

doi: 10.7690/bgzdh.2025.04.009

海洋极低频电场传感器结构设计

秦裕航^{1,2}, 胡佳飞², 周勇¹, 杜青法²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 中国人民解放军国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 针对探测海洋极低频电场对于传感器灵敏度要求高的特点, 提出一种新型的电场传感器结构设计方案。基于海洋电场放大效应, 开展传感器结构设计仿真研究, 通过引入拓扑优化和形状优化的方法提高被测电场幅度, 提升电场传感器的灵敏度。仿真结果表明: 结构设计后的海洋电场传感器相比无壳体传感器, 灵敏度提高了 2.28 倍。

关键词: 海洋电场传感器; 极低频电场; 结构设计; 优化

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Structural Design of Marine Extremely Low Frequency Electric Field Sensor

Qin Yuhang^{1,2}, Hu Jiafei², Zhou Yong¹, Du Qingfa²

(1. Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China

South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In view of the high requirements for sensor sensitivity in detecting marine extremely low frequency electric fields, a new electric field sensor structure design scheme is proposed. Based on the amplification effect of marine electric fields, this study conducts simulation research on sensor structure design, and improves the amplitude of the measured electric field and the sensitivity of the electric field sensor by introducing topology optimization and shape optimization methods. The simulation results show that the sensitivity of the marine electric field sensor after structural design is 2.28 times higher than that of the sensor without a shell.

Keywords: marineelectric field sensor; extremely low frequency electric field; structural design; optimization

0 引言

海洋极低频电场是指 TLF(0.03 ~ 3 Hz)、ELF(3 ~ 30 Hz)频段的电磁波, 由船只、电缆以及海洋自然环境等产生^[1]。电场传感器是获取海洋电场信号的关键, 通常由传感电极、低噪声放大电路、数据采集与处理等模块组成。在测量时, 不同位置的电极因海水电场的作用产生电位差, 经放大、滤波后传输至采集系统。由于被测电场信号非常微弱, 对传感器的性能要求相对较高。一般来说, 要求电场传感器在极低频范围内的灵敏度需达到 $\mu\text{V}/\text{m}$ 或更小^[2]。

海洋电场传感器在测量电场过程中, 传感器壳体结构、材料选择以及传感电极的位置等会改变电场分布从而导致电场畸变。尽管电场畸变的存在可能会使得被测电场数据失真^[3], 但特定结构下引起的畸变可以造成电场的放大效应, 有利于提高传感器的灵敏度。程锦房等^[4]对海洋电场传感器附近的均匀电场畸变进行了分析与计算。结果显示, 电场放大的程度主要受传感器测量体材料与海水电阻率

的比值的影 响, 该结论通过海水水池实验得到了验证。张华等^[5]通过麦克斯韦方程组计算并实验验证了规则球形传感器引起的电场放大效应, 并给出了相关的影响公式。

尽管电场传感器在测量海洋极低频电场方面取得了显著进展, 但通过优化传感器结构以增大其电场测量灵敏度的研究还较为缺乏。针对此, 笔者基于电场放大效应开展电场传感器结构设计。

1 电场放大效应

海洋电场传感器的电极通常使用 Ag/AgCl 或碳纤维等, 采用一体化三分量电极形式, 以一定间距将电极分别固定在承压舱外壳上的特定位置, 组成测量系统^[6]。当然, 通过一些优化措施, 测量电极也可测量大于水下电场强度本身的电场信号。图 1 展示了 2 种传感器电极的封装样式^[7]。

为了定量分析水下绝缘测量体对水下电场的影响, 笔者在保持适用性的基础上, 构建了简化模型^[3]: 设海水为电导率 σ_1 均匀且无限扩展的介质; 壳体为电导率 σ_2 近似于 0 的标准球体, 半径为 r_0 ;

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-09-25

第一作者: 秦裕航(1999—), 男, 四川人, 硕士。

海水中分布电流密度为 j_0 的均匀电流场。如图 2 所示，模型采用球极坐标系，球心为坐标原点，极轴方向与均匀电流场的方向一致。该设置下，球外 U_1 和球内电位 U_2 均由正常电位和异常电位叠加而成。

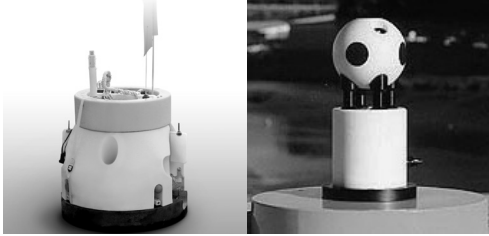


图 1 海洋电场传感器的封装样式

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_0 + U_{1a} \\ U_2 &= U_0 + U_{2a} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： U_0 为均匀电场的正常电位； U_{2a} 为球内异常电位； U_{1a} 为球外异常电位；

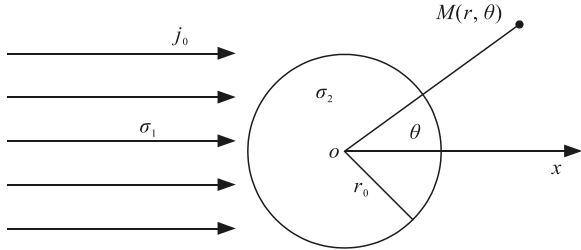


图 2 海洋均匀电场球坐标系

取原点为参考零电位，均匀电场的正常电位为：

$$U_0 = -j_0 r \cos \theta / \sigma_1 \quad (2)$$

在全 3 维空间中，拉普拉斯方程的球坐标形式为：

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} = 0 \quad (3)$$

3 维球坐标下拉普拉斯方程的一个特殊情况，由于球外、球外异常电位 U_{1a} 、 U_{2a} 不依赖于方位角 ϕ ，也就是说，问题具有轴对称性。当问题不依赖于 ϕ (即 $\partial^2 \Phi / \partial \phi^2 = 0$)，上述方程简化为：

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (4)$$

异常电位 U_a 应满足极限条件：球内异常电位 U_{2a} 有限；球外异常电位 U_{1a} 在 $r \rightarrow \infty$ 处为零。得到异常电位为：

$$\left. \begin{aligned} U_{2a}(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^n P_n(\cos \theta) \\ U_{1a}(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(2)，可以得到球内外电位的一般表达式：

$$\left. \begin{aligned} U_{2a}(r, \theta) &= -\frac{j_0 r \cos \theta}{\sigma_1} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^n P_n(\cos \theta) \\ U_{1a}(r, \theta) &= -\frac{j_0 r \cos \theta}{\sigma_1} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对于球体分界面上，即当 $r=r_0$ 时，电位和电流密度法线分量连续的衔接条件：

$$\left. \begin{aligned} U_2(r, \theta) &= U_1(r, \theta) \\ \sigma_1 \cdot \frac{\partial U_1(r, \theta)}{\partial r} &= \sigma_2 \cdot \frac{\partial U_2(r, \theta)}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

联立式(5)和(6)，求解可以得到待定系数 A_n 和 B_n 并带入式(6)。

$$\left. \begin{aligned} U_2(r, \theta) &= -\left[1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\sigma_1 + \sigma_2} \right] \frac{j_0 r \cos \theta}{\sigma_1} \\ U_1(r, \theta) &= -\left[1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\sigma_1 + \sigma_2} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right] \frac{j_0 r \cos \theta}{\sigma_1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

所以，当球体材料为绝缘材料时， σ_2 近似于 0，在球体表面 (即 $r=r_0$) 时，有：

$$U_1/U_0 = 1.5 \quad (9)$$

海水中绝缘球体表面的电势为相同位置无水下测量体的 1.5 倍。

2 电场传感器仿真与设计

通过理论计算可以得到规则球体对被测电场的放大幅度倍数，但不规则传感器结构对电场的影响却无法计算。笔者利用有限元仿真的方法计算不同传感器结构对电场的影响，最大限度地利用电场放大效应提高海洋电场传感器的灵敏度。

2.1 模拟球形壳体放大效应

设置模拟海洋环境，海洋环境和电场尺度远大于电场传感器尺寸，避免传感器结构与环境尺寸耦合造成电场放大效应不真实。分别把无壳体电极对、带绝缘球体的电极对放置于相同参数的海洋环境中，如图 3 所示。在 x 轴方向上施加 100 mV 电势， x 轴负方向端接地，模拟海水环境中的电场。通过有限元方法计算电极对上的电位差。结果表明：单独电极对上的电位差为 8.01 mV，带绝缘球体的电极对电位差为 12.16 mV，带球体电极对电位差是单独电极对的 1.52 倍，与理论计算的球体电场放大效应接近。

2.2 2 维拓扑优化

为了初步确定电场传感器的结构，通过拓扑优

化的方式来寻找传感器材料的空间分布。把模拟海洋环境和电极投影到 xy 平面,以电极为中心设置优化区域。优化目标为电极上的电势最大,优化区域中的绝缘材料密度为控制变量,平均材料体积因子为约束。其中,控制变量初始值为 0.5;优化区域电导率 σ 由材料体积分数 θ 决定。在拓扑优化进程中,利用双曲正切投影的方法来控制优化进程,投影斜率 β 从 0.5 成倍数增长到 8,以提高优化速度。

拓扑优化的结果如图 4 所示,正方形优化区域中 A 部分为绝缘材料填充区域。若优化区域完全为海水,电极的电势为 65.56 mV,而优化后电势为 72.75 mV,说明电极对间的绝缘结构能提高电势,确定了凹形绝缘结构和电极嵌入绝缘壳体深度。

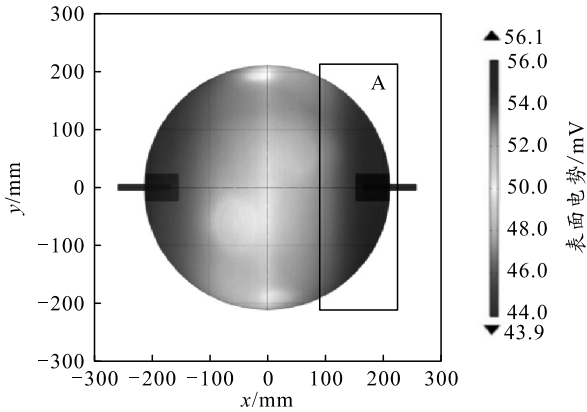


图 3 绝缘球体的电场放大效应仿真

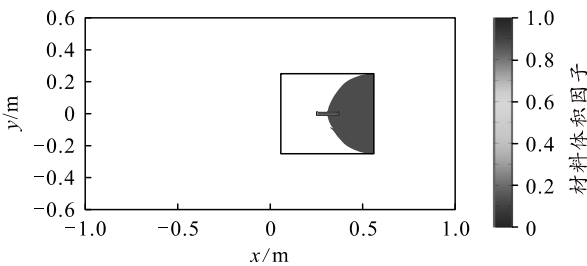


图 4 2 维拓扑优化结果材料分布

2.3 2 维形状优化

把拓扑优化得出的电极嵌入绝缘体的深度结构作为固定边界,通过形状优化的方法进一步优化传感器结构。形状优化的优化目标为电极对上的电位差最大,边界的形变为控制变量,传感器结构的加权面积为约束条件。优化过程中,边界的形变由伯恩斯坦多项式的方法来控制,经多次优化分析,采用 10 阶伯恩斯坦方程,能够保证转角斜率较高同时不会出现很多反转网格单元。由于边界可以用多项式表达,所以,边界绕 x 轴形成的空间体体积可以用 $V = \pi \int_a^b [f(x)]^2 dx$ 来表示,以传感器壳体体积不大

于球形壳体传感器为约束来进行优化计算。

形状优化结果如图 5 所示,优化后电极对的电势差为 27.66 mV,相对于无壳体情况下的 7.88 mV 有显著提升。

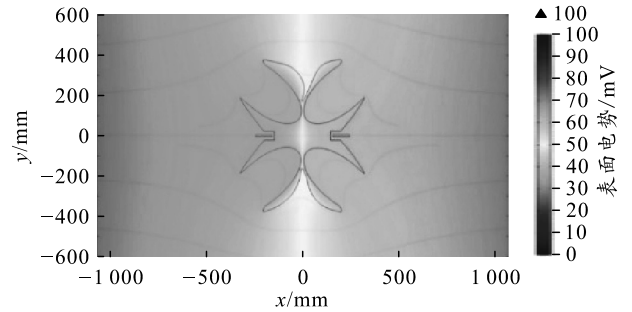


图 5 2 维形状优化前后电势分布

2.4 优化结构拓展到 3 维

把图 5 所示的平面结构绕 x 轴(穿过电极对)旋转 180° 得到如图 6 所示的 3 维传感器壳体结构。

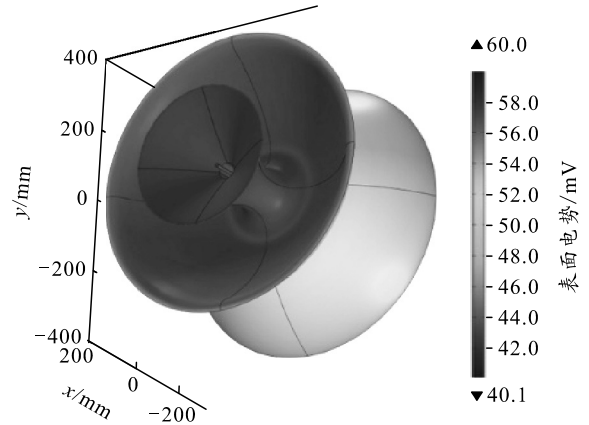


图 6 优化结构传感器模拟电势分布

经优化设计后传感器结构,其壳体体积为 0.0313 m^3 ,小于球形壳体 0.0333 m^3 。无壳体电极对电位差为 8.01 mV,球形壳体电极对电位差为 12.16 mV,而优化结构的电位差为 18.27 mV,相比无壳体电极对放大了 2.28 倍。

3 结束语

通过优化传感器壳体结构的方式能提高被测电场幅度,是有效提高海洋电场传感器灵敏度的手段。

参考文献:

[1] 陶登虎,沈超超,奚馨,等.海洋电场传感器综述[J].南通大学学报(自然科学版),2023,22(2):1-11.
 [2] MAKSIMENKO V G. Increasing the Sensitivity of a Marine Electrode Sensor of an Electric Field[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2023, 68(12): 1388-1393.