

井间 ERT 电极阵列优化及监测实验系统设计与开发

吴陈芋潼¹, 徐同晖¹, 邢兰昌¹, 贾宁洪^{2,3}, 吕伟峰^{2,3}

(1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 提高采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了开发用于地层中 CO₂ 运移监测的井间 ERT 系统, 研究了 ERT 电极阵列和工作模式优化设计方法并研制了井间 ERT 监测模拟实验系统; 基于 COMSOL 平台构建了模拟井间 ERT 测量响应的有限元数值模型, 利用数值模型分析了电极间距和宽度等参数对监测区域电场灵敏度的影响规律以及不同电极阵列工作模式下场域灵敏度的分布特征, 确定了井间 ERT 实验系统中最优的电极参数, 即电极间距、宽度与监测范围的比值分别为 0.200、0.025, 电极阵列的工作模式为 AM-BN; 在对实验系统进行功能需求分析、总体设计以及上述优化设计的基础上, 分别对系统硬件部分和软件部分进行了开发, 采用多路切换开关并配合精密电桥仪实现了对电阻抗参数的测量, 利用以 LabVIEW 为平台开发的测控软件实现了对实验系统的自动化控制; 以埋放绝缘物体来模拟注入地层 CO₂ 的方式开展了实验测试, 结果显示测量到的电阻抗数据可以灵敏地反映出监测区域电参数的变化且能够用于定位绝缘物体的位置, 从而验证了所开发系统的可用性; 所建立的电极阵列优化设计方法以及开发的井间 ERT 监测模拟实验系统为下一步深入研究基于复电导率参数的 CO₂ 饱和度评价模型和开发现场适用的井间 ERT 监测系统提供了实验平台。

关键词: 井间电阻层析成像; 监测实验系统; 电极阵列优化; 有限元; 二氧化碳; 地质封存

Optimization of Electrode Array for Cross-hole ERT and Development of Monitoring Experimental System

WU Chenyutong¹, XU Tonghui¹, XING Lanchang¹, JIA Ninghong^{2,3}, LÜ Weifeng^{2,3}

(1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

3. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China)

Abstract: To develop a cross-hole electrical resistance tomography (ERT) system for monitoring CO₂ migration in the formation, an optimization design method of the ERT electrode array and working mode was studied, and an experimental system for cross-hole ERT was developed. Based on the COMSOL platform, a finite-element numerical model for simulating the responses of cross-hole ERT measurement was built. A numerical model was used to investigate the influence of electrode spacing and axial width on the sensitivity of the electric field in the detection area and the distribution characteristics of field sensitivity under different electrode array operating modes. The optimized parameters of the electrodes were derived. The ratios of the electrode spacing and width to the monitoring range were determined as 0.200 and 0.025, respectively. The AM-BN configuration was chosen as the best operating mode of the electrode array. Based on the functional requirements analysis, overall design and the above optimization design of the experimental system, the hardware and software parts of the system were developed respectively. The measurement of electrical impedance parameters was realized by using multiple switches and precise bridge instrument. The automatic control of the experimental system was realized by using the measurement and control software developed on the platform of LabVIEW. The experimental tests were carried out by the embedding insulating objects to simulate the injection of CO₂ into formation. The results shows that the measured electrical impedance data can reflect the changes in electrical parameters in the monitoring area sensitively and can be used to locate the position of the insulating objects. The validity of the developed system was verified. The design method for optimizing the electrode array and cross-hole ERT experimental system provide an experimental platform for an in-depth study of the CO₂ saturation-evaluation model

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-06-12。

基金项目: 中国石油科技重大专项(2021ZZ01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX05005A); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095); 国家留学基金项目(202106455003)。

作者简介: 吴陈芋潼(1997-), 男, 硕士生。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 吴陈芋潼, 徐同晖, 邢兰昌, 等. 井间 ERT 电极阵列优化及监测实验系统设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 38-45, 52.

based on complex-conductivity parameters and the development of cross-hole ERT monitoring systems for field applications.

Keywords: Cross-hole electrical resistance tomography; monitoring experimental system; optimization of electrode array; finite element method; carbon dioxide; geological storage

0 引言

二氧化碳是最主要的温室气体, 占全球温室效应气体的 77%, 目前通过各种方式转化利用的 CO₂ 仅约占其排放量的 10%^[1]。CO₂ 捕集与封存 (CCS, carbon capture and storage) 技术是一种能够有效减少 CO₂ 向大气排放的低成本温室气体控制技术, 是实现碳中和的托底技术之一。该技术指将工业或其它排放源中捕集的 CO₂ 输送到地下等几乎与大气隔绝的地方进行封存^[2-3]。封存于地层中的 CO₂ 泄漏风险是 CCS 技术需要关注和解决的关键问题之一^[4-5]。监测地层 CO₂ 封存状况的技术主要包括示踪剂法、酸碱度分析法、同位素法、声波测井技术、中子测井技术、环空压力监测、3D/4D 地震监测、电阻率层析成像 (ERT, electrical resistivity tomography) 技术等^[6]。ERT 技术是医学中广泛应用的电阻抗层析成像 (EIT, electrical impedance tomography) 技术的一种简化形式, 其继承了 EIT 技术简便灵活、高效准确、不破坏和干扰物场的特点^[7-8], 目前已经应用于多个工程领域, 如煤田勘探工程、水利水电工程、环境地质工程、城市勘察工程等^[9-11]。

Shima 较早地实现了 ERT 技术的实际应用, 并开发了一种二维反演算法^[12]。Sasaki 和 Loke 采用平滑约束的最小二乘法对被测样品的真实电阻率进行了反演^[13-14]。白登海等从 Shima 提供的方法出发, 介绍了 ERT 技术的基础理论、操作原理解释方法^[15]。王兴泰等对 ERT 中用于图像重建的佐迪反演方法进行了研究^[16]。Chambers 等基于 2D 和 3D ERT 技术绘制了垃圾填埋场造成浅部岩层污染的图像, 描述了该场地的地质特征^[17]。Maillo 等综合利用 ERT 的地面和井间工作模式对浅层废弃富水矿井巷道进行了探测^[18]。刘斌等采用 3D ERT 技术实现了对深层矿井突水过程中岩层断裂和渗流通道形成过程的实时监测及前兆信息捕捉, 为突水事故的预警提供了重要参考^[19]。Fikos 等运用 ERT 系统实现了对深层干热岩和地热田的实时动态成像与监测^[20]。蒋林城等对比分析了井间 ERT 技术的二极、三极、四极装置的灵敏度, 总结了适用于井间探测的电极排列方式^[21]。

在地层 CO₂ 监测领域, Nakatsuka 等开展了模拟实验, 基于电阻率指数建立了适用于高黏土含量岩层中 CO₂ 饱和度的评价方法^[22]。Breen 等利用模拟实验对 CO₂ 进行了图像重建和结果评估, 验证了 ERT 技术用于监测地层 CO₂ 泄漏的有效性^[23]。ERT 技术在美国 Mansfield 砂岩地层 CCS 项目中得到了成功应用^[24]。德国在 CO₂-SINK 试验场布置了垂直电阻率阵列, 采用井间 ERT 技术实现了对地质封存 CO₂ 运移的监测^[25]。美国在 Cranfield 项目中注入了 100 万吨 CO₂, 运用井间 ERT 技术获取了 CO₂ 饱和度分布随时间变化的信息, 实现了地层中 CO₂ 的运移监测^[26]。西班牙在

Hontomín CO₂ 封存点进行了多通道地一井和井间 ERT 监测实验, 结果显示数据具有较低的误差^[27]。Börner 等利用模拟实验数据分析了不同压力、温度和盐度条件下 CO₂ 对孔隙水电导率的影响, 并探讨了运用复电导率虚部优化 CO₂ 饱和度模型的方法^[28]。Kremer 等通过分析模拟实验数据发现, 相比于单一的电阻率参数, 从谱激发极化 (SIP, Spectral Induced Polarization) 响应中获取的复电导率参数对 CO₂ 饱和度变化的敏感度更高^[29]。

在现有的地质封存 CO₂ 监测项目中, 由于存在地质条件、CO₂ 注入操作条件等的差异性, 所以采用的 ERT 电极阵列的结构参数、工作模式、安装位置等均有所不同, 需要针对特定的 CO₂ 封存需求对拟采用的 ERT 监测系统进行优化设计, 因此需要开发室内实验系统来研究 ERT 监测系统的设计方法。在 ERT 数据处理方面, 目前大多数系统基于电阻率/电导率来计算地层中的 CO₂ 饱和度, 这种方法不适用于黏土含量较高的地层, 而反映泥质地层介质储存电荷能力的复电导率虚部对黏土含量和 CO₂ 饱和度均比较敏感^[30-31], 基于复电导率虚部的 CO₂ 饱和度评价方法还需进一步深入研究。

本文设计并开发一套井间 ERT 监测模拟实验系统。首先构建有限元数值模型对电极阵列的结构参数和工作模式进行优化设计, 建立电极阵列优化设计方法, 然后对所设计系统的硬件部分和软件部分分别进行开发, 最后通过模拟实验对所开发系统进行测试以验证系统的可用性。

1 井间 ERT 监测实验系统功能分析与总体设计

1.1 实验系统工作原理及功能分析

实验室内的 ERT 监测系统组成主要包括以下 4 个部分: 模拟地层、电极阵列、数据采集模块、测控计算机。系统工作原理如图 1 所示, 通过在模拟地层中安装电极阵列, 由激励电极发射电流信号, 产生电场, 再由测量电极采集电压信号, 从而获取相关参数。当敏感场内电导率分布发生变化时, 场域内电势分布将会改变, 数据采集系统完成对变化后场域边界电压值的采集, 并通过反演算法和绘图程序得到电导率的分布图, 最后获得监测区域内的介质空间分布。

以下对井间 ERT 监测模拟实验系统的功能进行分析。为了排除温度变化可能对采集数据产生的虚假影响, 需保持实验环境温度的相对稳定。为了实现对复电导率相关参数的计算以及建立 CO₂ 饱和度评价模型, 则需要测量监测区域的宽频电阻抗。此外, 需要开发测控软件以实现对整个硬件部分的自动控制, 保障监测系统能够长期无人值守地进行数据的自动化采集、处理、显示以及保存。

综上所述, 该实验系统需要实现以下功能:

1) 能够保持样品温度恒定并实时监测实验装置内部

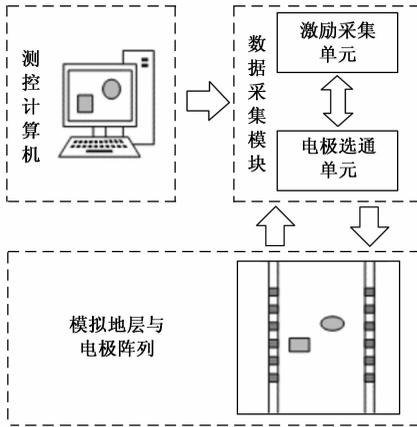


图 1 实验室 ERT 监测系统工作原理图

温度；

- 2) 能够按照工作模式需求选通相应的工作电极，获取大量独立的测量数据；
- 3) 能够对采集的原始数据进行处理、显示和保存；
- 4) 实验过程可由测控软件控制，实现各功能模块的自动化运行。

1.2 实验系统总体设计

在借鉴前人实验室研究和现场试验的基础上^[24-27, 32]，设计了用于室内测试的井间 ERT 监测实验系统的硬件和软件部分，其组成结构如图 2 所示。系统的硬件部分包括样品容器（图 2 虚线方框所示）、恒温装置、激励/采集单元、电极选通单元、温度采集单元、电极阵列、工业控制计算机。系统的软件部分包括激励/采集单元控制模块、电极选通单元控制模块和数据处理、显示及保存模块。

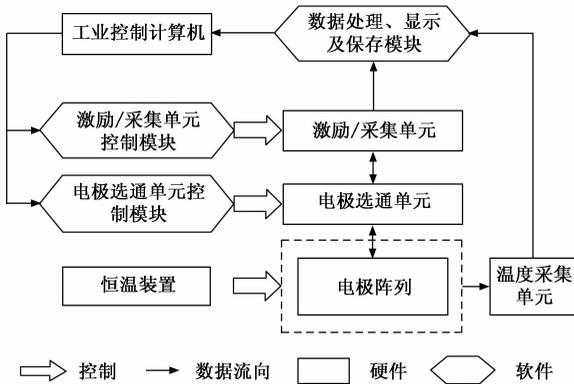


图 2 ERT 监测实验系统结构组成图

样品容器用于盛放模拟地层样品、安装温度传感器和带电极阵列的模拟套管。温度采集单元实时获取样品温度。激励/采集单元和电极选通单元由工控机上测控软件的控制模块进行控制，实现自动选通工作电极并完成数据采集任务。恒温装置能够为模拟地层样品提供稳定的温度条件。

激励/采集单元控制模块可对 LCR 精密电桥仪的工作参数进行配置，并获取阻抗测量数据；电极选通单元控制

模块对多路切换开关的通道进行控制，实现自动选通工作电极的功能；数据处理、显示及保存模块可将采集的电学和温度数据以图表或曲线等形式直观展示，方便实验人员观察数据变化、了解实验进程，同时将采集的数据按照指定位置进行储存，便于后期使用。

2 井间 ERT 电极参数及工作模式优化设计

2.1 有限元数值仿真

2.1.1 电场控制方程

根据麦克斯韦方程和似稳场假设，对于 ERT 系统电极阵列工作时所产生的敏感场，其内部任意一点的电流密度 J 、电导率 σ 与电场强度 E 满足以下关系^[33]：

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{1}$$

$$J = \sigma E \tag{2}$$

假设敏感场内电势分布为 φ ，则：

$$E = -\nabla \varphi \tag{3}$$

根据以上关系式可以得到 ERT 系统的敏感场数学模型：

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0 \tag{4}$$

$$\nabla \sigma \cdot \nabla \varphi + \sigma \nabla^2 \varphi = 0 \tag{5}$$

在均匀、线性、各向同性的介质中， σ 为常量，即 $\nabla \sigma = 0$ ，根据 Laplace 方程，可将式 (5) 简化为如下方程：

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{6}$$

采用“电流激励、电压检测”工作模式的 ERT 系统满足 Neumann 边界条件^[34]：

$$\sigma \nabla \varphi \cdot n \Big|_s = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_s = J \tag{7}$$

式中， n 为边界 S 的单位法向矢量； J 为电流密度。

2.1.2 数值模拟

首先以样品容器的内表面、容器内承装的模拟地层介质和带有电极阵列的模拟套管为研究对象，按照等比例原则建立模型的几何结构（如图 3 (a) 所示）。容器内侧面和底面对应模型结构的外侧边界，将其设置为绝缘面。模型内部两个较小的圆筒表示带电极阵列的模拟套管，模拟套管与模拟地层介质接触的面代表内侧边界，将其设置为绝缘面（除去电极后的剩余部分），电极材料定义为紫铜。

将安装有电极的两个模拟套管中心线所在平面作为主要研究区域，对模拟套管上的每个电极按照从上到下的顺序进行编号（如图 3 (b) 所示）。井间 ERT 系统中上下两端的电极之间的距离 L 视为垂向（电极轴向）的有效监测范围，井间距为 D ，在 L 和 D 固定的前提条件下情况下，通过改变电极轴向间距 l （电极中心之间的轴向距离）和电极轴向宽度 d 来开展一系列数值模拟工作。

在完成几何结构构建的基础上，对模型进行网格剖分，模型内侧边界附近区域的网格单元较小，数量较多，模型外侧边界附近区域的网格单元较大，数量较少。其中，剖分的网格单元总数为 801 271，最大和最小网格单元的尺寸分别为 7.25 mm 和 0.08 mm。容器内的样品定义为电导率 $\sigma = 0.01$ S/m 的均匀物质，设定激励电极发射的信号为 1 mA 的直流电信号。按照预先设定的电极选通方式对工作

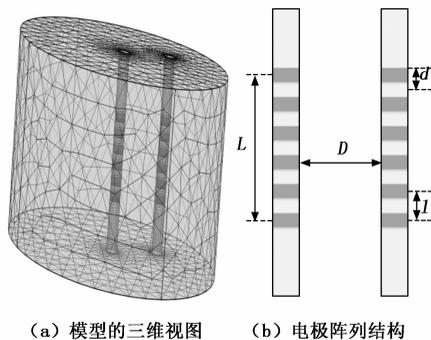


图 3 模型的几何结构

电极进行控制, 获取整个模型内的电势分布。在此基础上, 利用灵敏度计算式 (式 8 所示) 计算得到灵敏度的空间分布, 为后续优化电极结构参数和工作模式提供数据基础。灵敏度计算函数由互易定理推导所得^[35], 其计算公式如下:

$$S_{i,j}(x,y,z) = \int \frac{E_i(x,y,z)}{I_i} \frac{E_j(x,y,z)}{I_j} d\Omega \quad (8)$$

式中, $S_{i,j}(x,y,z)$ 表示选通第 i 和 j 电极对时, 场域内某坐标点处的灵敏度; $E_i(x,y,z)$ 和 $E_j(x,y,z)$ 分别表示利用序号为 i 和 j 的电极对施加激励时, 场域内某坐标点处的电场强度; I_i 和 I_j 分别表示利用序号为 i 和 j 的电极对向样品施加的激励电流幅值。

2.1.3 灵敏度分析方法

电学成像系统的敏感场分布是非均匀的, 在靠近激励电极处, 敏感场的灵敏度较高, 而在远离激励电极处, 敏感场的灵敏度则较低。敏感场灵敏度的高低可用灵敏度系数来定量表示。灵敏度系数矩阵的元素值越大, 则表示敏感场灵敏度越高。灵敏度系数矩阵中各元素值之间差异越小, 则敏感场均匀性越好。敏感场的均匀性可由灵敏度系数矩阵的标准差与均值的比值来表示 (式 9)^[36-37]。敏感场的均匀性指标表示为 P , 其为偏小型指标, 即 P 值越小则说明均匀性越好。

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left| \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} \right| \quad (9)$$

式中, N 为独立测量数, $S_{i,j}^{avg}$ 和 $S_{i,j}^{dev}$ 分别为序号 i 的电极与序号 j 的电极工作时灵敏度系数矩阵的均值和标准差, 其计算公式分别为:

$$S_{i,j}^{avg} = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n S_{i,j}(e)$$

$$S_{i,j}^{dev} = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{e=1}^n [S_{i,j}(e) - S_{i,j}^{avg}]^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

式中, n 为敏感场的单元剖分数, $S_{i,j}(e)$ 为 n 剖分的单元中第 e 个单元处的灵敏度系数。

计算一种工作模式条件下的敏感场均匀性指标, 即求解一个 $N \times n$ 的矩阵, 每一列 n 个数据的标准差与均值之比为变异系数, N 个变异系数之和即为均匀性指标 P 。

2.2 电极参数优化

结合实验容器的尺寸, 设置 L 为 120 mm、 D 为 40 mm,

在电极间距 (l) 和电极轴向宽度 (d) 取不同值条件下, 分别计算并分析敏感场灵敏度的均匀性指标 (P), 进而确定最优的电极参数。

以 1 mm 轴向宽度的电极为例, 其它结构参数不变时, 对于两个模拟井筒的电极阵列, 设定电极对的数量分别为 6、7、8、9、10、11、12, 即 l/L 的值为 0.200、0.167、0.143、0.125、0.110、0.100、0.090、0.080 时, 分别计算其敏感场的均匀性指标。如图 4 所示, 随着电极对数量的增加, P 值先增大后减小, 模型的所有网格单元灵敏度的离散化程度先增大后减小, 敏感场的均匀性先降低后增强。

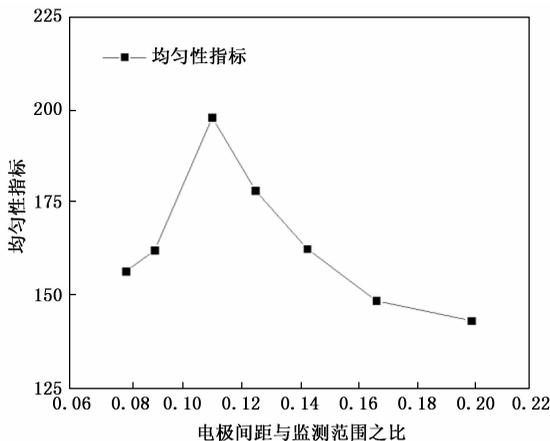


图 4 电极间距与监测范围比值不同时 被测区域敏感场的均匀性指标

以 6 对电极为例, 当电极轴向宽度分别取 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm, 即 d/L 的值分别为 0.008、0.017、0.025、0.033、0.042、0.050、0.058 时, 随着电极轴向宽度的增加, P 值呈现出先减小后增大再减小的趋势 (图 5), 模型的网格单元灵敏度的离散化程度先减小后增大, 被测区域敏感场的均匀性先增强后降低。该敏感场均匀性的变化趋势与已有文献所报道的结果相一致^[38]。

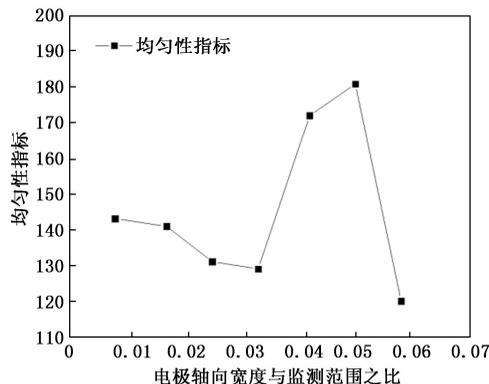


图 5 电极轴向宽度与监测范围比值不同时 被测区域敏感场的均匀性指标

综上所述, 电极间距和电极轴向宽度对敏感场均匀性的影响均呈现出非线性趋势。通过对仿真结果进行分析,

l/L 的取值 $0.010 \sim 0.080$ 或大于 0.167 、 d/L 的取值 $0.025 \sim 0.033$ 或大于 0.058 时, 敏感场均匀性较好。在实际选择电极参数时, 还需要综合考虑电极加工成本、安装合理性和数据量等因素。

由于加工条件等其他因素的限制, 在本系统中每个模拟套管采用 6 个电极 ($l/L = 0.200$)。电极宽度每增加 1 mm, 加工成本增加约 15%, 与宽度为 3 mm 和 4 mm 的电极相比, 宽度为 7 mm 时, 虽然敏感场均匀性有小幅度提升, 但加工成本增加约 45~60%, 而宽度为 3 mm 和 4 mm 时, 敏感场均匀性接近。综合考虑性能和成本, 在本系统中选用宽度为 3 mm 的电极 ($d/L = 0.025$)。

2.3 电极工作模式优化

井间 ERT 技术实施的工作模式主要有 3 种: AM-BN、AB-MN 和 AMN-B/A-BMN, 其中电极 A 和 B 为激励电极、电极 M 和 N 为测量电极。基于上述有限元模型对 3 种工作模式进行了数值模拟, 得到各种模式条件下的灵敏度分布 (图 6)。

AM-BN 模式也称为 Bipole-Bipole 模式, 电极 A 和 M 位于同一井内、电极 B 和 N 位于另一井内, 改变选通的工作电极时, 始终维持电极 A 和 M 之间的距离等于电极 B 和 N 之间的距离。该模式下灵敏度分布如图 6 (a) 所示。灵敏度为正代表区域内电阻率上升, 测量的电位差减小; 而灵敏度为负则代表区域内电阻率下降, 测量的电位差增大。在靠近井壁的区域, 灵敏度的绝对值较大, 而井间靠近中心的区域, 灵敏度绝对值较小。

AB-MN 模式也称为 Dipole-Dipole 模式, 工作时激励电极 A 和 B、测量电极 M 和 N 分别位于不同的井内, 始终维持电极 A 和 B 之间的距离等于电极 M 和 N 之间的距离。图 6 (b) 所示的灵敏度分布图表明, 以电极 A 和 M 水平线、电极 B 和 N 水平线作为近似分界线, 上部和下部区域的灵敏度大部分为负, 而中间区域的灵敏度大部分为正, 这使得在该工作模式下, 电极阵列对井间的非均匀性介质的响应趋于复杂化。

AMN-B/A-BMN 模式也称为 Pole-Tripole 模式, 激励电极 A 和 B 分别位于不同的井中, 测量电极 M 和 N 位于相同的井中, 始终维持电极 A 和 B 保持在同一水平位置。如图 6 (c) 所示, 该工作模式下井间的灵敏度正负分布更加不均匀, 电极阵列对于非均匀性介质的响应更加复杂。

灵敏度的值越大, 获取的电压数据对样品的电学参数变化越敏感, 越有利于获取监测区域的有效信息。灵敏度分布的均匀程度将影响反演成像的效果, 分布越均匀则越有利^[39]。AM-BN 模式的灵敏度值较大、分布较为均匀, 灵敏度正负突变区域远离井间监测区域的中心且范围较小; AB-MN 模式的灵敏度较小, 井间监测范围内存在两处灵敏度正负突变的区域; A-BMN/AMN-B 的灵敏度在局部区域较大, 分布非常不均匀, 且井间中心的部分区域存在灵敏度正负突变。现有研究也表明, 在 3 种工作模式中, AM-BN 模式和 A-BMN/AMN-B 模式具有较高的信噪比, 但是重建图像的分辨率较差, AB-MN 模式和 A-BMN/AMN-B 模式, 图像重建

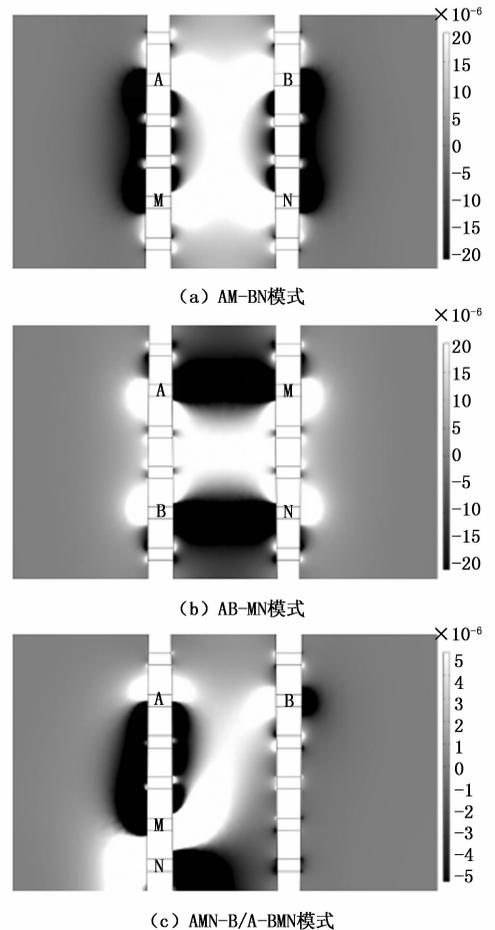


图 6 井间 ERT 技术常用的 3 种工作模式灵敏度图

的分辨率较高, 但重建图像存在多处伪影^[40]。

综上所述, AM-BN 模式适用于井间距较大、对重建图像分辨率要求较低场合, 如野外井间跨度较大的地质勘探工程、监测工程等; AB-MN 模式适用于井间距较小、对重建图像分辨率较高的场合, 如进行探索研究的实验室、需要高分辨率图像的监测中心等; A-BMN/AMN-B 模式具有较高信噪比和重建图像分辨率, 但是敏感场均匀性较差, 通常与其它模式结合使用。本实验系统选用 AM-BN 模式, 以最终实现对模拟地层的高分辨率成像。

3 井间 ERT 监测实验系统开发

3.1 硬件部分开发

3.1.1 模拟地层和模拟套管

采用圆筒形样品容器承装模拟地层样品, 容器上部由顶盖封闭。样品容器内径为 15 cm, 内高为 15 cm, 底部和侧壁厚度均为 2 cm, 顶盖上预留模拟套管和温度传感器的安装孔, 如图 7 所示。样品容器的材料为聚醚醚酮, 该材料具有良好的传热性和耐腐蚀性。本系统采用空气浴恒温箱对容器内的样品进行温度控制, 恒温箱可控制温度范围为 $-35 \sim 185 \text{ } ^\circ\text{C}$, 控制精度为 $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

环状电极的结构可参见图 7, 一个电极阵列由 6 个环状电极所构成, 若干不同长度的管段构成模拟套管, 采用 AB

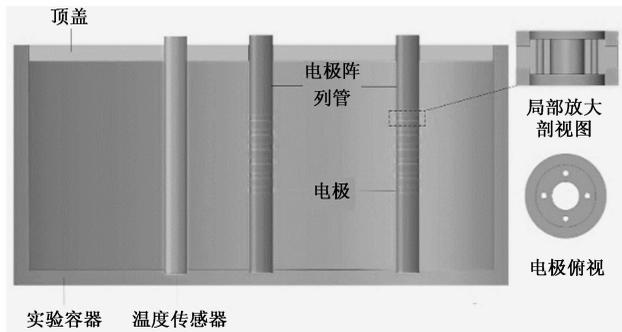


图 7 样品容器及模拟套管结构示意图

胶进行连接固定, 如图 8 所示。管段材料为聚醚醚酮, 电极材料为紫铜。每一个环形电极与多路切换开关之间采用外加屏蔽层的导线进行连接, 通过电极选通模块进行控制, 可指定一个模拟套管上的任意电极都可以选通为激励电极 A 或测量电极 M, 另一根模拟套管上的任意电极可以选通为激励电极 B 或测量电极 N。



图 8 安装有电极阵列的模拟套管

3.1.2 数据采集模块

该模块由激励/采集单元和电极选通单元组成。

实验系统以型号为 Agilent 4284A 的 LCR 精密电桥仪作为激励/采集单元, 其频率测量范围为 20 Hz 到 1 MHz, 具有 8610 个可选择频率点, 阻抗测量范围为 0.01 Ω 到 100 MΩ, 测量精度为 0.05%。

以多路切换开关作为电极选通单元, 由相应的软件控制模块进行控制, 实现自动选通工作电极的功能。多路切换开关的 4 个共用端口分别与精密电桥仪的 2 个电流端口和 2 个电势端口相连接, 开关的多路通道接口与所有电极分别连接。工作时, 依照设定的电极选通方式, 利用多路切换开关实现与相应电极的连通。与电流端口连通的电极则为激励电极 (A 和 B), 与电势端口连通的电极则为测量电极 (M 和 N)。

温度采集单元主要包括温度传感器、温度变送器、电流电压转换电路和数据采集卡。传感器采用 A 级 Pt100 热电阻, 温度变送器为二线/三线制温度变送器, 测量范围为 -20~80 °C, 测量误差不超过 0.25 °C。变送器输出的 4~20 mA 电流信号通过转换电路转变成 1~5 V 的电压信号, 利用数据采集卡采集, 采集卡型号为 PCI-1713。

3.2 软件部分开发

3.2.1 激励/采集单元控制模块

精密电桥仪通过 GPIB 接口与工控机进行通信, 基于 LabVIEW 平台编写控制程序, 实现对精密电桥仪的参数配置与仪器控制, 从而完成电极激励和信号采集工作, 并将

采集到的数据传输到工控机。可选的频率范围设定为 20 Hz ~1 MHz, 可以对激励电流幅值、采样频率、采样点数、测量周期等参数进行灵活设置。

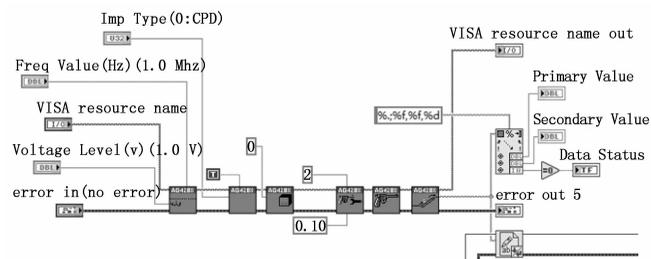


图 9 LCR 精密电桥仪控制模块部分程序图

3.2.2 电极选通单元控制模块

该模块依照所设定的工作模式来控制电极选通单元^[41], 设定的电极选通方式如图 10 所示。首先选通位于最上方的第一对电极作为激励电极 A 和 B, 施加设定的激励电流, 同时选通激励电极下方的某一对电极作为测量电极 M 和 N, 并进行电压信号采集, 然后再自动选通下一对电极作为测量电极, 直到所有电极上的电压信号采集完毕。继续选通下方的另一对电极作为激励电极并重复上述步骤进行电压信号采集, 如此持续, 遍历 6 对电极作为激励电极, 到此则完成了一组测量和数据采集工作。

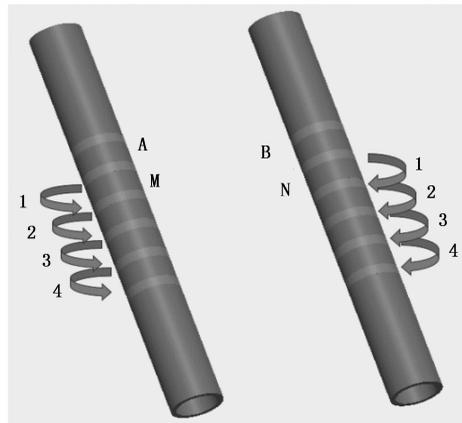


图 10 电极选通方式示意图

3.2.3 数据处理、显示及保存模块

该模块将采集到的电压数据传送到工控机, 通过软件进行数据处理, 将电压信号转换为阻抗和温度参数, 并在软件图形用户界面上以曲线和数字的方式进行显示, 实时反映被测参数的变化。在设置文件保存路径和保存格式的前提下, 将数据存储为 txt、xls 等格式的文件, 自动保存到设定的目录下, 用于长期的数据保存和后续分析处理。

4 井间 ERT 监测实验系统测试

4.1 实验方法

为了测试所开发井间 ERT 监测实验系统的可用性, 开展了系列的模拟实验与数据分析工作。在样品容器中装入粒径 0.18~0.25 mm 的天然海砂, 加入质量分数为 1% 的

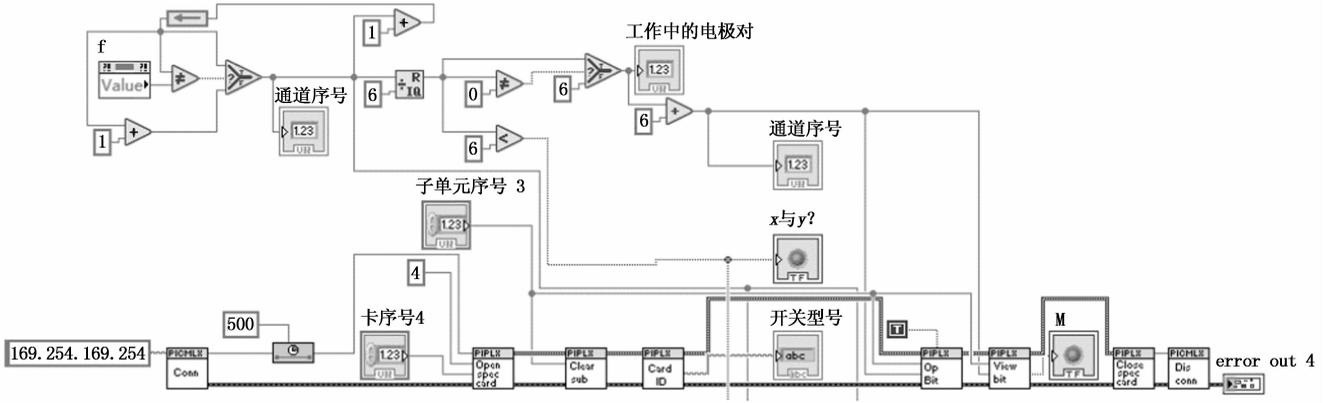


图 11 电极选通单元控制模块部分程序图

NaCl 水溶液使海砂充分饱和，在不同深度的井间位置处理放不导电的异常物来模拟注入地层的 CO₂。

具体实验步骤如下：

1) 使用去离子水冲洗海砂 3~5 次，去除海砂中的盐分和杂质，然后放入高温烘干箱进行烘干备用。配置质量分数为 1% 的 NaCl 水溶液 500 mL 备用。

2) 将 2 根装有电极的模拟套管放入容器内对应的凹槽内，将以上准备的海砂和 NaCl 水溶液分层填入容器，装填完毕后将样品压实。

3) 静置 20 分钟后，打开测控软件，设置激励电压为 0.05 V，频率为 100 Hz，开始数据采集。

4) 在某一对电极（如第 4 对电极）所在深度的井间区域，埋放一块较小体积的不导电圆柱体，如图 13 (a) 所示，将样品压实后，重复步骤 3)。

5) 在某两对轴向相邻的电极（如第 4 和第 5 对电极）所在深度的井间区域，埋放一块较大体积的不导电圆柱，如图 13 (b) 所示，将样品压实后，重复步骤 3)。

4.2 实验结果与分析

在实验过程中获取了埋放绝缘圆柱体前后测量电极之间的阻抗数据，通过分析阻抗值的变化情况可以辨识出所埋放绝缘物体的位置。

通过对测试数据进行处理，得到了在不同电极对激励条件下通过其余电极对测量的阻抗幅值变化曲线。图 14 所示为分别将第 1 对和第 6 对电极（如图 14 所示）作为激励电极对时测试所得到的数据。

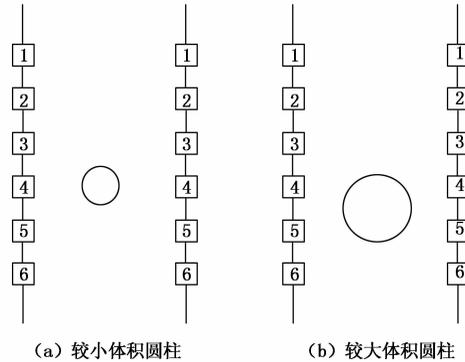


图 13 绝缘圆柱体埋放位置示意图

通过对图 14 的实验测试结果进行分析可知：

1) 埋放绝缘的圆柱体之后，所有电极测量的阻抗幅值均出现不同程度的升高。这是因为绝缘物体代替了原来饱和和氯化钠水溶液的海砂，引起监测区域局部以及整体导电性的降低，从而引起测量得到的阻抗幅值的升高。

2) 与埋放体积较小的圆柱体相比较，当埋放的圆柱体体积较大时，所有电极测量的阻抗幅值升高程度更加显著，可见测试数据灵敏地反映了监测区域电参数的变化情况。

3) 在埋放绝缘的圆柱体之后，越接近圆柱体所在位置的电极，测量的阻抗幅值变化越显著，圆柱体所在位置附近电极测量的阻抗幅值升高约 17~25 Ω，其余电极测量的阻抗幅值升高越 3~10 Ω。可见通过分析测试数据变化幅度来获得绝缘体所在的位置信息。

5 结束语

基于 COMSOL 平台构建了模拟井间 ERT 响应的有限元数值模型，利用数值模型对电极阵列的结构参数和工作模式进行了优化设计，建立了电极阵列优化设计方法。在对实验系统进行功能分析和总体设计的基础上，分别对硬件部分和软件部分进行了开发，利用以 LabVIEW 为平台所开发的测控软件实现了对实验系统的自动化控制，形成了一套井间 ERT 监测模拟实验系统，通过实验测试验证了所开发系统的可用性。

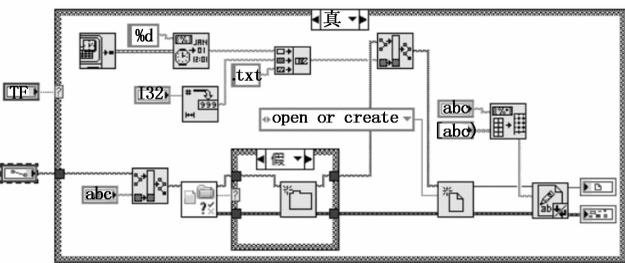
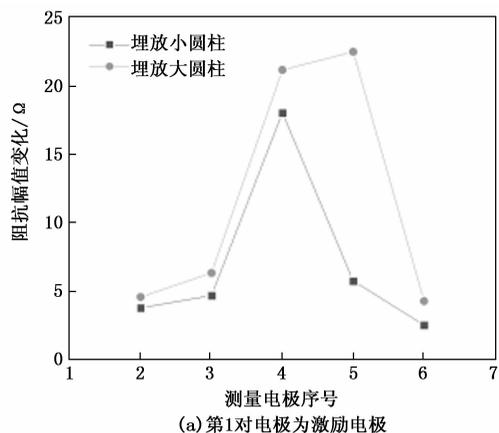
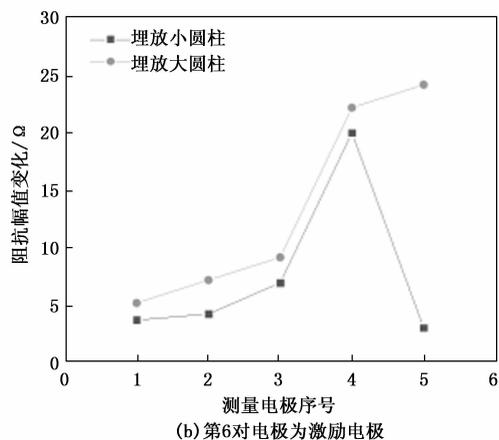


图 12 数据显示及保存模块部分程序图



(a) 第1对电极为激励电极



(b) 第6对电极为激励电极

图 14 不同电极对作为激励电极时的阻抗测量数据

下一步将利用该实验系统开展地层中 CO_2 运移模拟以及井间 ERT 监测实验, 在获取实验测试数据的基础上建立复电导率参数与 CO_2 饱和度的关系模型, 完善基于复电阻率参数的井间成像算法, 为开发现场适用的井间 ERT 监测系统提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 邹才能, 吴松涛, 杨智, 等. 碳中和战略背景下建设碳工业体系的进展、挑战及意义 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50 (1): 1-16.
- [2] 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49 (4): 828-834.
- [3] 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 24: 1-11.
- [4] GARCIA J H, TORVANGER A. Carbon leakage from geological storage sites: Implications for carbon trading [J]. Energy Policy, 2019, 127: 320-329.
- [5] 王晓桥, 马登龙, 夏锋社, 等. 封储二氧化碳泄漏监测技术的研究进展 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27 (2): 23-34.
- [6] 田宝卿, 徐佩芬, 庞忠和, 等. CO_2 封存及其地球物理监测技术研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (3): 1431-1438.

- [7] 董峰, 崔晓会. 电阻层析成像技术的发展 [J]. 仪器仪表学报, 2003 (S2): 703-705.
- [8] 刘四新, 倪建福. 井间电磁法综述 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35 (1): 153-165.
- [9] MILLER C R, ROUTH P S, BROSTEN T R, et al. Application of time-lapse ERT imaging to watershed characterization [J]. Geophysics, 2008, 73 (3): G7-G17.
- [10] 冯彦东. 高密度电阻率法在煤田采空区勘探中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2009, 6 (5): 624-626.
- [11] 吕惠进, 刘少华, 刘伯根. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2005, 65 (2): 381-386.
- [12] SHIMA H, SAKAYAMA T. Resistivity tomography: An approach to 2-D resistivity inverse problems [J]. Society of Exploration Geophysicists, 1987, 18 (1): 59-61.
- [13] LOKE M H, BARKER R D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections [J]. Geophysics, 1995, 60 (6): 1682-1690.
- [14] SASAKI Y. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data [J]. Geophysics, 1989, 54 (2): 254-262.
- [15] 白登海, 于晨. 电阻率层析成像理论和方法 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10 (1): 56-75.
- [16] 王兴泰, 李晓芹. 电阻率图像重建的佐迪 (Zohdy) 反演及其应用效果 [J]. 物探与化探, 1996, 19 (3): 228-233.
- [17] CHAMBERS J E, KURAS O, MELDRUM P I, et al. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site [J]. Geophysics, 2006, 71 (6): B231-B239.
- [18] MAILLOL J M, SEGUIN M K, GUPTA O P, et al. Electrical resistivity tomography survey for delineating uncharted mine galleries in West Bengal, India [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 47 (2): 103-116.
- [19] 刘斌, 李木才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统在矿井突水模型试验中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (2): 297-307.
- [20] FIKOS I, VARGEMEZIS G, ZLOTNICKI J, et al. Electrical resistivity tomography study of Taal volcano hydrothermal system, Philippines [J]. Bulletin of Volcanology, 2012, 74 (8): 1821-1831.
- [21] 蒋林城, 肖宏跃, 丁尚见, 等. 跨孔电阻率法装置灵敏度分析及分辨率讨论 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33 (2): 815-822.
- [22] NAKATSUKA Y, XUE Z, GARCIA H, et al. Experimental study on CO_2 monitoring and quantification of stored CO_2 in saline formations using resistivity measurements [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4 (2): 209-216.
- [23] BREEN S J, CARRIGAN C R, LABRECQUE D J, et al. Bench-scale experiments to evaluate electrical resistivity tomography as a monitoring tool for geologic CO_2 sequestration [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9: 484-494.

(下转第 52 页)