

板状电极在试验水池激励水下电场的数值仿真与实验验证

胡平*^① 岳瑞永^① 吕俊军^① 崔培^②

(^①水下测控技术重点实验室,辽宁大连 116013; ^②大连测控技术研究所,辽宁大连 116013)

胡平,岳瑞永,吕俊军,崔培. 板状电极在试验水池激励水下电场的数值仿真与实验验证. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 991-998.

摘要 利用水下电场传感器进行海洋大地电磁勘探时,水下电场测试的准确性和可靠性直接影响最终的勘探结果。水下电场传感器校准工作是在试验水池中进行的,评价该工作性能的关键技术指标有:试验水池中激发的水下电场的均匀性,水下电场均匀区的大小,系统供电电极激励源(电压或电流)注入位置以及数量等关键参数对水下电场均匀性的影响,不同的板状电极电导率与试验水池溶液电导率对水下电场均匀性的影响。这些工作目前在中国还是空白,试验结果证明可有效地解决上述技术难题。

关键词 板状电极 试验水池 水下电场 均匀性 电导率

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.05.024

1 引言

大地电磁测深法是利用天然交变电磁场作为场源研究地球内部电导率的一种方法,该方法在陆上的应用已较为成熟,在海域的应用研究进展缓慢。最早的海洋电场测量是在1912~1926年,法国的Schlumberger兄弟在直流电法的基础上完成了首次水上电阻率测量,目的是为海洋工程查明海床结构^[1]。从20世纪30年代到60年代早期,海洋电磁法的研究几乎停滞。20世纪60年代末期到20世纪70年代末人们开始把目光转向海底环境,这是海洋电磁研究的起步阶段。近年来,随着海洋地球物理研究的深入,人们发现将探测对象从陆地延伸到海洋后,海洋电磁法作为一种非地震勘探方法,已成为盐体、灰岩及火山岩等地震资料反射不清楚区域的补充勘探手段,且已证明在海底资源勘探中有其独特的应用效果^[2~7]。大约自20世纪80年代起,西方地球物理工作者把大地电磁法应用于海洋环境中视为海洋研究的一项高新技术,在这一前沿领域

投入了大量研究,进行了理论和实践探索^[8,9],不断改进数字仪器技术^[10]、数据处理算法和资料解释方法^[11~14],使海洋大地电磁测深法逐步走向成熟。在中国,1998年国家“863计划”资助中国地质大学等单位开展海洋大地电磁探测的研究^[15],之后,吉林大学、中南工业大学、同济大学等加入海洋电磁勘探的研究^[16,17]。由于海洋环境较之陆地环境复杂,使得对海洋环境中电磁场的探测进展缓慢,且出现许多技术问题,如水下电场传感器的研制、水下电场传感器标校方法研究等。邓明等^[18]已开发出一套较为完备的探测体系,其中包括水下电场传感器的研制,但由于缺乏水下电场传感器标校方法,水下电场测试的准确性和可靠性受到影响,阻碍了大地电磁法的进一步发展。

测定水下电场传感器校准系数的方法在国外已较为成熟^[19],国内由于缺乏获取水下电场传感器校准系数的手段,尚未建立专门的传感器校准装置,尤其对传感器校准的关键技术,即如何在水池中产生一定体积的均匀电场缺乏理论和试验研究。本文利用Ansoft Maxwell软件对水下电场分布进行了仿

* 辽宁省大连市中山区滨海街16号,116013。Email:36423818@qq.com

本文于2013年12月17日收到,最终修改稿于2015年8月4日收到。

本研究受水下测控技术重点实验室项目(申请号:9140c260301140c26116)和技术基础科研项目(J082011B009)联合资助。

真,获取了水下电场分布垂直切面和水平切面图,进而定量确定试验水池均匀区范围;通过大量数值仿真确定了水下电场均匀区的最优均匀性的激励源注入点位置以及数量等关键参数;模拟了板状电极与水池试验溶液电导率变化对水下电场均匀性的影响;并结合实验室水池试验对水下电场分布形态进行了验证。

2 理论分析与物理建模

2.1 理论分析

水下电场传感器在使用过程中,由于其前端测量电极和后端电路引起的电位偏移以及非金属密封壳体引起的水下电场畸变(图 1)会造成水下电场传感器测量值与真实电场值存在一定的偏差,进而影响到水下电场最终反演结果的准确性和可靠性,因此水下电场传感器校准是获得有效测量数据的必要步骤。水下电场传感器校准可消除上述因素对水下电场测量的影响,其基本原理是利用板状或者网状金属电极在非金属材料水池中激发具有一定尺度均匀区的水下电场,将水下电场传感器置于试验水池水下电场均匀区内进行测量,获得水下电场传感器的校准系数,水下电场电极示意图如图 2 所示,水下电场传感器校准示意图如图 3 所示,水下电场传感器校准原理图如图 4 所示^[19],其中图 4 中公式 $j = \sigma E$ 为欧姆定律的一种表达形式,代表了电流密度 j 和电场强度 E 与电导率 σ 的关系。利用标准系数对水下电场传感器测量数据进行修正,可消除密封壳体引起的水下电场畸变以及测量电极电位偏移等影响,保证水下电场的测量精度。由此可见,试验水池中激发水下电场的均匀性以及均匀区的范围是评估水下电场传感器校准系统工作性能的关键技术指标之一。

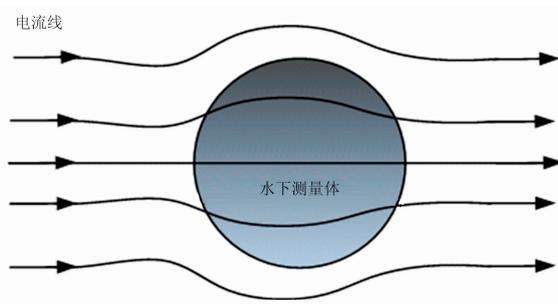


图 1 密封壳体引起的水下电场的畸变

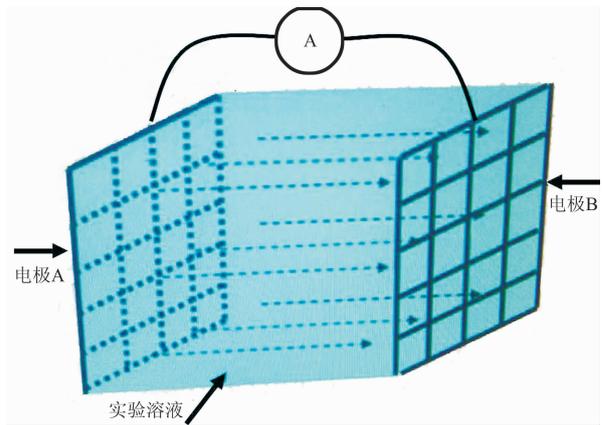


图 2 水下电场电极示意图

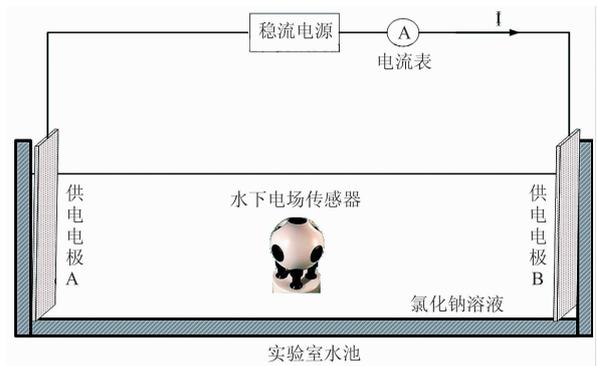


图 3 水下电场传感器校准实验示意图

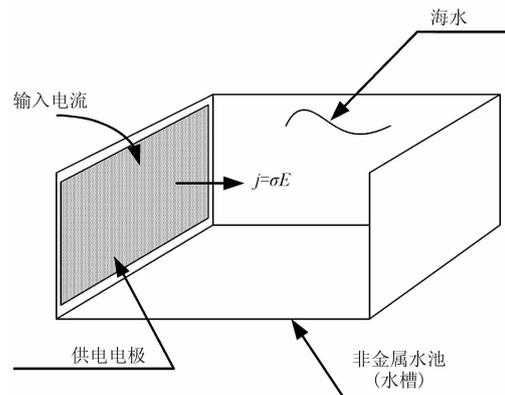


图 4 水下电场传感器校准原理图

2.2 公式推导

首先给出水池电场计算原理^[20]。

以标量电位 u 作为水池待求电位, ϵ 为介电常数, μ 为磁导率, ρ 为体电荷密度, t 表示时间变量,应用洛伦兹规范条件得到水池中电位表达式为

$$\nabla^2 u - \epsilon\mu \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

水池外侧接触区域为绝缘外壳(即电流密度法

向分量为 0), 则该电位满足如下边界条件

$$\begin{cases} u = u_0 \\ j_n = -\sigma \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_0 为未添加激励源时的水池电位; n 为边界外法线方向; j_n 为电流密度法向分量; σ 为水池中的海水电导率。

式(1)为泊松方程, 可以利用有限元方法求解, 将式(1)利用变分法离散并将边界条件(式(2))代入得到总系数方程

$$\mathbf{S}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: \mathbf{U} 为 $n \times 1$ 个标量电位 u 形成的列矩阵, 用 u_j 表示, 代表 n 个待求解的电位值; 系数矩阵 \mathbf{S} 为 $n \times n$ 的矩阵, 由各单元相应项组合

$$\begin{cases} \mathbf{S} = [S_{ij}] \\ [S_{ij}] = \sum_{e=1}^{e_n} S_{ij}^e \\ S_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \epsilon^e \mu^e \nabla N_i^e \cdot \nabla N_j^e d\Omega \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = [u_j] \quad (5)$$

式中: e 为插值节点; e_n 为总的插值节点数; N 为插值基函数; N_i^e 为第 e 个插值节点上的第 i 个插值基函数; N_j^e 为第 e 个插值节点上的第 j 个插值基函数; Ω 为求解域; Ω^e 为第 e 个插值节点的求解域; S_{ij}^e 为与第 i 插值基函数和第 j 插值基函数相关的第 e 个节点的积分函数; S_{ij} 为 S_{ij}^e 从第 1 个插值节点到第 e_n 个插值节点的求和。

\mathbf{F} 为 $n \times 1$ 的矩阵, 同样由各单元项组合得到

$$\begin{cases} \mathbf{F} = [F_i] \\ [F_i] = \sum_{e=1}^{e_n} F_i^e \end{cases} \quad (6)$$

$$F_i^e = \int_{\Omega^e} \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right)^e N_i^e d\Omega \quad (7)$$

式中: F_i^e 为与第 i 个插值基函数相关的第 e 个插值节点上积分函数; F_i 为 F_i^e 从第 1 个插值节点到第 e_n 个插值节点的求和。

进而得到有限元的离散矩阵形式为

$$\sum_{j=1}^n S_{ij} u_j = F_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

得到节点坐标和场数据后, 可以根据插值基函数计算得到单元内各坐标点的电位值。于是得到该方程的离散矩阵方程组形式, 采用上述方法形成有

限元方程, 利用有限元方程的有效解法, 即通过基于四面体的单元离散模型近似实际的模型后, 利用高斯消元法求得水池电位 u 。一旦标量电位值求解得到, 利用下式

$$\mathbf{E} = -\nabla u \quad (9)$$

可以得到水池电场强度 \mathbf{E} 。

2.3 物理建模

利用 Ansoft Maxwell 软件对板状电极在试验水池中产生的水下电场的物理建模步骤如下:

(1)模型搭建, 电极板为图 5 中体积为 $0.1\text{m} \times 6\text{m} \times 2\text{m}$ 的绿色立方体, 试验水池即图 $8\text{m} \times 6\text{m} \times 2\text{m}$ 的整个长方体区域, 测量均匀区即图 5 试验水池正中间体积为 $2.5\text{m} \times 1.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 的红色小正方体, 试验水池外面的绝缘外壳即图 6 中最外面的体积为 $8.4\text{m} \times 26\text{m} \times 22\text{m}$ 的长方体去掉中间的区域;

(2)指定材料属性, 在建立模型后, 选取电极板初始电导率分别为 $1320000, 13200, 132, 1.32\text{S/m}$, 试验溶液初始电导率分别为 $2.7, 270, 27000\text{S/m}$, 绝缘外壳的电导率为 $1.0 \times 10^{-20}\text{S/m}$;

(3)设定边界条件和源, 在建模过程中试验水池外侧接触区域为绝缘外壳(即电流密度法向分量为 0)来保证建模精度, 另外为了减小边界效应, 绝缘外壳尺寸比水池尺寸大很多, AnsoftMaxwell 自动生

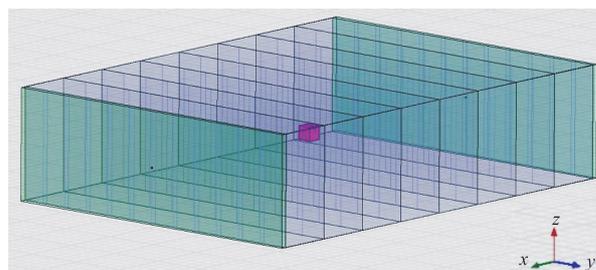


图 5 试验水池模型图

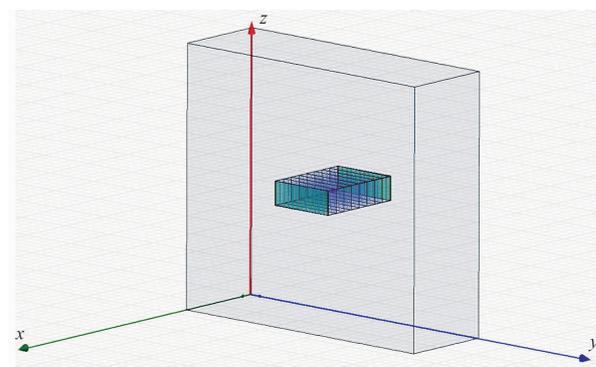


图 6 含有绝缘外壳的试验水池模型

成边界条件满足该模型。当两极板分别有一个注入点时,左右极板注入点的注入电压分别为 5V 和 -5V。当两极板分别有两个注入点时,左右极板注入点的注入电压分别为 2.5V 和 -2.5V;当两极板分别有四个注入点时,左右极板每个注入点的注入电压分别为 1.25V 和 -1.25V;

(4)划分网格设定求解选项,对模型进行网格剖分时,Ansoft Maxwell 软件采用四面体网格剖分,先采用自适应剖分进行求解,如果剖分质量较差,网格形状过于奇异,则需要将四面体网格最大边长变小,进行进一步加密处理;

(5)求解和分析。

3 模拟结果

通过数值仿真可以给出不同情况下试验水池中指定面水下电场分布,不同的激励源位置,不同的注

入点数目以及试验溶液和极板电导率变化对试验水池水下电场均匀区均匀性的影响。

下面给出具有代表性的两组图:垂直切面电场分布图和水平切面电场分布图。其中海水电导率为 2.7S/m,电极板电导率为 132S/m,注入点 1 个,位于极板中央,注入电压为 5V。

3.1 垂直切面电场分布

给出 y 从 0m 变化到 6m, z 从 0m 变化到 2m, $\Delta y=0.006m$, $\Delta z=0.002$, x 从 0.1m 变化到 8.1m, $\Delta x=1m$ 时,选取的 9 个 yz 垂直切面的电场分布(图 7)。

从上面 9 组垂直切面的电场分布图可知,以试验水池正中心为原点向外扩散,同一色阶区域最大的是位于试验水池垂直中心面的图 7e。同一色阶代表同一电场分布值,即图 7e 电场均匀区最大,而其他切面,离该切面越远以中心为原点的同一色阶范围越来越小,电场均匀区越来越小。

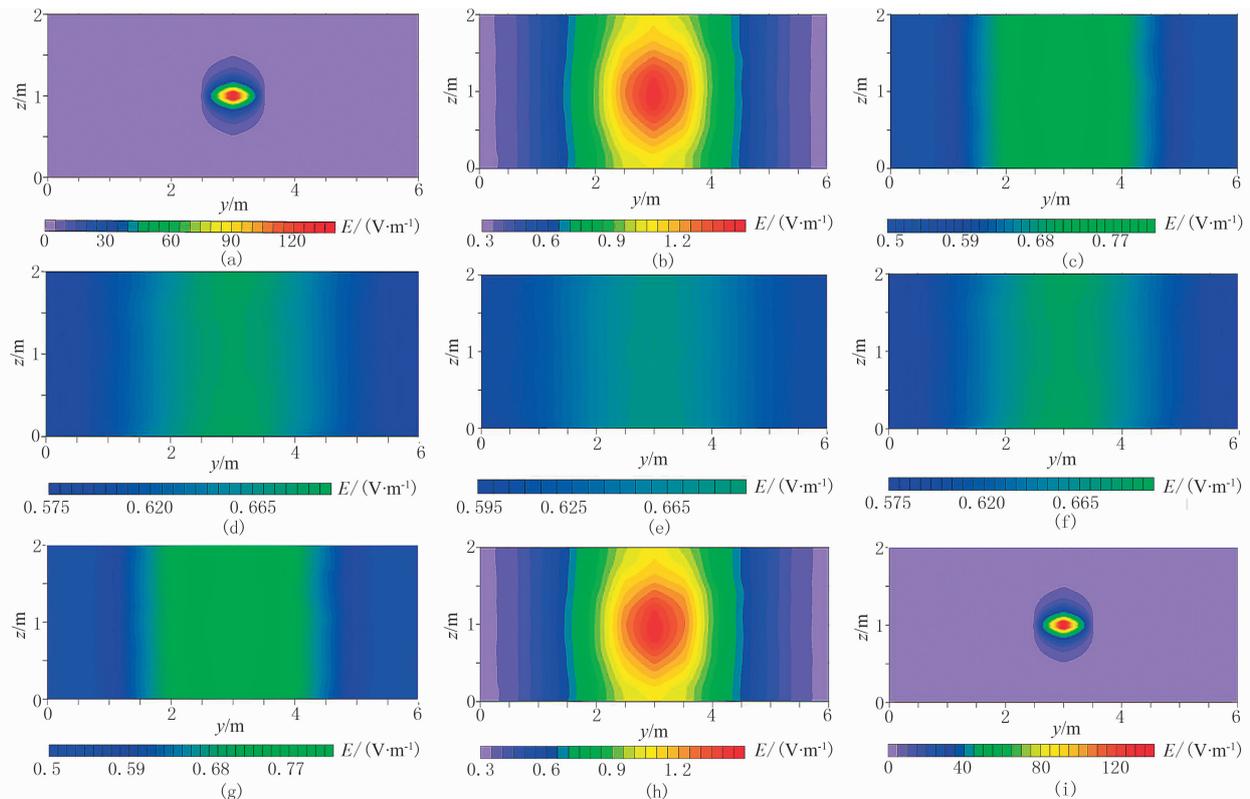


图 7 x 不同时的垂直切面电场分布图

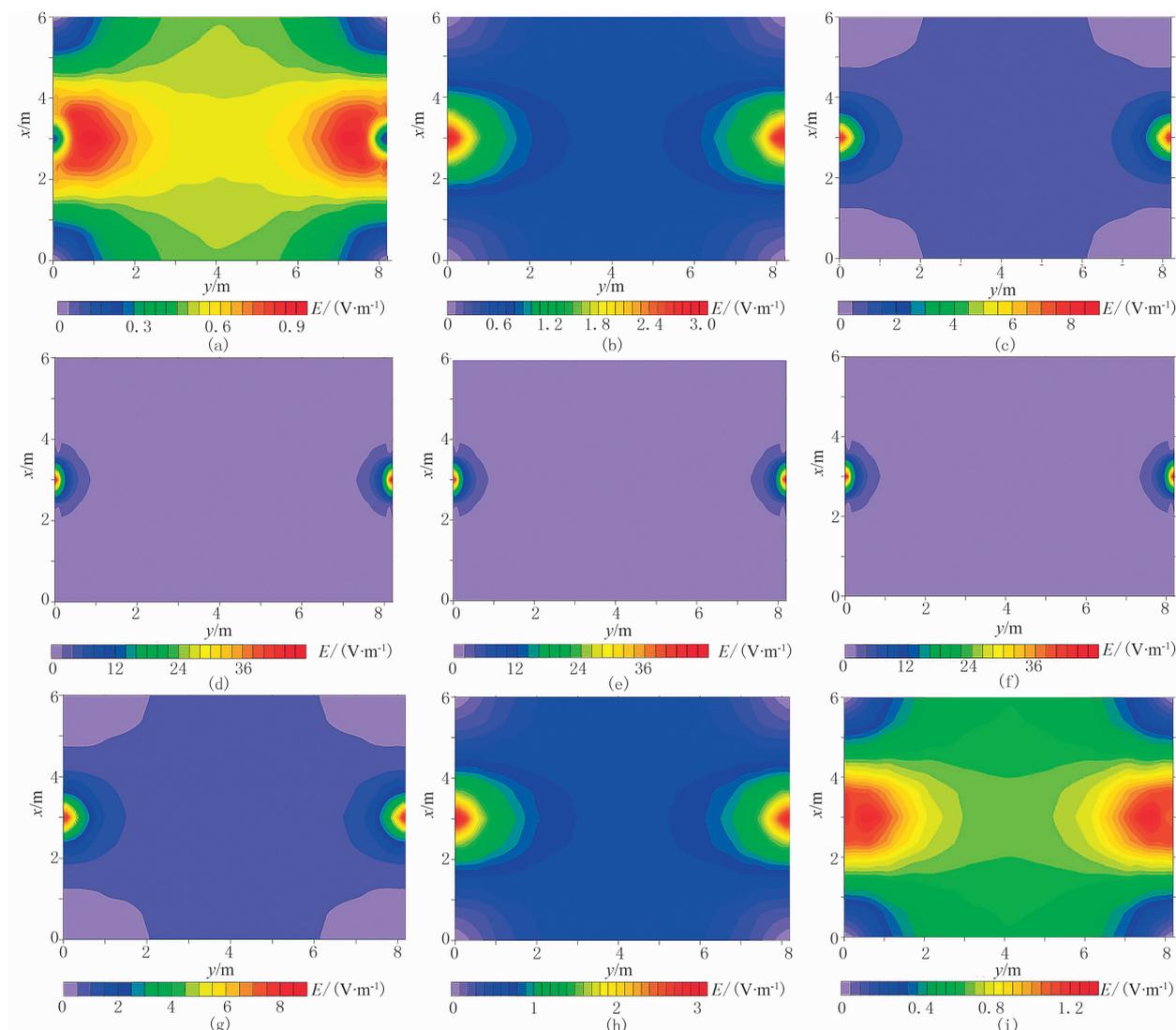
(a) $x=0.1m$; (b) $x=1.1m$; (c) $x=2.1m$; (d) $x=3.1m$; (e) $x=4.1m$; (f) $x=5.1m$; (g) $x=6.1m$; (h) $x=7.1m$; (i) $x=8.1m$

3.2 水平切面电场分布

给出 x 从 0m 变化到 8.2m, y 从 0m 变化 6m, $\Delta x=0.0082m$, $\Delta y=0.006$, z 从 0.2m 变化到

1.8m, $\Delta z=0.2m$ 时,选取的 9 个 xy 水平切面的电场分布图。

从图 8 所示的 9 组水平切面的电场分布图可

图 8 z 不同时的水平切面电场分布图

(a) $z=0.2\text{m}$; (b) $z=0.4\text{m}$; (c)、(d) $z=0.8\text{m}$ 电场分布图; (e) $z=1.0\text{m}$; (f) $z=1.2\text{m}$; (g) $z=1.4\text{m}$; (h) $z=1.6\text{m}$; (i) $z=1.8\text{m}$

知,图 8d~图 8f 是以中心为原点向外扩散的同一色阶区域最大,即电场均匀区最大;而其他切面,离这三个切面越远,电场均匀区越来越小,同一色阶范围越来越小。即得到和垂直切面相同的结论,水池中央电场均匀性最好,均匀区最大。

通过以上各个垂直切面和水平切面的电场数据提取,以各个切面电场值偏差不超过 0.5% 为标准,可以将试验水池的电场均匀区界定,既可以通过数值模拟定量给出板状电极在试验水池中激励的电场均匀区,选择电场最大值 E_{\max} 与最小值 E_{\min} 之差和电场最大值 E_{\max} 与最小值 E_{\min} 之和的比值作为电场不均匀度的评价因子,用 k 表示, $k = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$ 。

将体积为 $8\text{m} \times 6\text{m} \times 2\text{m}$ 的试验水池中央的

$2.5\text{m} \times 1.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 的小体元的电场值提取代入电场不均匀度公式,不均匀度为 0.0573%,满足电场均匀区不超过 0.5% 的标准,即可定为水下电场均匀区。

3.3 不同位置不同注入点注入激励源时均匀区水下电场不均匀度

为了确定电流注入点位置以及数量等关键参数以及电导率变化对试验水池电场均匀区的影响,下面通过建模给出不同注入点位置和注入点数目,极板和试验水池中试验溶液电导率不变时对试验水池水下电场均匀区均匀性的影响,结果见表 1。

通过数值模拟可知,当供电电极与稳流电源采用 4 点注入且注入点位于供电电极对角线 $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}$ 点处时,所得的电场不均匀度最小,均匀性最好。

表1 不同位置不同注入点均匀区的水下电场不均匀度

注入点数目	注入点位置	极板电导率 S/m	试验溶液电导率 S/m	电场不均匀度 %
4	极板上棱边 $0, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, 1$ 处	132	2.7	0.033
4	极板水平中线和垂直中线的 $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}$	132	2.7	0.043
4	极板两条对角线的 $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}$	132	2.7	0.002
4	极板四个顶点	132	2.7	0.0595
2	极板上下棱边中点	132	2.7	0.077
2	极板左右棱边中点	132	2.7	0.391
1	极板中间	132	2.7	0.0573
1	上棱边中点	132	2.7	0.051
1	下棱边中点	132	2.7	0.051
1	左棱边中点	132	2.7	0.978
1	右棱边中点	132	2.7	0.975

3.4 不同极板电导率时试验水池水下电场均匀性

下面通过建模给出试验溶液电导率不变,极板中央注入一个点电流源时,极板电导率不断变小对水池中央电场均匀性的影响,结果见表2。

表2 不同极板电导率时试验水池水下电场均匀区不均匀度

电极板和试验溶液的电导率比值	极板电导率 S/m	试验溶液电导率 S/m	电场不均匀度 %
4.87×10^5	1320000	2.7	0
4.87×10^3	13200	2.7	0
48.7	132	2.7	0.0559

通过数值模拟可知,试验溶液电导率不变,极板电极电导率与试验溶液电导率比值越大,试验水池水下电场均匀性越好。

下面给出极板电导率不变,极板中央注入一个点电流源时,试验水池中试验溶液电导率不断变小对水池中央电场均匀性的影响,结果见表3。

表3 不同试验溶液电导率时水池电场均匀区不均匀度

电极板和试验溶液的电导率比值	极板电导率 S/m	试验溶液电导率 S/m	电场不均匀度 %
4.87×10^5	1320000	2.7	0
4.87×10^3	1320000	270	0
48.7	1320000	27000	0.0572

通过数值模拟可知,极板电导率不变,极板电极

电导率与试验水池中试验溶液电导率比值越大,试验水池水下电场均匀区均匀性越好。

4 实验验证

在实验中,利用板状电极在试验水池中激励水下电场,图9为数据采集设备,当在试验水池两侧板状电极上通过一定频率的电流时,水下测量电极将采集的数据传输到数据采集设备,整理得到水平切面电场分布图、垂直切面电场分布图,进而定量给出水下电场均匀区的范围。

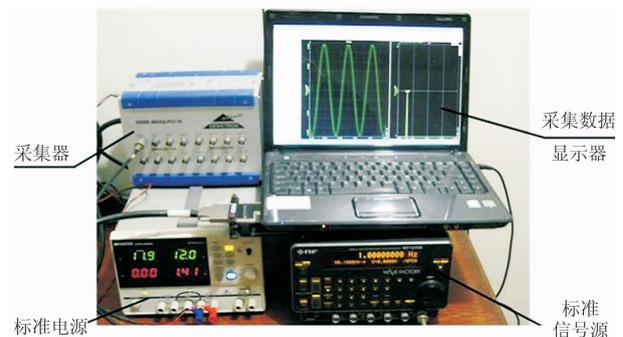


图9 数据采集设备

试验水池的实验结果如图10、图11所示,对于各水平面,越靠近试验水池的中央位置,水下电场值越均匀,得到了与数值模拟同样的水下电场形态,与数值模拟结果吻合。

利用由该方法形成的水下电场传感器校准系统对本所自主研制的水下电场测试系统进行了校准测

试,将水下电场传感器置于试验水池水下电场均匀区内进行测量,获得水下电场传感器的校准系数,获取了测试系统在不同频点的校准系数,发现校准系数在 1Hz 为 1.5542,表明水下电场传感器的测量值是真实值的 1.5542 倍,理论上水下电场传感器的非金属球壳存在会对水下电场信号产生 1.5 倍增益,实验与理论基本一致,验证了试验水池水下电场数值仿真的正确性。

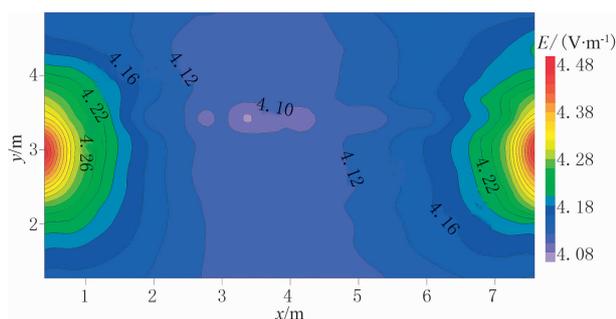


图 10 水下电场平面分布图

信号为 1Hz,距池底 0.775m

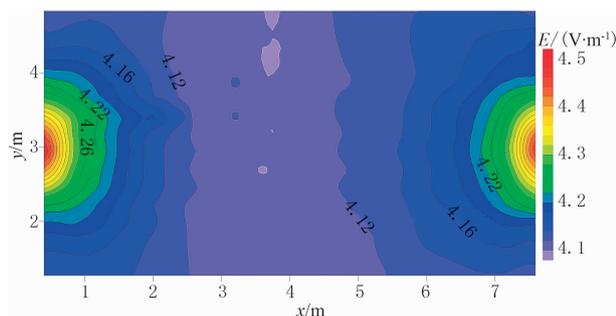


图 11 水下电场平面分布图

信号为 1Hz,距池底 0.9m

5 结论及应用前景

完成了校准系统板状电极在试验水池中激励水下电场的数值模拟研究,取得以下成果:

(1) 试验水池中央水下电场均匀性最好,均匀区最大;

(2) 对于体积为 $8\text{m} \times 6\text{m} \times 2\text{m}$ 的试验水池,确定了试验水池正中央体积为 $2.5\text{m} \times 1.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 的小体元为该试验水池的水下电场均匀区;

(3) 沿极板两对角线 $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ 位置处设置激励电压的四点注入法激发的水下电场的均匀性最好;

(4) 对板状电极和试验溶液电导率方面,获取了

极板电极电导率与试验水池中试验溶液电导率比值越大,试验水池水下电场均匀区均匀性越好;

(5) 利用实验室水池试验得到了与数值模拟相同的水下电场形态,验证了数值仿真的正确性。

在海洋地球物理电磁勘探、海洋电磁学以及海洋石油等领域中,借助于水下电场传感器对水下电场进行有效的检测和监测,从中取得水下电场分布和变化已成为研究和生产过程中的重要信息依据,而水下电场传感器对水下电场测量的高精度、高可靠性测量尤为重要。本文的研究成果可以在水下电场传感器测量前对其进行有效的校准,对提高水下电场传感器的测量精度和可靠性具有一定的促进作用,在本文研究基础上,建立的水下电场传感器校准参数体系平台,可为需要对水下电场传感器进行校准的研究单位提供技术支持,因此具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 陈芸. 海洋电磁学. 物理, 1990, 19(9): 531-534.
- [2] 陈乐寿, 王光镠. 大地电磁测深法. 北京: 地质出版社, 1990.
- [3] 何继善, 鲍力知. 海洋电磁法研究的现状和进展. 地球物理学进展, 1999, 14(1): 7-39.
He Jishan, Bao Lizhi. The situation and progress of marine electromagnetic method research. Progress in Geophysics, 1999, 14(1): 7-39.
- [4] 何展翔, 孙卫斌, 孔絮繁等. 海洋电磁法. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 451-457.
He Zhanxiang, Sun Weibin, Kong Fanshu et al. Marine electromagnetic approach. OGP, 2006, 41(4): 451-457.
- [5] 付长民, 底青云, 王妙月. 海洋可控源电磁法三维数值模拟. 石油地球物理勘探, 2009, 44(3): 358-363.
Fu Changmin, Di Qingyun and Wang Miaoyue. 3D numeric simulation of marine controlled source electromagnetics(MCSEM). OGP, 2009, 44(3): 358-363.
- [6] 沈金松, 陈小宏. 海洋油气勘探中可控源电磁勘探法(CSEM)的发展与启示. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 119-127.
Shen Jinsong, Chen Xiaohong. Development and enlightenment of controlled-source electromagnetic (CSEM) surveying method in marine oil/gas exploration. OGP, 2009, 44(1): 119-127.
- [7] 杨进, 魏文博, 王光镠. 海水层对海洋大地电磁勘探的影响研究. 地学前缘, 2008, 15(1): 217-221.
Yang Jin, Wei Wenbo, Wang Guang'e. The effect of seawater in the marine magnetotelluric sounding. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 217-221.
- [8] Ferguson I J, Filloux J H, Lilley F E. A sea floor magnetotelluric sounding in the Tasman sea. Geophysical Research Letters, 1985, 12(9): 545-548.

- [9] Chave A D, Constable S C, Edward R N. Electrical exploration methods for seafloor, In: M N Nabighian. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Oklahoma; Society of Exploration Geophysicists, 1991, 931-934.
- [10] Cox C S, Filloux J H, Larsen J. Electromagnetic studies Mexico field test at the Gemin instruture. Geophysics, 2000, 65(5): 1476-1488.
- [11] Constable S et al. Marine magnetotellurics for petroleum exploration 1: A seafloor instrument system. Geophysics, 1998, 63, 816-825.
- [12] Constable S et al. Marine magnetotellurics for petroleum exploration 2: Number analysis of subsalt resolution. Geophysics, 1998, 63, 826-840.
- [13] Zerilli A. Advance in marine magnetotellurics. 62nd EAGE Meeting, Glasgow, 2000.
- [14] Zhdanov M S, Lee S K. Integral equation method for 3D modeling of EM field in complex structures with inhomogeneous background conductivity. Geophysics, 2006, 71(6): 333-345.
- [15] 邓明, 魏文博, 邓靖武等. 海底天然大地电磁场的探测. 测控技术, 2003, 22(1): 5-8.
Deng Ming, Wei Wenbo, Deng Jingwu et al. The natural magnetotelluric field detection on the seafloor. Measurement & Control Technology, 2003, 22(1): 5-8.
- [16] 王一新, 王家林, 王家映等. 瞬变电磁系统探测海底电导率的研究. 地球物理学报, 1998, 41(6): 841-847.
Wang Yixin, Wang Jialin, Wang Jiayin et al. The research of conductivity on sea-floor by transient electromagnetic system. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(6): 841-847.
- [17] 李桐林, 林君, 王东坡等. 海陆电磁噪声与滩海大地电磁测深研究. 北京: 地质出版社, 2001.
- [18] 邓明, 魏文博, 谭捍东等. 海底大地电磁数据采集器. 地球物理学报, 2003, 46(2): 217-223.
Deng Ming, Wei Wenbo Tan Handong et al. Collector for seafloor magnetotelluric data. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(2): 217-223.
- [19] Brucelle J Y Magnetism Group. Electric field measurement at sea. Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique, GESM, BP42, 29240 Brest Naval, France.
- [20] 赵博, 张洪亮等. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(本文编辑: 冯杏芝)

作者简介



胡平 工程师, 1981 年生; 2011 年毕业于吉林大学物理学院, 获得理论物理专业博士学位, 现就职于大连测控技术研究所, 主要从事海洋环境中电磁场数值模拟方面的研究工作。

本期广告索引

东方地球物理公司	封 2, 插 1
东方地球物理公司研究院处理中心	插 2~4
环波软件公司	插 5~7
中国石油勘探开发研究院西北分院	插 8, 9
中油油气勘探软件国家工程研究中心有限公司	插 10, 11
GTC	插 13
斯伦贝谢科技服务(北京)有限公司	插 14, 15
北京网格天地软件技术有限公司	插 16
中国石化胜利油田物探研究院	插 17, 18
大庆钻探工程公司地球物理勘探公司	插 19~21
东方地球物理公司研究院地质研究中心	插 22, 23, 封 4
东方地球物理公司油藏地球物理研究中心	插 24, 25
CNPC 物探重点实验室	插 26, 封 3