mm. The experimental results show that the proposed method achieves an electric field measurement sensitivity of 117.87 mV/(V/m), a minimum resolution of 5.786 $\mu\text{V}/\text{m}$, and a drift range within 10 hours of less than 50.9 $\mu\text{V}/\text{m}$.

Keywords: marine electric field; electronic switch; modulation; polarization; induced current

0 引言

我国作为海洋大国,海洋资源丰富,在开发利用海洋资源时,海洋电场测量可以提供很多有价值的信息^[1-2]。洋流活动^[3]、海底矿藏^[4]、舰船防腐^[5]以及推进系统^[6]等都是海洋中电场的来源,利用这些电场信号可以检测和定位水中目标,对于洋流活动监测、海洋资源勘探与开发、舰船目标跟踪^[7]等具有重要意义。

目前对于海洋电场的探测普遍采用自然电位法,检测海水中两点的电势差实现电场测量^[8],所以检测电极必须浸入海水中与海水导通。为了减少电极性能变化造成的测量误差,现在一般采用 Ag/AgCl 等无极化电极或碳纤维等几乎不会和海水反应的惰性电极。自然电位法电场测量的灵敏度由电极之间的距离确定,目前电极间距一般都在 1 m 以上,甚至达到数千米。电极往往需要由拖曳船拖曳,电极间距大导致测量过程中无法准确定位,带来噪声。Safipour 等^[9]观察到,由于电极牵引电缆是导电的,可能因其在地球磁场中的移动而产生噪声。Constable 等^[10]在自主水下航行器上直接安装了一个三轴电场接收器以避免拖曳船舶拖曳电缆带来的问题,并且还引入了低噪声放大器,与拖曳装置相比,整体成本更低,装置工作时也更加灵活,但整体的电极安装设计使得电极位置更加靠近推进系统,所以推进系统带来的噪声比之前更大。

自然电位法中电极需要与海水建立电化学平衡后才能使用^[11],为了提高速率,可以通过浓硝酸氧化法、电化学氧化法、醇热法^[12-17]等对电极表面改性,使表面生成疏松多孔的结构,Zhang 等^[18]则是直接对电极材料进行改进,开发出了新型镍酸盐电极。但疏松多孔的电极结构使得电化学反应后的反应物聚集在电极表面,改变电极特性^[19],影响电场测量稳定性,尤其对海洋电场这样的直流电场/低频电场的测量效果较差^[20-21]。

针对直流/低频电场测量,可以采用“场磨”原理:通过电场中极化参数的变化,如电极面积、间距以及其中的介质变化,使得极化交变产生感应电流,从而得到电场测量信号。其通常被应用于空气中直流/低频电场测量^[22-24]。场磨传感器中通常使用电机驱动部件运动实现对相关参数的调制,而电机转速无法保持稳定,为了得到准确的调制频率,De Sa Antunes 等^[25]在测量雷暴电场时还通过光学编码器装置测量转速。电机本身是一个噪声

源,Li 等^[26]通过使用两组特性相同的叶片产生相位相反的感应电流,采用差分的方式抑制噪声。一些微场磨电场传感器,采用压电振动等方式,实现极化参数的变化^[27-29]。如果将场磨原理应用到海水电场测量中,运动部件对海水的扰动必然引起测量噪声^[30-32],而且电机本身带来的噪声会随着功率的增加而增加。

综上所述,目前采用的自然电位法测量海洋电场因为电极间距大、电极特性参数随测量时间变化等因素,存在测量工程实施不方便、不能开发微小型电场传感器、测量漂移大和长期测量稳定性差等问题。改进电极性能一定程度上减小了引入的电场测量误差,但是并不能从根本上解决上述问题。采用场磨原理对相关参数进行调制,可以测量直流电场和低频交流电场,但场磨运动在海洋中会带来新的噪声。针对上述问题,提出了电调制测量海洋电场原理,即:通过电子开关控制电极的连接,对检测区域的电场进行调制,产生交变电场,生成感应电流作为电场传感信号,信号强度与电极间距负相关,并且检测电极不与海水导通就能拾取电场测量信号。

1 电场测量信号产生

海水是一种既有导电性又有介电性的介质,当测量海水这类介质中的电场时,将电极片置于电场,电极和介质之间的阻抗,既有介质介电性形成的电容,也有导电性形成的电阻,如图 1 所示。两个电极和介质形成的阻抗分别表示成 C_A 与 R_A 并联, C_B 与 R_B 并联。由于两个电极都在介质中,介质的导电性还在两个电极之间形成阻抗,对于低频电场,这个阻抗以电阻为主,表示成 R_{AB} 。

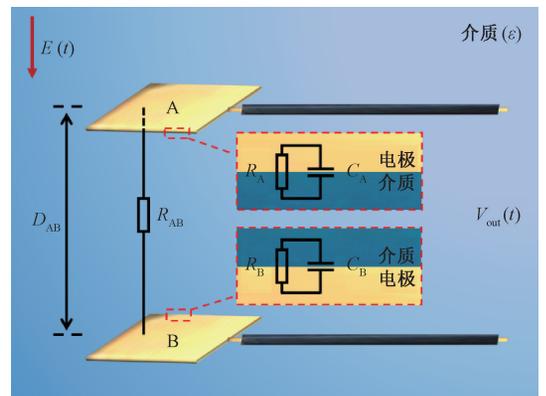


图1 电极与介质之间的的阻抗

Fig. 1 Impedance between the electrode and the medium

电极片在电场中会被极化生成感应电荷,根据高斯定理^[33],感应电荷量如式(1)所示。

$$Q = \varepsilon S \cdot \mathbf{E}(t) \quad (1)$$

式中: ε 为介质介电常数; S 是电极和介质接触的表面积,方向为表面法向; $\mathbf{E}(t)$ 是电极与介质接触面处的电场。

电极片之间相当于形成了一个等效电源,介质中电场等效电压源的电压如式(2)所示。

$$V_{AB}(t) = \mathbf{D}_{AB} \cdot \mathbf{E}(t) \quad (2)$$

式中: \mathbf{D}_{AB} 是两电极间的距离。电场等效电源的电流来自电极片在电场中感应的电荷 Q 产生的电流,以及介质的传导电流两部分,短路电流如式(3)所示。

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{V_{AB}(t)}{R_{AB}} \quad (3)$$

其中,等式右端微分项表示的是电场引起的感应电流。假设两个电极参数以及它们与介质接触的条件完全相同,有 $R_A = R_B = 0.5R$, $C_A = C_B = 2C_0$,将 C_A 与 R_A 并联、 C_B 与 R_B 并联等效为 C_0 与 R 的并联,等效电压源电路如图2所示。

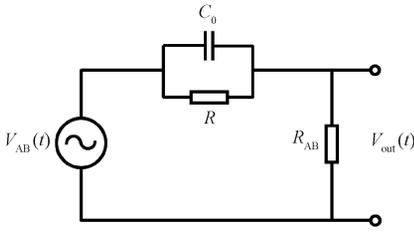


图2 等效电压源电路

Fig.2 Equivalent voltage source circuit

结合式(1)和(2),式(3)中感应电荷如式(4)所示。

$$Q = C_0 V_{AB}(t) \quad (4)$$

此时若电极与介质是绝缘不导通的, C_0 由电极的间距、面积以及介质的介电性确定,如式(5)所示。

$$C_0 = \varepsilon \frac{S}{D_{AB}} \quad (5)$$

为了充分反映电场等效电源的电流产生机理,将式(3)表示为式(6)所示。

$$i(t) = V_{AB}(t) \frac{dC_0}{dt} + C_0 \frac{dV_{AB}(t)}{dt} + \frac{V_{AB}(t)}{R_{AB}} \quad (6)$$

式中:等式右端前两项是感应电荷变化产生的感应电流, $V_{AB}(t) \frac{dC_0}{dt}$ 是由 C_0 的变化产生的, $C_0 \frac{dV_{AB}(t)}{dt}$ 是由 V_{AB} 的变化产生的;等式右端最后一项是介质传导产生的传导电流。

当介质为空气等绝缘介质时, $R \rightarrow \infty$ 且 $R_{AB} \rightarrow \infty$,此时传导电流近似为0,当电场 $\mathbf{E}(t)$ 不变,即为静电场时,且电极和介质形成的电容 C_0 也不变时,感生电流为0,此

时总的短路电流为0。为了传感空气这类绝缘介质中的电场,采用场磨方法是通过机械运动使得电容 C_0 发生周期性变化,此时式(6)中 $V_{AB}(t) \frac{dC_0}{dt}$ 不为0,即使在静电场中,短路电流 $i(t)$ 也不为0,实现对电场的传感。当介质为海水等非绝缘介质时,即使电场为静电场,电场产生的电压也会使得传导电流不为0,在海洋电场测量中可以直接使用电极来拾取海洋电场产生的电压,这就是自然电位法电场测量信号。

当被测电场是直流至低频的,可以近似认为电场对时间的微分=0,即式(6)中 $C_0 \frac{dV_{AB}(t)}{dt} = 0$,需要对电场或对形成 C_0 的参数进行调制才会使得这一部分信号不为0。提出原理的基本思路是调制被测电场本身,使得 $\mathbf{E}(t)$ 发生变化,因此式(6)中 $C_0 \frac{dV_{AB}(t)}{dt} \neq 0$ 。在这个过程中, C_0 保持不变,即式(6)中 $V_{AB}(t) \frac{dC_0}{dt} \equiv 0$ 。同时电极做绝缘处理,使得 $R_{AB} \rightarrow \infty$,传导电流趋于0,式(6)进一步表示为式(7)所示。

$$i(t) = C_0 \frac{dV_{AB}(t)}{dt} \quad (7)$$

由式(2)、(5)、(7)结合可得式(8)。

$$i(t) = \varepsilon S \cdot \frac{d\mathbf{E}(t)}{dt} \quad (8)$$

从式(8)中可以看出,感应电流 $i(t)$ 与电极间距无直接关系。为了测量电场 \mathbf{E}_0 ,需要将电极接入信号拾取电路,如图3所示。

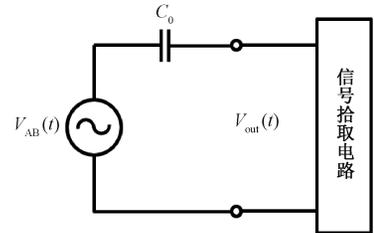


图3 接入信号拾取电路后的等效电路

Fig.3 The equivalent circuit after the access signal pickup circuit

设信号拾取电路的输入阻抗是 Z_{input} ,拾取电压公式如式(9)所示。

$$V_{out}(t) = \varepsilon Z_{input} S \cdot \frac{d\mathbf{E}(t)}{dt} \quad (9)$$

由式(9)可知,调制电场可以生成测量信号,从而反映出被测电场垂直于电极表面方向上的强度。此时获取电场测量信号不需要电极与介质导通,因此本原理也可用于测量非导电介质中的电场。

2 变化电极连接调制电场原理

电场调制过程如图4所示,通过电子开关控制两个电极的断开与连接,当开关断开时,两个电极处于各自独立的状态,分别建立静电平衡,电荷分布如图4(a)所示,此时电场可以“穿过”电极片,电极对电场没有屏蔽作用;当开关闭合时,两个电极连通成为一个整体,两个电极的电荷重新分布:右侧电极中的负电荷向着电场方向的反方向移动,即流向左侧电极,重新建立静电平衡,如图4(b)所示,电荷重新分布使得在两调制电极之间形成感应电场 E_{ind} ,与原电场 E_0 方向相反,场强为 $E_{\text{ind}} = kE_0$ ($0 < k < 1$),其中 k 与两调制电极间距负相关,即间距越大 k 越小,而间距越小 k 越大,越接近于1。开关闭合时,电极间总的电场强度为 $E_0 - E_{\text{ind}} = (1 - k)E_0$,所以,开关切换使得两调制电极间的电场在 E_0 和 $(1 - k)E_0$ 之间变化, $E_0 - (1 - k)E_0 = kE_0$ 即为产生的调制电场的振幅,显然调制电场的振幅越高,测量灵敏度越大,所以测量灵敏度和电极间距负相关。在实际测量中,应让电极间间距尽量小使得 k 接近于1。

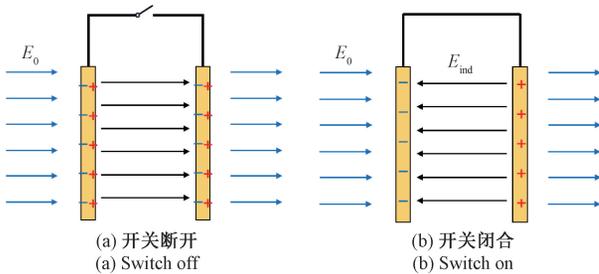


图4 电场调制过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electric field modulation process

为了验证电极连接变化对电场的调制效果,通过多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对开关开合前后引起的电场变化进行有限元仿真如图5所示。建模示意图如图5(a)所示,产生电场的铜板面积远大于电极面积以保证电极区域的电场为均匀电场,在铜板上施加电压模拟 1 V/m 的电场,调制电极 A、B 尺寸均为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 0.05 \text{ cm}$,电极间距为 10 cm ,理想开关在导通时可以等效为导线将两个电极连接。图5(b)为开关断开时的仿真结果,图5(c)为开关闭合时的仿真结果。开关断开时,电场可以直接穿过电极,电极间的电场和源电场一致,开关闭合时,电极间电场相对源电场减小。

在实际使用中开关的导通电阻并不为0,因此对电子开关不同导通电阻下电场变化情况进行仿真。开关导通电阻通过改变连接两电极的导线电导率来改变。开关断开时检测区域内的平均电场强度为 1.023 V/m ,其他

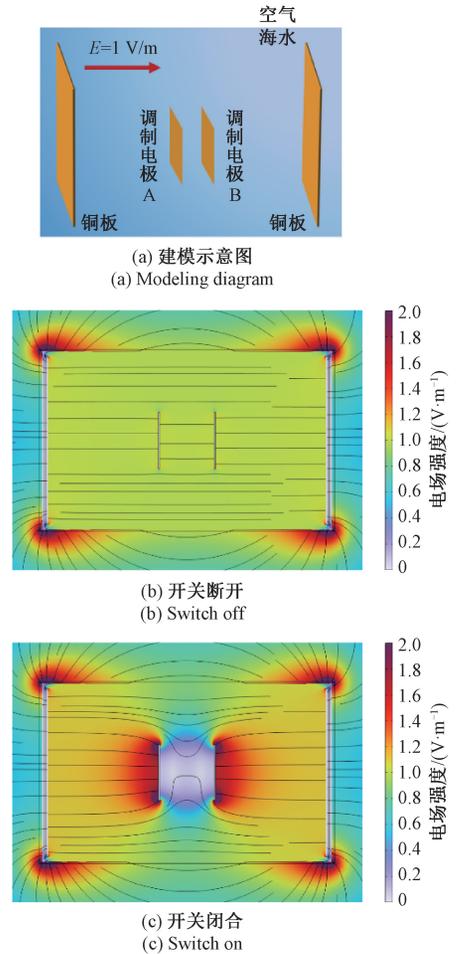


图5 开关开合前后电场仿真

Fig. 5 Electric field simulation before and after switching on and off

参数固定,改变电导率设置开关导通电阻分别为 $1、2、3、4、5 \Omega$,开关闭合时各参数下检测区域内的平均电场强度的值如表1所示。

表1 开关闭合时不同开关导通电阻下电场强度值
Table 1 Electric field strength values under different switching on-resistance

导通电阻/ Ω	电场强度/ $(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$
1	0.170
2	0.170
3	0.170
4	0.170
5	0.170

从表1中可以看到,开关导通电阻对于电场调制几乎没有影响。这是因为仿真结果是稳态下的结果,即建立了静电平衡后的状态,在设置的仿真参数下,开关导通

时即便电导率不同,但仍然是导体,有足够的自由电荷建立静电平衡,实现电场调制的效果。开关导通电阻影响的是建立静电平衡的速度,电阻越小对于电流的阻碍作用越弱,建立静电平衡的速度越快,据此,在实际应用中应选用导通电阻小的开关。

3 电控电场调制测量信号获取

本研究提出的电控电场调制测量信号获取结构如图 6 所示。电子开关连接调制电极 A、B,通过信号发生器输出的方波激励信号控制两电极周期性连接与断开,电场被调制。由于开关直接连接 A、B 电极,若此时将两电极作为测量电极,则测量信号会被开关信号过调制。引入第 3 个电极作为感应电极,将感应电极置于两个调制电极中间,其中感应电极做绝缘处理,感应电极与调制电极 B 作为输出端连接信号拾取电路。

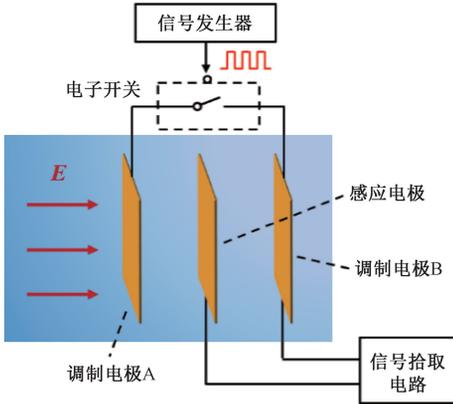


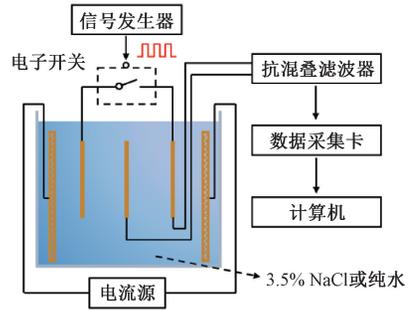
图 6 电控电场调制测量信号获取示意图

Fig. 6 Electric field modulation measurement signal acquisition schematic diagram

4 实验验证及结果讨论

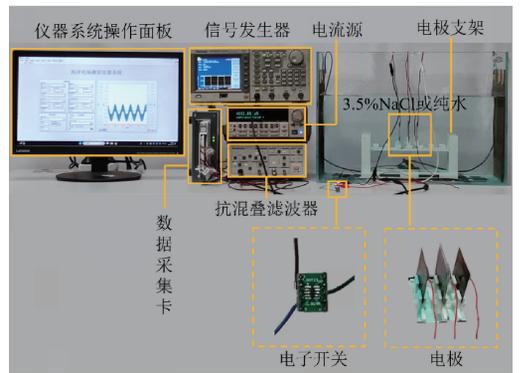
为进行测量实验,搭建了海洋电场测量实验平台如图 7 所示,图 7(a)为实验平台示意图,图 7(b)为实物图。将海盐按照 3.5% 溶解度溶解在水中模拟海洋环境,在水箱两侧固定铜网,使用电流源(6221, Keithley)连接铜网施加电流模拟海洋环境下的电场。电极材料为铜,电极做绝缘处理,在盐水中测得两电极之间的电阻 $>20\text{ M}\Omega$ 。电极尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,电极间距为 25 mm ,电极位置由下方支架固定。使用信号发生器(AFG3022C, Tektronix)生成方波控制电子开关(2N7002, JCET)的通断,调制频率为 1 kHz 。感应电极与参考电极作为输出端,输出信号通过电流电压转换后通过截止频率为 10 kHz 的抗混叠滤波器(SR560, SRS)滤除高频噪

声和高次谐波,再通过数据采集卡(PXIe-4309, NI)采集,采样率设置为 40 kHz ,信号输入范围为 $\pm 0.1\text{ V}$,两通道采集,根据采集卡参数指标,此设置的采集噪声均方根值为 $\sim 0.4\text{ }\mu\text{V}$ 。



(a) 实验平台示意图

(a) Experimental platform diagram



(b) 实验平台实物图

(b) Physical diagram of the experimental platform

图 7 海洋电场测量实验平台

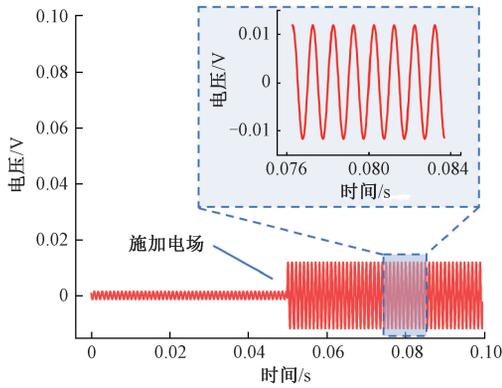
Fig. 7 Marine electric field measurement experiment platform

由于电场信号已经被调制到开关频率,因此可以通过滤波器滤除低频噪声。采集施加直流电场前后的输出信号,通过 2 阶巴特沃斯带通滤波器对信号滤波,低截止频率为 990 Hz ,高截止频率为 $1\text{ 010}\text{ Hz}$ 。电场测量信号如图 8 所示,图 8(a)为施加电场前后时域上的测量信号,图 8(b)为存在电场时输出信号的频谱。通过电子开关实现了对电场的调制,在施加电场后,测量信号的幅值发生变化,在频谱上表现为 1 kHz 处存在明显的峰,其幅值反映了被测电场的强度,测量信号频率等于开关调制频率。

根据前述分析,提出的原理也适合于非传导介质中电场的测量,因此还在水箱中加入纯水,以采集纯水中的电场信号。

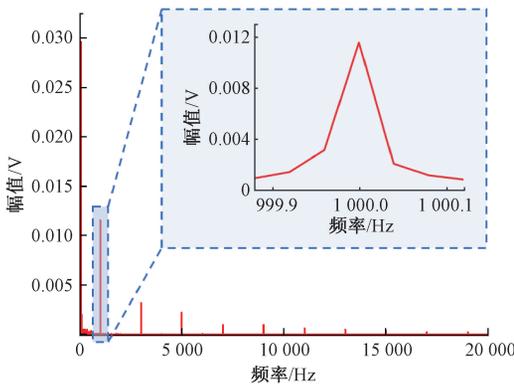
4.1 测量灵敏度

对测量灵敏度进行评估。通过电流源施加电流分别在海水和纯水中生成电场,场强计算公式如式(10)所示。



(a) 施加电场前后测量信号

(a) Measured signal before and after applying electric field



(b) 施加电场后信号频谱

(b) Signal spectrum after electric field is applied

图8 电场测量信号

Fig. 8 Electric field measurement signal

$$E = \frac{J}{\sigma} \quad (10)$$

式中： σ 是电导率； J 是电流密度。电流密度计算公式如式(11)所示。

$$J = \frac{I}{S} \quad (11)$$

式中： I 是电流源施加的电流； S 是介质正对铜网的横截面面积。电流源施加电流及其在海水中生成的电场如表2所示。

由于电场是由电流源施加电流生成，纯水的电导率较小，为了避免电流源过载，在纯水中施加的电流小于在海水中施加的电流，在纯水中生成的电场如表3所示。

开关调制频率为1 kHz，测量信号采集前仍然使用截止频率为10 kHz的抗混叠低通滤波器滤除高频信号，滤波后使用数据采集卡采样，采样率为40 kHz。重复采集信号5次取平均值如图9所示，图9(a)为海水中各电场强度下测量信号在1 kHz处的幅值，图9(b)为纯水中各电场强度下测量信号在1 kHz处的幅值。

表2 海水中生成的电场

Table 2 The electric field generated in seawater

电流源/mA	电场/(mV·m ⁻¹)
0.5	0.406
1.0	0.812
1.5	1.218
2.0	1.623
2.5	2.029
3.0	2.435
3.5	2.841
4.0	3.247
4.5	3.653
5.0	4.058

注：电导率 $\sigma_{se} = 3\ 200$ mS/m

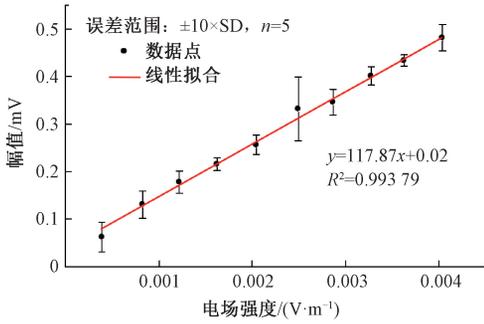
表3 纯水中生成的电场

Table 3 The electric field generated in pure water

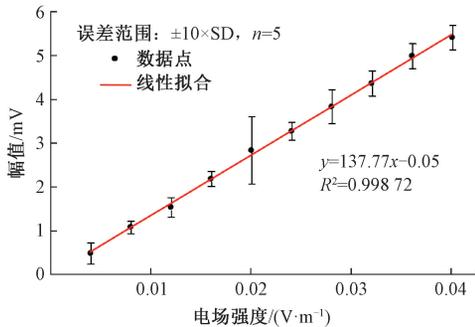
电流源/ μ A	电场/(mV·m ⁻¹)
10	4.017
20	8.034
30	12.052
40	16.069
50	20.086
60	24.103
70	28.120
80	32.138
90	36.155
100	40.172

注：电导率 $\sigma_{pw} = 6.78$ mS/m

为清晰展示，图9中误差棒为实际标准差的10倍，对数据点做线性拟合，以 R^2 （决定系数）评估拟合效果。线性拟合表达式分别为 $y = 117.87x + 0.02$ ($R^2 = 0.99379$)、 $y = 137.77x - 0.05$ ($R^2 = 0.99872$)，在海水中的测量灵敏度为117.87 mV/(V·m⁻¹)，在纯水中的测量灵敏度为137.77 mV/(V·m⁻¹)。由式(9)可知，测量灵敏度与构成电容介质的相对介电常数相关，在海水与纯水中形成的电容分别为61.95、71.69 pF，考虑到电容的差别，校正后海水与纯水中的测量灵敏度相差为0.994%。测量结果表明，输出信号可以对非导电介质中的电场作出响应，可以实现对非导电介质中电场的测量。文献[13]中采用自然电位法，电极间距为0.25 m时测量灵敏度为152.26 mV/(V·m⁻¹)，换算成相同电极间距后为30.45 mV/(V·m⁻¹)，应用提出原理进行测量的灵敏度约为自然电位法的4倍。



(a) 海水中各电场强度下测量信号在1 kHz处的幅值
(a) The amplitude of the measured signal at 1 kHz under each electric field intensity in seawater



(b) 纯水中各电场强度下测量信号在1 kHz处的幅值
(b) The amplitude of the measured signal at 1 kHz under each electric field intensity in pure water

图9 不同介质中的电场测量信号

Fig. 9 Electric field measurement signals in different media

在测量信号每秒钟更新一次条件下,60 s 内的标准差为 $0.682 \mu\text{V}$,以标准差与测量灵敏度之比评估系统的分辨率,计算得到系统的最小分辨率为 $5.786 \mu\text{V}/\text{m}$ 。这里的电场分辨率主要受限于信号采集(A/D)的分辨率。由于2种情况下的信号幅值最大均不超过 10 mV ,而采集噪声均方根值为 $\sim 0.4 \mu\text{V}$ (A/D分辨率的反映),如果能够对电极输出信号进行预放大10倍及以上,信号的标准差会明显减小,那么电场的分辨率会显著提高,达到 $\mu\text{V}/\text{m}$ 以下到 nV/m 量级。

4.2 测量稳定性

为了测试电子开关调制测量电场的稳定性,通过电流源施加电流在海水中构建约 $8 \text{ mV}/\text{m}$ 的电场,持续采集10 h内的测量信号,同时对构建的源电场强度进行监测,结果如图10所示。

构建的源电场在10 h内的波动 $< 0.22\%$ 。源电场信号方差 $\sigma_s^2 = 9.0 \times 10^{-6} (\text{mV}/\text{m})^2$,将输出信号转换成对应的电场,再计算其方差为 $\sigma_i^2 = 7.36 \times 10^{-5} (\text{mV}/\text{m})^2$,输出信号方差包含了源电场方差与测量方差,即测量方差 $\sigma_m^2 = \sigma_i^2 - \sigma_s^2 = 6.46 \times 10^{-5} (\text{mV}/\text{m})^2$,测量标准差 $\sigma_m = 8.0 \mu\text{V}/\text{m}$ 。电极在测量10 h内测量到的最大值为 1.0509 mV ,最小值为 1.0449 mV ,漂移极差为 $6.0 \mu\text{V}$,

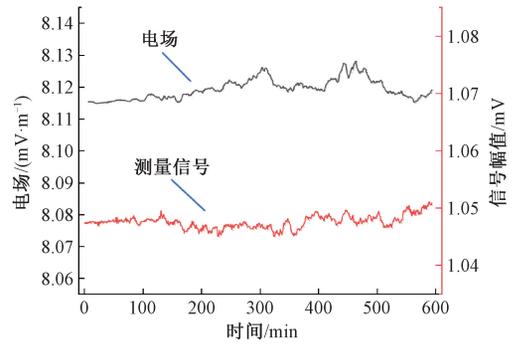


图10 系统的测量稳定性

Fig. 10 Measurement stability of the system

换算成电场为 $50.9 \mu\text{V}/\text{m}$ 。在相同电极间距下,比较文献[15],其采用自然电位法使用普通碳纤维电极的24 h测量漂移极差 $> 20 \text{ mV}/\text{m}$,折算成相同的时间范围漂移极差是提出原理的约100倍;比较文献[16],其中使用表面改性复合材料电极的24 h漂移极差为 $0.799 \text{ mV}/\text{m}$,是提出原理的8倍左右。由于电极不需要与海水导通,不会发生电化学反应,相对于自然电位法,在测量稳定性方面展现出较大的优势。

5 结论

本研究提出了电调制测量海洋电场原理,利用电子开关控制电极连接关系对检测区域的电场进行调制生成感应电流,通过实验验证了提出原理的可行性。相较于自然电位法,应用该原理在电极间距仅为 25 mm 、电极尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 条件下,对模拟海水中的直流电场测量灵敏度为 $117.87 \text{ mV}/(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$,最小分辨率为 $5.786 \mu\text{V}/\text{m}$ 。在测量时电极不需要与海水导通,杜绝了电极与海水发生电化学反应,电极性质保持稳定,10 h内的漂移极差为 $50.9 \mu\text{V}/\text{m}$ 。同时该原理不仅适用于海洋中电场的测量,也适用于非导电介质中电场的测量,在其他领域电场测量中也有着广泛的应用前景。

参考文献

- [1] XIE J, CUI Y AN, LIU J X, et al. A review on theory, modeling, inversion, and application of self-potential in marine mineral exploration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(4):1214-1232.
- [2] KAWADA Y, KASAYA T. Hydrogeological structure of a seafloor hydrothermal system deduced from a pair of positive and negative self-potential anomalies observed at the Oomuro-dashi hydrothermal field in the Izu-Ogasawara Arc, south of Japan [J]. Earth Planets and Space, 2024, 76(1):120.

- [3] LIU SH H, ZHANG Q SH, ZHAO X, et al. Study of an expendable current profiler detection method[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 132:40-44.
- [4] ZHANG L J, CUI Y AN, XIE J, et al. 3D inversion imaging of self-potential current source induced by mineral polarization [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35(3):945-953.
- [5] 郑朴真,林君,梁尚清,等. 基于电场检测的船表涂层破损仿真分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(11):90-98.
- ZHENG P ZH, LIN J, LIANG SH Q, et al. Simulation study on hull coating damage detection based on electric field measurement[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024,38(11):90-98.
- [6] WANG Y, WANG D, CHI CH, et al. Ship shaft-rate electric field signal denoising method based on VMD-MSS[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(4):544.
- [7] LEE H, JUNG H J, CHO S H, et al. Real-time localization for underwater moving object using precalculated DC electric field template[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10):5813-5823.
- [8] YU P, ZHANG J W, CHENG J F, et al. Analysis of the natural electric field at different sea depths[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16(1):01006.
- [9] SAFIPOUR R, HOLZ S, HALBACH J, et al. A self-potential investigation of submarine massive sulfides: Palinuro Seamount, Tyrrhenian Sea [J]. *Geophysics*, 2017, 82(6):A51-A56.
- [10] CONSTABLE S, KOWALCZYK P, BLOOMER S. Measuring marine self-potential using an autonomous underwater vehicle[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(1):49-60.
- [11] LUO W, DONG H B, XU J M, et al. Development and characterization of high-stability all-solid-state porous electrodes for marine electric field sensors [J]. *Sensors and Actuators A. Physical*, 2020, 301:111730.
- [12] 申振,宋玉苏,王焯焯,等. Ag/AgCl 和碳纤维海洋电场电极的探测特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2):211-217.
- SHEN ZH, SONG Y S, WANG Y X, et al. Study on the detection characteristics of Ag/AgCl and carbon fiber marine electric field electrodes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2):211-217.
- [13] 王焯焯,宋玉苏,申振,等. 碳纤维海洋电场电极响应特性分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(9):82-85.
- WANG Y X, SONG Y S, SHEN ZH, et al. Analysis to response characteristics of carbon fiber marine electric field sensing electrodes [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(9):82-85.
- [14] 王泽臣,林君,辛青,等. 新型碳纤维海洋电场电极的制备及性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(9):52-60.
- WANG Z CH, LIN J, XIN Q, et al. Preparation and property study of a new carbon fiber electrodes for marine electric field detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(9):52-60.
- [15] HAN Y K, ZAI X R, FU Y B. Effect of oxygen-containing groups on electrochemical and marine electric field response properties of carbon fiber electrode [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(14):13864-13871.
- [16] HU ZH H, SUN W B, HE T CH, et al. Ag/reduced graphene oxide/carbon fiber composites as electrodes for highly stable and responsive marine electric field sensors[J]. *Acs Applied Nano Materials*, 2023, 6(13):11154-11165.
- [17] HU ZH H, PENG Y D, GUO D Q, et al. Flexible composite Ag-AgNWs-CF as low noise marine electric field sensor [J]. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2022, 152:106711.
- [18] ZHANG ZH, SCHWANZ D, NARAYANAN B, et al. Perovskite nickelates as electric-field sensors in salt water [J]. *Nature*, 2018, 553(7686):68-72.
- [19] HIROSE Y, SAGAWA J, SIBAMOTO Y, et al. Coping with electrode polarization for development of DC-driven electrical impedance tomography [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 81:9.
- [20] LIU F H, CHUN SH H, CHEN R J, et al. A low-noise amplifier for submarine electric field signal based on chopping amplification technology [J]. *Sensors*, 2024, 24(5):1417.
- [21] 刘子逸,李平,王玉梅,等. 海洋电场变频调谐窄带抑制噪声的测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(2):305-313.
- LIU Z Y, LI P, WEN Y M, et al. Measurement of narrowband noise suppression by frequency tuning of marine electric field [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025,46(2):305-313.
- [22] TANT P, BOLSENS B, SELS T, et al. Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(4):1459-1464.
- [23] HARRISON R G, MARLTON G J. Fair weather electric field meter for atmospheric science platforms [J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, 107:103489.

- [24] LIU CH X, YUAN H W, LYU J X, et al. A sensor for 3-D component measurement of synthetic electric field vector in HVDC transmission lines using unidirectional motion[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72:1500110.
- [25] DE SA ANTUNES A, MARSHALL R, SOUSA A, et al. An array of low-cost, high-speed, autonomous electric field mills for thunderstorm research [J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(11):1309.
- [26] LI J M, ZHAO P H, YUAN H W, et al. Differential structure to improve performance of DC electric field sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(9):9909-9916.
- [27] CHU ZH ZH, PENG CH R, REN R, et al. A high sensitivity electric field microsensor based on torsional resonance[J]. *Sensors*, 2018, 18(1):286.
- [28] CHU ZH ZH, YANG P F, WEN X L, et al. A resonant electrostatic field microsensor with self-compensation for sensitivity drift [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(13):13917-13924.
- [29] KE K, YANG Q, ZHOU J L, et al. Piezoelectric PZT film-driven resonant torsional MEMS electric field sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(20):31921-31931.
- [30] YE J CH, LI P, WEN Y M. Marine electric field observations with variable dielectric polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(10):7841-7848.
- [31] YE J CH, LI P, WEN Y M. Polarization for weak marine electric field measurement: A new approach[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73:1-8.
- [32] 段震宇, 文玉梅, 叶敬昌, 等. 调制式海洋电场传感输出噪声抑制[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10):234-243.

DUAN ZH Y, WEN Y M, YE J CH, et al. A noise suppression method for modulated electric field sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10):234-243.

- [33] GRIFFITHS D J. *Introduction to electrodynamics* [M]. Cambridge University Press, 2023:66-74.

作者简介



李文来, 2021 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为海洋电场测量。

E-mail: lwlwllwl@sjtu.edu.cn

Li Wenlai received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2021. He is currently an M.Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interest is the measurement of marine electric field.



文玉梅 (通信作者), 1984 年于北京航空航天大学电子工程系获得学士学位, 1987 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位, 1997 年于重庆大学获得博士学位。现为上海交通大学自动化与感知学院、上海交通大学海底科学与划界全国重点实验室教授, 博士生导师。主要研究方向为信息获取与处理、传感器与仪器、能量采集。

E-mail: yumei.wen@sjtu.edu.cn

E-mail: yumei.wen@sjtu.edu.cn

Wen Yumei (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Department of Electrical Engineering, Beihang University in 1984, received her M.Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 1987, received her Ph.D. degree from Chongqing University in 1997. She is currently a professor and doctoral supervisor at School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University, and State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.