

一种新型海洋电场传感器的研究与设计

王志宇^{1,2} 王顺² 方广有² 张群英²

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 提出一种用于测量海洋电场信号的低噪声电场传感器,传感器包含一对钽电极和一块低噪声斩波放大器。钽电极通过将钽粉压制、烧结并经过阳极氧化制成。引入电化学阻抗谱以建立钽电极与海水两相界面的等效电路模型,建立斩波放大器的等效噪声电路并分析。测试结果表明,所设计的斩波放大器的等效输入电压噪声为 $0.42 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,钽电极的自噪声为 $0.67 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,传感器总体噪声为 $0.83 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。所设计传感器可用于微弱海洋电场信号的测量。

关键词: 海洋电场测量;低噪声;斩波放大器;电场传感器

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

A novel sensor for marine electric field measurement: Study and design

Wang Zhiyu^{1,2} Wang Shun² Fang Guangyou² Zhang Qunying²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper reports an ultralow noise sensor consisting of a novel tantalum electrode and a low noise chopper amplifier for marine electric field measurement. The tantalum electrode is manufactured by sintering high purity tantalum powders into a tight body and forming the tantalum oxide dielectric layer by anodizing the body. Electrochemical impedance spectroscopy is used to electrically characterize the interface. Noise circuit of the chopper amplifier is modeled. Electrical properties such as source impedance, frequency response and noise were measured. The measurement results imply that the chopper amplifier has a noise of $0.42 \text{ nV}/\text{rt}(\text{Hz})$, tantalum electrode has a noise level equivalent to a perfect resistor of 27 ohms, and the sensor system has a noise of $0.83 \text{ nV}/\text{rt}(\text{Hz})$. The ultralow noise sensor could be used for marine electric field measurement with high precision.

Keywords: marine electric field measurement; low noise; chopper amplifier; electric field sensor

1 引言

海洋电磁(EM)方法,包括海洋大地电磁法(MT)和海洋可控源电磁法(CSEM),现已被广泛应用于海洋石油、天然气资源的勘探中^[1-4]。无论 MT 方法还是 CSEM 方法,均需要对海洋电场信号进行测量。然而由于海水的高电导性,周期小于 1 000 s 的电场信号被严重衰减,深海中 1 Hz 频点处的感应电场信号低至 $10^{-9} \text{ V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[5-7]。并且由于在海洋中操作的不便利性,接收电极极距一般不超过 10 m。即使仅要求 20 dB 的信噪比,那么海洋电场传感器的噪声也需小于 $10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

通常采用测量两支相隔一定距离的电极的电势差来间接测量海洋电场。当前在海洋地球物理勘探中被广泛使用的是 Ag/AgCl 不极化电极^[2]。Ag/AgCl 电极主体通常包含银芯、氯化银和相应的填充物^[7]。由于银离子具有极大

的交换电流密度,因而电极与海水界面的接触电阻较小,并且小的电流干扰几乎不会对测量结果造成明显影响^[5]。然而,Ag/AgCl 电极的工作机制限制了电极噪声的进一步降低。通常认为电极与海水的接触电阻所产生的热噪声是 Ag/AgCl 电极的主要噪声来源。热噪声在数值上与电阻值的根方成正比,因而要求电极与海水的接触面积不能过小,以保证较小的接触电阻^[3,8]。电极噪声远大于接触电阻所产生的热噪声,尤其当频率低于 0.1 Hz 时表现更为明显^[5]。超额的噪声被认为与电极和电解质接触面的电化学反应及两支氯化银电极长时间的温度和盐度的差异有关^[9]。

20 世纪 90 年代 Crona 等人^[10]提出一种使用碳纤维制作的惰性电极,该电极使用数百万根比表面积达 $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 的碳纤维,以获得电极与电解质之间较大的接触面积。由

于碳纤维在海水中呈化学惰性,碳纤维电极表现出电容性。在频率高于 1 Hz 时一对电极的阻抗低于 10 Ω。随着频率的降低,电极阻抗迅速增加。碳纤维电极的噪声与 Ag/AgCl 电极噪声处于相似水平。然而由于相对高昂的成本,碳纤维电极并未被广泛使用。

本文尝试了一种新的海洋电极制作方法,以解决上述电极所存在的部分问题。新的海洋电极使用大比表面积的钽粉制成,具有较小的接触电阻,且成本较为低廉。由于海洋电场信号微弱,为高精度检测和传送电场信号^[11],本文提供了与钽电极相匹配的斩波放大器的制作方法。实验室测试数据表明该新型海洋电极具有与 Ag/AgCl 电极相接近的噪声水平,可应用于海洋电场的测量。

2 传感器原理

海洋电场测量系统可以等效为如图 1 所示的电路。记两支电极所在点电势分别为 φ_1 和 φ_2 , Z_{in} 为斩波放大器输入阻抗。将电极与海水的两相界面等效为常相位角元件 Z_{CPAi} 、电荷转移电阻 R_{cti} 和溶液电阻 R_{si} ^[12]。那么检测电路的输入电压为:

$$V_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{P1} + Z_{P2} + Z_{in}} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

式中: $Z_{Pi} = R_{si} + Z_{CPAi}(\omega) \parallel R_{cti}$ 。

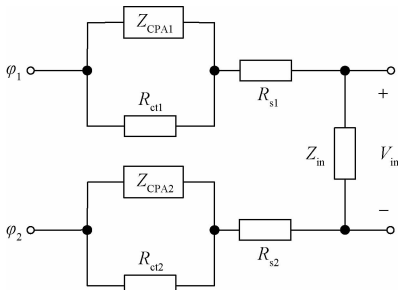


图 1 海洋电场传感器等效电路

常相位角元件表示因电极表面的弥散效应而表现出的非理想电容性行为,解析式为^[13]:

$$Z_{CPA}(\omega) = \frac{1}{Y(j\omega)^n} \quad (2)$$

式中: $0 \leq n \leq 1$; Y 为常数,且当 $n = 1$, Y 等于界面电容值; ω 为角频率。

电荷转移电阻 R_{ct} 定义为:

$$R_{ct} = \frac{RT}{J_0 z F} \quad (3)$$

式中: R 为气体常数, T 为温度, J_0 为稳态交换电流密度, z 为氧化还原反应中所涉及的电子数, F 为法拉第常数。对于理想不极化电极, J_0 趋近于无穷,因而 R_{ct} 趋近于零。理想极化电极则与之相反, J_0 趋近于 0, R_{ct} 趋近于无穷。

对于浸没于电解质密度为 ρ 的圆柱体电极,溶液电阻

由 Dwight 公式给出:

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi c} (\ln \frac{2c}{a} - 1) \quad (4)$$

式中: c 、 a 分别为电极的长度和直径。与电荷转移电阻和界面电容不同的是,溶液电阻取决于电极几何尺寸,而与真实表面积无关。

阻值为 R 的电阻所产生的热噪声为 $\sqrt{4kTR}$,通过式(2)~(4)可估算电极所产生的自噪声,尽管由于电化学反应的存在,估算值小于实际测量值,但其提供了提高电极性能的方向。

3 传感器系统

3.1 电极

简化的钽电极结构如图 2 所示。钽电极被固定于多孔套管之中,电极通过钽丝连接到水密接头的导线。多孔套管可以在防止电极遭受来自外部可能的撞击的同时,保证海水进入电极内部。环形腔内填充环氧树脂,以防止海水流入到水密接头内部。

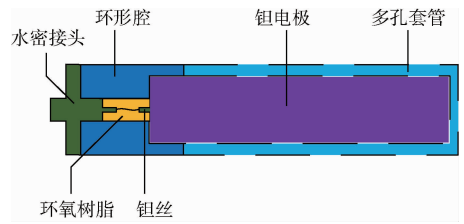


图 2 海洋电场传感器等效电路

为了形成具有大比表面积的钽电极,选用平均直径约为 2 μm 的高纯度钽粉。在模腔内将钽粉压制成具有一定强度和密度的阳极胚体,并预埋钽丝。将阳极胚体在真空炉中烧结成紧密块体,随后置于电解质溶液进行阳极氧化,最终形成具有氧化膜层的多孔结构体。在未加多孔套管时钽电极尺寸为直径 14 mm、长度 26 mm。

3.2 斩波放大器

低噪声斩波放大器(LNCA)使用斩波技术以降低来自放大器的电压失调和低频噪声。先将低频信号调制至白噪声频段,在放大之后再解调回基频。由于低频噪声和电压失调仅被调制一次,通过低通滤波后,被调制高频的低频噪声和电压失调将被滤除^[14]。

LNCA 在 Webb 所描述的经典结构上进一步改进^[2],如图 3 所示。第一斩波器由 4 个导通电阻为 0.7 Ω 的 CMOS 开关组成全差分结构,该斩波器由时钟频率为 f_{ch} 的方波控制。在第一级斩波器后,使用变压比为 1 : N 的音频变压器来进行隔离和提供一定的增益。隔离可以保证在电极地和仪器地之间无电气连接^[2]。在音频变压器后,一个低噪声 AC 放大器对调制后的信号作进一步放大。带通滤波器(BPF)的低频截止频率为 160 Hz,高频截止频率为 4 f_{ch} ,其用于消除由 CMOS 开关注入电荷所带来的电

压尖峰的影响。经过第二斩波器的同步解调,被放大后的调制信号恢复到基频,经低通滤波器(LPF)后高频噪声被滤除,输出信号将不再包含低频噪声和电压失调。

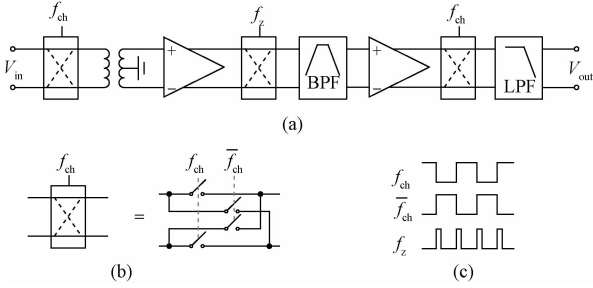


图3 LNCA的(a)基本框图;(b)斩波结构;(c)时钟序列

实际上由于时钟馈通效应和沟道电荷重新分配现象,CMOS开关在开启和关断时均产生注入电荷,这导致电压失调并不能完全消除^[14]。由于注入电荷与CMOS开关尺寸成正比,也即低导通电阻的模拟开关具有更大的注入电荷。为消除残余失调,另一个由时钟 f_z 控制的斩波器被放置于AC放大器和带通滤波器之间。在 f_{ch} 每个时钟的上升沿和下降沿触发后的短暂时间内,均通过 f_z 将第三斩波器设置为高阻态。该方法可以有效抑制注入电荷所带来的影响。

如图4所示,LNCA的等效噪声电路包括4个噪声源:第一斩波器导通电阻的热噪声、音频变压器绕线电阻的热噪声、AC放大器的电压噪声和电流噪声。对于全差分结构的斩波器,在任一时刻均有两支CMOS开关导通,记单支CMOS开关的导通电阻为 R_{on} 。音频变压器的初、次级绕线电阻分别为 R_{pt} 和 R_{st} , N 为初、次级的变压比。将AC放大器的电压噪声 e_n 和电流噪声 i_n 均换算到LNCA的输入端。认为各噪声源互不相关,那么LNCA等效输入噪声为:

$$V_n = \gamma \cdot \sqrt{4KTR + (e_n/N)^2 + (i_n N)^2 \cdot R^2} \quad (5)$$

式中: $R = 2R_{on} + R_{pt} + R_{st}/N^2$, K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。噪声系数 γ 为取决于带通滤波器高频截止频率的常数^[15]。本文将带通滤波器的高频截止频率设为 $4f_{ch}$,因而噪声系数为:

$$\gamma = 1.11 \cdot \sqrt{1 + 0.8525 \frac{f_k}{f_{chop}}} \quad (6)$$

式中: f_k 为AC放大器低频噪声的拐角频率。

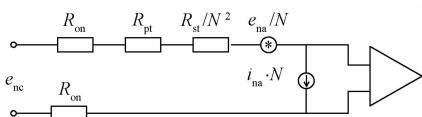


图4 LNCA等效噪声电路

由于音频变压器的变换作用,AC放大器的电压噪声对LNCA等效输入噪声的贡献几乎可以忽略。需要注意

的是,AC放大器的电流噪声等效到LNCA输入端时与变压比 N 成正比。因而即使LNCA应用于低源电阻的情况,仍需要对AC放大器仔细设计。本文中,音频变压器初、次级绕线电阻分别为3和1200 Ω ,变压比为1:25。AC放大器参数分别为 $e_n = 2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $i_n = 0.4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $f_k = 300 \text{ Hz}$ 。斩波频率设置为2kHz,因而噪声系数 γ 为1.17,等效输入电压噪声为 $0.4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

4 结果与讨论

在参数测试过程中,除特殊说明外,电极均浸没于配制的浓度为3.5%盐水中。由于钽电极的电容性,在电极间会存在初始电压。在进行噪声测量前,钽电极均在盐水中浸泡至少6h以使初始电压达到稳定。在噪声测量时,被测量物体包括LNCA和钽电极均放置于密闭的金属屏蔽桶中。LNCA的电源供电和钽电极的输出通过导线与外界相连。

4.1 钽电极源阻抗

使用电化学分析仪CHI604D测量浸没于盐水中两支电极间的阻抗。将测量数据使用Zsimpwin软件进行拟合,电极-电解质两相界面选用如图1所示的等效电路,拟合结果如图5所示,其中点线为实际测量值,实线为拟合值。在测量频率10Hz~10kHz,钽电极阻抗>10 Ω 。当频率低于1Hz时,阻抗与频率成反比,随着频率的降低,阻抗迅速增大。

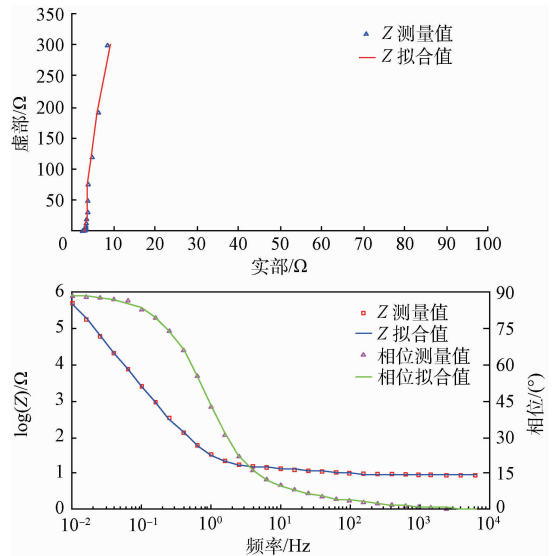


图5 钽电极的阻抗和相位曲线

4.2 钽电极漂移

使用安捷伦34970A数据采集单元对4支钽电极进行连续100h的数据采集,以观测钽电极的长时间电位变化。4支电极中,随机选取一支作为参考电极,将剩余3支作为待测量。由于34970A数据采集单元输入阻抗较高,为方便钽电极初始电压快速稳定,在每支待测电极和参考之间

并联 2 kΩ 电阻。测量结果如图 6 所示,钽电极平均电压漂移低于 50 μV/d。在测量的第 60~90 h 之间,有外部干扰导致测量曲线上出现尖峰。

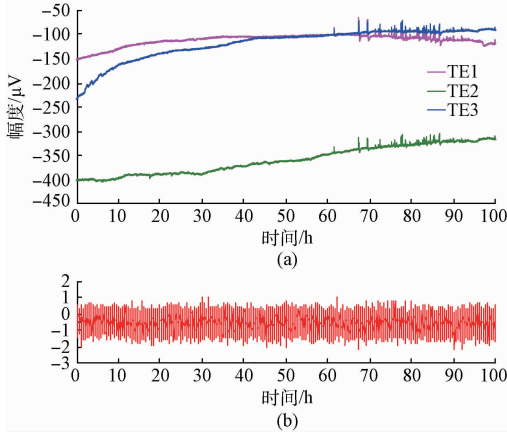


图 6 (a)钽电极的漂移曲线;(b)开关采集单元短路时的漂移曲线

4.3 放大器频率响应

LNCA 设计增益为 60 dB,频率响应为 DC-1 kHz。将钽电极放置于 3.5% 盐水中时,传感器带宽为 0.006 Hz~1 kHz,如图 7 所示。在第 2 部分的分析中知,界面电容与测试溶液的离子浓度相关。为验证离子浓度的影响,钽电极被浸没于新鲜的自来水中。此时传感器低频截止频率为 0.1 Hz。这说明离子浓度对传感器的截止频率造成影响,与分析相符。

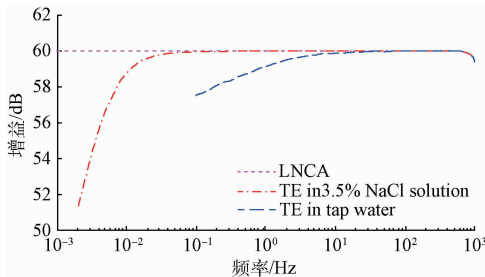


图 7 不同情况下传感器的频率响应曲线

4.4 钽电极与 LNCA 噪声

为了准确测量钽电极噪声,使用 LNCA 作为钽电极的前置放大器, LNCA 输出连接至安捷伦 35670A 动态信号分析仪。为屏蔽外界环境干扰,钽电极与 LNCA 均放置于电磁屏蔽装置中。测量结果如图 8 所示。LNCA 在输入短路时的电压噪声分别为 0.42 nV/√Hz,与式(5)计算值 0.4 nV/√Hz 几乎一致。在 LNCA 输入端分别接 27 Ω 电阻和一对钽电极时,等效输入噪声均为 0.83 nV/√Hz,也即钽电极自噪声与 27 Ω 电阻热噪声一致,为 0.67 nV/√Hz。

经过斩波技术的应用, LNCA 的噪底在测量频段内几乎平坦。当 LNCA 输入端接钽电极时,由于钽电极在频率

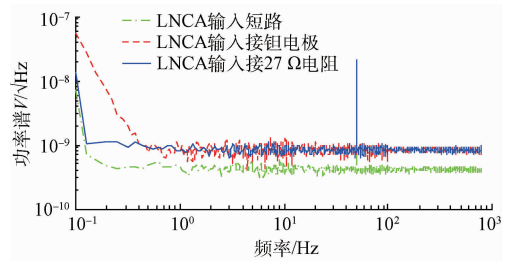


图 8 LNCA 在输入短路、输入接钽电极和输入接 27 Ω 电阻时的噪声曲线

低于 1 Hz 时阻抗迅速增加,导致低频噪声增大,拐点约为 0.4 Hz。由于海水对低频海洋电场信号的衰减作用减弱,海洋电场信号强度在 1 Hz 以下时也与频率成反比。因而尽管电场传感器在低频区域噪声增大,但也能达到足够的信噪比。

5 结 论

本文提出了一种适用于海洋电场测量的低噪声电场传感器,其包含钽电极和低噪声斩波放大器。与通常使用的海洋 Ag/AgCl 电极不同,钽电极作为化学惰性电极,依靠感应方式测量海洋电场。钽电极电压漂移低于 50 μV/d,自噪声水平为 0.67 nV/√Hz,与 Ag/AgCl 电极相关参数处于同等量级,但钽电极成本较为低廉。

建立了斩波放大器的噪声电路,实际设计的斩波放大器噪声与理论计算值一致。通过匹配该斩波放大器,传感器系统具有 6 mHz~1 kHz 的频率范围,整体噪声为 0.83 nV/√Hz,满足实际应用需求。

参 考 文 献

- [1] FANAVOLL S, ELLINGSRUD S, GABRIELSEN P T, et al. Exploration with the use of EM data in the barents sea: The potential and the challenges [J]. First Break, 2012, 30(4): 89-93.
- [2] CONSTABLE S. Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding [J]. Geophysical Prospecting 2013, 61(S), 505-532.
- [3] CONSTABLE S. Ten years of marine csem for hydrocarbon exploration [J]. Geophysics, 2010, 75(5): 75A67-75A81.
- [4] MITTET R, MORTEN J P. The marine controlled source electromagnetic method in shallow water [J]. Geophysics 2013, 78(2), E67-E77.
- [5] WANG Z, DENG M, CHEN K, et al. Development and evaluation of an ultralow-noise sensor system for marine electric field measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical 2014, 213(7): 70-78.

- [6] 魏晓, 丁忠军, 吴俊飞, 等. 高精度海底沉积物四点电极电阻率探针研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(9): 810-816.
- [7] 苏里阳, 杨日杰, 姜超, 等. 基于单片机的海洋温深测量装置设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 90-93.
- [8] HUIGEN E, PEPPER A, GRIMBERGEN C A. Investigation into the origin of the noise of surface electrodes[J]. Medical and Biological Engineering and Computing 2002, 40(3):332-338.
- [9] HAVSGÅRD G B, JENSEN H R, KURRASCH A. Low noise Ag/AgCl electric field sensor system for marine CSEM and MT applications [C]. 7th International Marine Electromagnetics MARELEC Conference, 2011.
- [10] CRONA L, FRISTEDT T, LUNDBERG P, et al. Field tests of a new type of graphite-fiber electrode for measuring motionally induced voltages [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 2001, 18(1): 92-99.
- [11] 王秀华. 前置低噪声放大器的研究和设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6), 35-37.
- [12] FRANKS W, SCHENKER I, SCHMUTZ P, et al. Impedance characterization and modeling of electrodes for biomedical applications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2005, 52(7): 1295-1302.
- [13] RAHMAN A R A, PRICE D T, BHANSALI S. Effect of electrode geometry on the impedance evaluation of tissue and cell culture[J]. Sensors and Actuators B: Chemical 2007, 127(1), 89-96.
- [14] WITTE J F, MAKINWA K A A, HUIJSING J H. Dynamic offset compensated instrumentation amplifiers[C]. Dynamic Offset Compensated CMOS Amplifiers, 2009: 67-84.
- [15] 陈毅强, 王玉田, 李泓锦, 等. 压电加速度计本底噪声研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 951-960.

作者简介

王志宇, 在读博士研究生, 主要研究方向为电场传感器、低噪声放大器技术等。

E-mail: wangzhiyu11@sina.com

王顺, 助理研究员, 主要研究方向为空间电离层探测技术、接收机技术等。

E-mail: swang@mail.ie.ac.cn

方广有, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带雷达成像理论与方法、地下资源电磁勘探技术、超宽带天线理论与技术和太赫兹成像技术等。

E-mail: gyfang@mail.ie.ac.cn

张群英, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为领域的新方法、新技术、新应用研究, 及微波成像信号处理与成像方法。

E-mail: qyzhang@mail.ie.ac.cn