

# 井间 ERT 监测数据远程传输与数据处理平台设计与开发

徐同晖<sup>1</sup>, 吴陈芋潼<sup>1</sup>, 邢兰昌<sup>1</sup>, 贾宁洪<sup>2,3</sup>, 吕伟峰<sup>2,3</sup>

(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:** 针对 CO<sub>2</sub> 地质封存过程中井间 ERT 监测数据处理的需求设计并开发了监测数据综合处理平台; 采用 4G 网络实现了监测数据从现场到监控中心的远程传输, 利用 MySQL 开发了存储监测数据信息和用户信息的数据库, 基于有限元法和线性反投影法实现了井间 ERT 图像重建算法, 基于 B/S 架构和 MVC 设计模式开发了 Web 软件; 该平台具有监测数据远程传输模块、数据存储模块、基于井间 ERT 的 CO<sub>2</sub> 饱和度成像模块、账户管理模块和 CO<sub>2</sub> 封存状态显示模块, 可实现监测数据自动远程传输、存储、处理、展示等功能, 远程用户登录该平台可对地质封存过程中 CO<sub>2</sub> 运移状态进行动态实时监测和历史状态查询; 实验室内模拟测试结果表明了各功能模块均可正常运行, 从而验证了所开发数据处理平台的可用性。

**关键词:** 远程监测; 数据传输; 井间电阻层析成像; Web 开发; 二氧化碳; 地质封存

## Design and Development of Data Remote Transmission and Processing Platform for Cross-hole ERT Monitoring

XU Tonghui<sup>1</sup>, WU Chenyutong<sup>1</sup>, XING Lanchang<sup>1</sup>, JIA Ninghong<sup>2,3</sup>, LÜ Weifeng<sup>2,3</sup>

(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:** Aimed at the requirements of dealing with cross-hole electrical resistance tomography (ERT) monitoring data during CO<sub>2</sub> geological storage, a comprehensive platform for data processing was designed and developed. 4G network is used to achieve the remote transmission of monitoring data from the field site to the monitoring center. A database is developed using MySQL to store the information of the monitoring data and users. The cross-hole ERT image reconstruction algorithm is implemented based on finite element method and linear back projection method. A Web-based software is developed based on B/S architecture and model view controller (MVC) design mode. The developed data-processing platform include the following functional modules of the monitoring-data remote transmission module, data storage module, CO<sub>2</sub> saturation imaging module based on cross-hole ERT, account management module, and CO<sub>2</sub> storage status displaying module. The functions such as automatic remote transmission, storage, processing and displaying of the monitoring data can be achieved. In addition, remote users can log into the platform to dynamically monitor and query the historical status of CO<sub>2</sub> migration during the geological storage process. The simulation test results show that all the functional modules can operate normally, which verifies the usability of the developed data processing platform.

**Keywords:** remote monitoring; data transmission; cross-hole electrical resistance tomography; web development; carbon dioxide; geological storage

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: 徐同晖(1998-), 女, 硕士生。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 徐同晖, 吴陈芋潼, 邢兰昌, 等. 井间 ERT 监测数据远程传输与数据处理平台设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 273-279, 320.

## 0 引言

全球气候变化与碳中和背景下, CO<sub>2</sub> 封存利用已成为人类绿色发展的必然趋势与选择<sup>[1]</sup>, 是实现零碳及负碳排放的重要技术保障和关键技术、托底技术<sup>[2-8]</sup>。CO<sub>2</sub> 封存是通过工程技术手段将捕集的 CO<sub>2</sub> 注入地下深部地质储集层, 通过物理、化学作用将 CO<sub>2</sub> 长期储存于地下以实现 CO<sub>2</sub> 与大气长期隔绝的过程<sup>[9-12]</sup>。部分国家正在实施大型的封存项目, 包括加拿大 (Weyburn-Midale)、德国 (CO<sub>2</sub> SINK)、挪威 (Sleipner)、北非 (in Salah) 和美国 (Cranfield) 等<sup>[13]</sup>。典型的深部咸水层埋深一般在 800 米以下, CO<sub>2</sub> 封存的稳定性和安全性引发人们对于 CCS (Carbon Capture Storage) 的巨大担忧, 因此对 CO<sub>2</sub> 封存过程中和封存后的运移状态进行监测是十分有必要的<sup>[14]</sup>。CO<sub>2</sub> 地质封存监测技术主要有红外气体分析、激光、高光谱成像、地球化学方法等非地球物理方法和声波测井、时移地震、3D/4D 地震、电阻层析成像 (ERT, Electrical Resistance Tomography) 等地球物理方法<sup>[15]</sup>。

在 CO<sub>2</sub> 地质封存工程中, 超临界态的 CO<sub>2</sub> 被注入到具有适当封闭条件的地层<sup>[16]</sup>。孔隙空间中低电阻率孔隙水被高电阻率的 CO<sub>2</sub> 所驱替, 引起地层电阻率的增加, 这为电阻率法的应用提供了物理基础<sup>[17]</sup>。Peter 等研究了 CO<sub>2</sub> 的注入对饱和水地层电阻率产生的显著影响, 结果表明 ERT 测量信号对液体/气体饱和度具有良好的敏感性, 具备探测地下 CO<sub>2</sub> 运移的能力<sup>[18]</sup>。美国在 Cranfield 的试验场超过 3 千米的深度注入了约 100 万吨 CO<sub>2</sub>, 运用井间 ERT 技术获取了随时间变化的电阻率图像, 实现了对地层中 CO<sub>2</sub> 运移状态的监测<sup>[19]</sup>。德国在靠近 Ketzin 的 CO<sub>2</sub> SINK 监测场采用井间 ERT 监测了深度约 650 m 的地层中 CO<sub>2</sub> 的迁移过程, 证明了井间 ERT 对地层中 CO<sub>2</sub> 成像的能力<sup>[20]</sup>。西班牙在 Hontomín CO<sub>2</sub> 封存点进行了多通道地-井和井间的 ERT 监测, 实现了对含水层中 CO<sub>2</sub> 封存过程的监测<sup>[21]</sup>。在位于日本长冈的 CO<sub>2</sub> 注入试验场地, 研究人员利用井间 ERT 系统采集了电阻率数据, 研究了适用于含有复杂矿物成分且较高黏土含量地层的 CO<sub>2</sub> 饱和度评价方法<sup>[22]</sup>。国外井间 ERT 监测 CO<sub>2</sub> 的众多研究主要采用现场成像的方式, 监测现场多处于交通和通讯条件较差的环境, 不具备大量数据存储和高性能计算的基本条件。目前国内井间 ERT 技术已经在多个领域得以应用, 如水利水电领域、煤田勘探领域、环境地质领域等, 而关于 CO<sub>2</sub> 地质封存监测领域的研究及应用鲜有报道。

针对上述问题, 开发具备远程传输、高性能计算等功能的数据处理平台成为必然的需求。王天龙等采用 B/S 架构, 基于 Web 平台开发了煤矿用自动化钻机远程监测软件<sup>[23]</sup>。祝起明等采用 B/S 架构开发了基于 Web 的水土保持远程数据监测系统, 对各个监测站水土保持相关数据进行了采集<sup>[24]</sup>。刘世杰等设计了一套基于 B/S 架构的远程心电

监测系统, 并采用 Vue 作为开发框架开发了前端交互界面<sup>[25]</sup>。姚引娣等提出了一种基于 B/S 架构的 LoRa 组网远程温室监测系统, 可以实现对温室环境参数的远程监测<sup>[26]</sup>。常国锋等采用 B/S 架构, 利用 HTML5+CSS3+JavaScript 开发了客户端界面, 设计了基于阿里云的工业废气远程监测系统<sup>[27]</sup>。现有的远程监测系统均实现了对现场数据的远程传输和处理, 但是由于这些系统均面向特定的应用场景而设计, 因此各系统的推广应用受到一定局限。

针对上述问题, 本文开发用于综合处理 CO<sub>2</sub> 地质封存过程中井间 ERT 监测数据的平台。在该平台进行需求分析和总体设计的基础上, 设计并开发了监测数据从现场传输至远程监控中心并存储、地层中 CO<sub>2</sub> 饱和度成像、地层中 CO<sub>2</sub> 运移状态监测等功能模块, 通过实验测试验证了所开发数据处理平台的可用性。

## 1 井间 ERT 监测数据处理平台功能需求分析与总体设计

### 1.1 监测数据处理平台功能需求分析

井间电阻率成像方法由常规地面电阻率勘探方法发展而来。井间 ERT 系统中, 在一个钻孔中布置激励电极系, 另一个钻孔中布置测量电极系, 对激励电极依次供电, 同时观测测量电极之间的电压, 进而将观测值换算为视电阻率, 最后反演出井间监测区域的电性参数分布图像<sup>[28]</sup>。

图 1 展示了井间 ERT 监测数据的采集方式。固定电极 A 和 B 的位置, 测量电极 M 和 N 依次选通其他电极, 在完成所有测量电极的观测之后, 移动电极 A 和 B 至下一对激励电极的位置, 重复上述测量电极 M 和 N 的选通和观测过程, 直至完成所有激励电极条件下测量电极电压信号的采集。

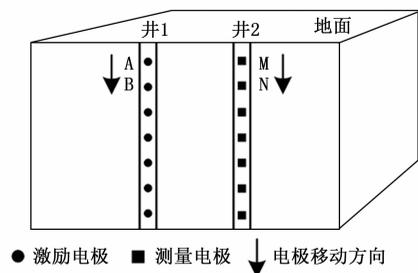


图 1 井间 ERT 监测数据采集方式

由于 CO<sub>2</sub> 运移过程缓慢, 短时间内运移状态不会发生较大变化, 因此远程数据传输可采用定时传送的方式。监测现场无法配置高性能计算机, 导致监测现场井间 ERT 成像结果较为粗糙, 无法满足准确监测 CO<sub>2</sub> 封存状态的需求, 因此需要在监控中心开发井间 ERT 监测数据处理平台, 最终实现对 CO<sub>2</sub> 运移状态的动态监测。该平台主要具备远程数据传输、数据存储、数据处理以及图像显示等功能, 具体说明如下:

1) 位于监控中心的数据服务器能够建立与现场计算机

的远程通信链接, 实现井间 ERT 监测数据的远程传输, 能够将监测数据存储至数据服务器;

2) 监控中心的程序服务器能够获取数据服务器中存储的监测数据, 对其进行井间 ERT 图像重建处理以生成电阻率分布图像, 依据电阻率与 CO<sub>2</sub> 饱和度之间的关系来获得 CO<sub>2</sub> 饱和度图像;

3) 能够对平台用户进行管理, 根据角色分配用户的功能权限; 用户通过浏览器登录平台, 可以访问平台功能模块, 获取 CO<sub>2</sub> 封存及运移状态信息。

### 1.2 监测数据处理平台总体设计

井间 ERT 监测数据处理平台包括硬件部分和软件部分。硬件部分包括数据远程传输模块、数据服务器和程序服务器; 软件部分运用软件工程中的模块化、功能化的设计思想<sup>[29]</sup>, 具有监测数据传输与存储功能、井间 ERT 成像功能和 CO<sub>2</sub> 运移状态监测功能。其中, 数据存储模块位于数据服务器, 监测数据成像模块和 CO<sub>2</sub> 运移状态监测模块位于程序服务器。数据远程传输与存储模块用以实现现场监测数据向监控中心数据服务器的远程传输及数据在数据服务器中的保存; 利用监测数据成像模块对井间 ERT 监测数据进行图像重建算法的处理并生成 CO<sub>2</sub> 饱和度图像; CO<sub>2</sub> 运移状态监测模块的功能是保证具有权限的远程用户在企业局域网内通过客户端 Web 浏览器查看 CO<sub>2</sub> 的运移状态。图 2 所示为该井间 ERT 监测数据处理平台的组成示意图。

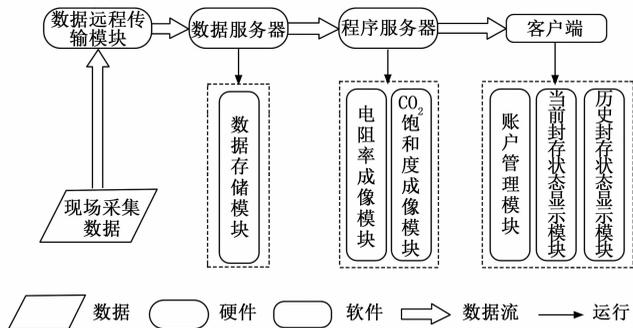


图 2 CO<sub>2</sub> 封存井间 ERT 监测数据处理平台组成示意图

数据传输与存储模块包括井间 ERT 监测数据远程传输子模块与监测数据存储子模块。监测数据远程传输子模块用于将井间 ERT 现场监测数据传输至监控中心的数据服务器; 监测数据存储子模块用于将采集的数据按照时间格式命名, 并以文本文件格式保存至数据服务器。

监测数据成像模块包括电阻层析成像 (ERT) 子模块和 CO<sub>2</sub> 饱和度成像子模块。程序服务器连接数据服务器的数据库读取井间 ERT 监测数据 (测量电压), ERT 子模块利用成像算法求解井间场域内电阻率的分布; CO<sub>2</sub> 饱和度成像子模块根据电阻率分布与 CO<sub>2</sub> 浓度的关系模型生成 CO<sub>2</sub> 饱和度图像。

CO<sub>2</sub> 运移状态监测客户端界面包括账户管理子模块、当前封存状态显示子模块和历史封存状态显示子模块。账

户管理子模块保证不同使用者具备不同的权限, 管理员可以添加、删除平台用户信息以及为用户重置密码, 普通用户可以修改用户个人信息; CO<sub>2</sub> 当前封存状态显示子模块展示根据最新监测数据生成的 CO<sub>2</sub> 饱和度图像; CO<sub>2</sub> 历史封存状态显示模块向用户提供历史图像查询功能。

## 2 井间 ERT 监测数据处理平台开发

### 2.1 CO<sub>2</sub> 监测数据远程传输及存储

#### 2.1.1 监测数据远程传输

本模块包含硬件与软件两部分, 硬件部分为位于监测现场的 4G DTU (Data Transfer Unit) 无线传输模块<sup>[30]</sup>, 用来向数据服务器传输井间 ERT 系统采集的电压信号。软件部分为在数据服务器中基于 LabVIEW 开发的上位机软件, 用来控制由监测现场计算机与无线传输模块所组成的下位机以及接收下位机发送的电压测量数据。图 3 所示为监测数据远程传输过程流程图。

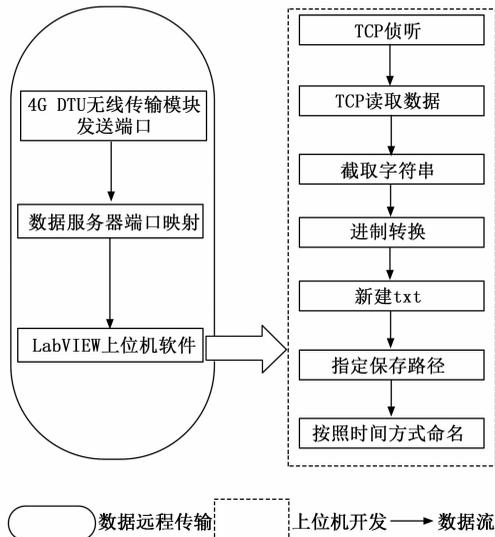


图 3 监测数据远程传输过程流程图

利用花生壳软件的内网穿透功能建立数据服务器与 4G DTU 无线传输模块间的通讯链接。使用上位机软件接收并解析 4G DTU 发送的数据包。上位机软件的工作过程如图 3 右边框所示。首先设置 TCP (Transmission Control Protocol) 侦听组件以监测数据服务器指定端口上的 TCP 连接请求, 当监测到服务器端口出现 TCP 连接请求时, 则进入 TCP 读取数据环节; 然后通过设置起始位和长度来截取字符串, 并将字符串进行相应的进制转换, 完成对数据包的解析<sup>[31]</sup>; 通过设置接收数据的时间实现数据传输的定时功能, 使用新建 txt 组件将解析后的数据保存至 txt 文件, 最终实现数据从监测现场到监控中心数据服务器的远程传输。

#### 2.1.2 系统用户与监测数据文件信息存储

本监测数据处理平台利用 MySQL 创建两个数据库, 分别为用户信息数据库与监测数据文件信息数据库<sup>[32]</sup>。

用户信息数据库内创建了一个名为“用户信息”的表,

该表含 5 个字段：账号、密码、用户姓名、最后登录 IP 和最后登录时间。开发过程中规定了“用户信息”表中各字段的数据类型以及字段长度，“用户信息”表的结构见表 1。

表 1 用户信息表

名称	数据类型	长度	注释
Account	VARCHAR	100	账号
Password	VARCHAR	100	密码
Name	VARCHAR	100	姓名
LastLoginIp	VARCHAR	100	最后登录 IP
LastLoginTime	DATETIME	6	最后登录时间

监测数据经由上位机软件按照时间格式命名并以文本文件格式存储于数据服务器中，同时将监测数据的存储路径保存至数据服务器中监测数据文件信息数据库中。在监测数据文件信息数据库内创建了一个名为“监测数据文件信息”的表，该表格含 3 个字段：文件名称、文件类型和文件存储路径。“监测数据文件信息”表的结构见表 2。

表 2 监测数据文件信息表

名称	数据类型	长度	注释
FileName	DATETIME	6	文件名称
FileType	VARCHAR	100	文件类型
FileSavePath	VARCHAR	100	文件存储路径

## 2.2 CO<sub>2</sub> 监测井间电阻层析成像

### 2.2.1 电阻层析成像理论基础

ERT 正问题是在已知敏感场电导率分布的条件下求解电势分布。对三角形单元与节点进行编号，根据插值函数列出一组激励下一个三角单元中各节点的电势值计算式，求解得到单元刚度矩阵，将所有三角单元的刚度矩阵进行叠加以合成总刚度矩阵，最后得到总的线性方程组<sup>[33-35]</sup>：

$$Y \cdot \varphi = C \quad (1)$$

式中， $Y$  为刚度矩阵， $C$  为激励电流， $\varphi$  为各节点电势分布矩阵。 $Y$  为  $n \times n$  维矩阵， $C$  为  $n \times 1$  维矩阵， $n$  为节点的个数。求解式 (1) 可得场域内各节点的电势值，从而建立灵敏度系数矩阵。对于井间 ERT 逆问题的求解，在两井之间场域内激励电流和测量电压已知的条件下，利用反演算法求解场域内的电阻率分布，并以图像方式进行呈现，即为图像重建过程<sup>[36-37]</sup>。

在两井之间场域的内部，由电阻率分布可以确定测量电极的电压，即  $U = F(\sigma)$ 。在局部一点将该式进行泰勒级数展开，并忽略高阶项的影响，可得：

$$U - U_0 = \left. \frac{dF(\sigma)}{d\sigma} \right|_{\sigma=\sigma_0} (\sigma - \sigma_0) \quad (2)$$

式中， $\sigma - \sigma_0$ 、 $U - U_0$  分别为场域内电阻率分布的变化量和场域内边界电压测量值的变化量； $\left. \frac{dF(\sigma)}{d\sigma} \right|_{\sigma=\sigma_0}$  为灵敏度矩阵，表示边界电压测量值随电阻率的相对变化<sup>[38]</sup>。对式

(2) 进行离散化，则经过离散化、线性化的数学模型可以表示为：

$$Jx = b \quad (3)$$

式中， $b$  为对应边界测量电压变化量的向量， $J$  为将灵敏度矩阵离散化后的矩阵， $x$  为对应电阻率变化量的向量。利用 Geselowitz<sup>[39]</sup> 的灵敏度理论可以进行灵敏度矩阵的计算，用公式表示为：

$$J_{ij} = - \int \frac{\nabla \varphi_i \cdot \nabla \varphi_j}{I_i \cdot I_j} dx dy \quad (4)$$

其中： $J_{ij}$  是灵敏度矩阵  $J$  的第  $(i, j)$  个元素，电极对  $i$  和电极对  $j$  的激励电流为和时对应的场域分布分别是  $\varphi_i$  和  $\varphi_j$ 。将式 (3) 写为归一化形式可得式 (5)：

$$Sg = z \quad (5)$$

式中， $S$  为归一化的灵敏度矩阵； $z$  为归一化的测量电压； $g$  为归一化灰度值向量<sup>[40-41]</sup>。作为 ERT 重建图像的理论依据，该式反映了被测场域内测量电压与电阻率分布之间的关系<sup>[42-43]</sup>。

### 2.2.2 成像数据的获取

在 Microsoft Visual Studio 的 ASP.NET Core 项目中，采用 C# 语言编写连接数据服务器数据库的代码以及监测数据文件存储路径的接口，实现的功能为返回监测数据文件在数据服务器存储的路径。将 MATLAB 程序代码编译为动态链接库，实现井间 ERT 监测数据处理与图像重建的算法。由于采用定时传输并独立存储数据的方式，所以加载的文件路径为非固定值，因此将拟加载数据文件的路径进行参数化处理。通过连接数据库以获得监测数据文件的保存路径，实现对井间 ERT 测量电压数据的获取，将其作为数据处理与图像重建算法的输入参数。

### 2.2.3 基于有限元法的正问题求解

采用有限元法对井间 ERT 正问题进行求解，基于 MATLAB 开发有限元正演计算程序。图 4 描述了基于有限元法的正问题求解过程。首先构建空场模型，设定电极对个数、电极间距、监测区域垂向范围和两井间的水平距离。

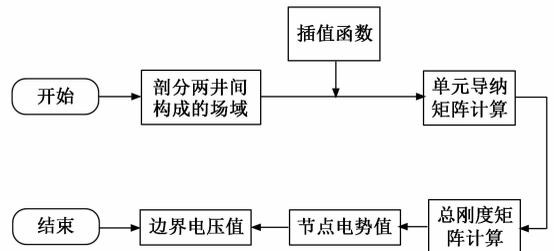


图 4 有限元法正问题求解流程图

井间 ERT 监测的场域为两井间的平面区域，将场域离散化，对三角形单元以及节点进行编号，获取三角形单元的节点坐标并通过插值函数得到三节点的电位方程，进而得到三角形单元上线性插值的基函数。

根据基函数计算单元导纳矩阵元素并形成单元导纳矩

阵, 将单元导纳矩阵进行叠加组成总体刚度矩阵。将总体刚度矩阵代入激励电流值得到一次激励下的各节点电势值, 通过矩阵变换将节点电势矩阵转换为测量电压值矩阵, 叠加所有激励下测量电压值矩阵, 最终得到场域电极测量电压。

### 2.2.4 基于线性反投影法的逆问题求解

采用线性反投影法来求解井间 ERT 的逆问题。图 5 展示了基于线性反投影算法进行井间 ERT 逆问题求解的流程图。

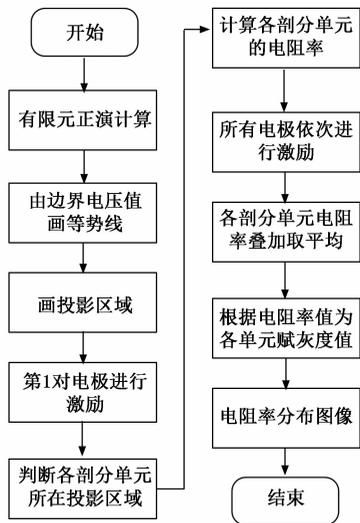


图 5 线性反投影算法逆问题求解流程图

根据有限单元法计算得到的电极测量电压值, 画出两井之间场域的等势线, 将场域划分为多个等势线区。当对第 1 对电极进行激励时, 根据正问题计算得到各单元节点的电位和电极的电位, 判断各个网格单元的所属投影域, 计算出场域各剖分三角形单元的电阻率分布。

对所有电极对依次进行激励, 将各单元每次激励条件下得到的反投影结果叠加求平均, 继而得到整个场域的电阻率分布。根据电阻率值为每个单元赋予灰度值, 得到两井之间场域电阻率的分布图。

利用阿尔奇公式将电阻率转换为 CO<sub>2</sub> 饱和度, 为不同的 CO<sub>2</sub> 饱和度值赋予不同的灰度值, 得到 CO<sub>2</sub> 饱和度分布图。

### 2.2.5 CO<sub>2</sub> 饱和度图像的存储

在 ASP.NET MVC 开发模型中采用代码与逻辑分离的方式进行前端页面设计和后端逻辑控制。后端封装当前图片路径接口、历史图片路径接口和用户传参接口, 并生成接口文档; 前端根据接口文档配置 axios (Web 数据交互方式) 调用应用程序编程接口 (API, application programming interface) 实现前后端数据的交互。

对于经数据处理后得到的 CO<sub>2</sub> 饱和度图像, 将其按照时间格式命名并保存至程序服务器, 将其保存路径存储至程序服务器的数据库。当前图像路径接口向前端返回实时成像结果的保存路径。用户传参接口判断用户是否在界面

手动选择了历史时间, 该接口判断到用户传参后, 后端根据用户选择的时间在数据库中检索对应时间的 CO<sub>2</sub> 饱和度图像保存的路径, 然后将该路径返回到历史封存状态图像地址接口处。

## 2.3 CO<sub>2</sub> 运移状态监测

### 2.3.1 账户管理模块

账户管理模块实现的功能包括注册账号、登入系统以及查看和维护个人信息及密码。用户在前端界面输入用户名和密码, 使用 axios 发送 HTTP 请求到后端服务器, 后端服务器获取用户提供的用户名和密码, 并与用户信息数据库中的信息进行对比, 从而验证用户身份是否正确。用户身份通过验证之后, 则登录界面跳转到主界面, 用户可以进行设定权限内的操作。

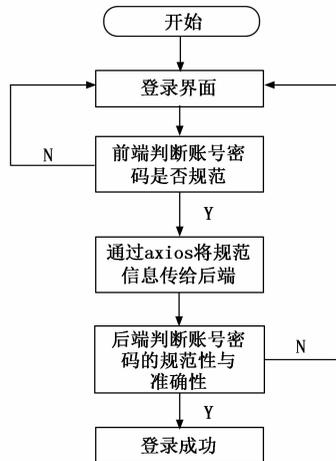


图 6 用户登录流程图

### 2.3.2 CO<sub>2</sub> 当前和历史状态显示模块

前端通过配置 axios 的请求方式、请求路径、请求体参数和请求方法等, 在 index.vue 响应页面对应代码处引入当前 CO<sub>2</sub> 封存状态图像地址接口的路由, 在该页面完成对该地址接口的调用, 同时编写图片显示函数以实现当前 CO<sub>2</sub> 封存状态在 Web 界面的显示。具体流程如图 7 所示。



图 7 当前封存状态图像显示流程图

在前端配置 axios 接口等参数, 并在 index.vue 响应页面对应代码处引入历史封存状态图像地址接口的路由, 完成对该地址接口的调用, 实现历史 CO<sub>2</sub> 封存状态在 Web 界面的显示, 具体流程如图 8 所示。当用户在界面选择历史时间, 用户传参接口响应用户需求, 并向历史状态图像地址接口返回历史图像保存地址。

## 3 系统测试结果与分析

### 3.1 监测数据远程传输与存储模块测试

设置监测现场与数据服务器分别处于两个实验室。在

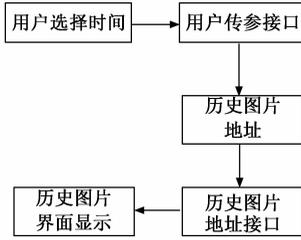


图 8 历史运移状态图像显示流程图

花生壳软件的内网穿透模块界面配置数据服务器的 IP 地址和端口号。如图 9 所示，在上位机软件界面控制 4 G DTU 每间隔 3 个小时向数据服务器定时传输一次数据，设置文件名格式、存储文件夹名和文件存储路径。设定数据传输波特率为 9 600 bps，数据位为 8，停止位为 1，设定若出现上位机与设备通讯失败的情况，则上位机每隔 30 秒重新连接一次设备。

测试结果显示，监测数据文件可以按照设定的时间定时传输至位于另一个实验室的数据服务器，并以 txt 格式存储到数据服务器中，同时监测数据文件的保存路径被存储至监测数据文件信息数据库中。

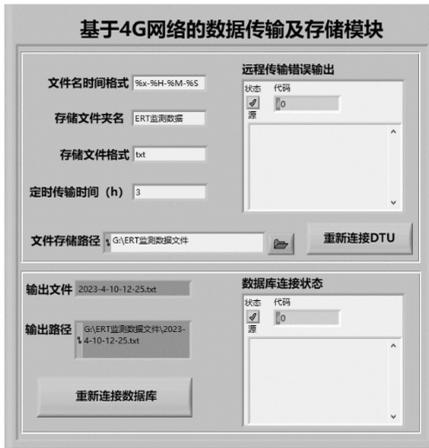


图 9 数据远程传输与存储模块上位机软件界面

### 3.2 监测数据成像模块测试

设定两井水平间距为 30 米，监测地层的深度（垂向范围）为 60 米，两井之间形成的场域中人为设定一个六边形的含 CO<sub>2</sub> 地层，设定该六边形的电阻率值为 10 Ω·m，远大于场域内其他区域的电阻率 0.01 Ω·m。图 10 对电阻率值进行了归一化处理。

采用上述井间 ERT 成像算法实现了正问题和逆问题的求解运算，得到井间场域的电阻率分布，继而得到图 11 所示的 CO<sub>2</sub> 饱和度图像。通过对比设定图像和重建后图像可知，使用线形反投影算法可以对 CO<sub>2</sub> 在地层中的分布进行图形重建，在 CO<sub>2</sub> 分布区域的中心位置 CO<sub>2</sub> 饱和度最大，CO<sub>2</sub> 饱和度由内向外逐步递减，在 CO<sub>2</sub> 分布区域的边界出现了一定的伪影。分析图像中饱和度由内向外递减现象产

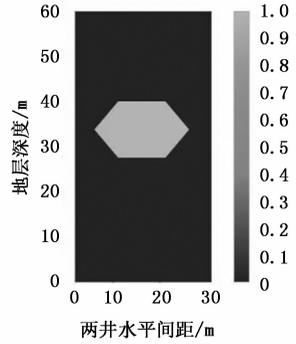


图 10 设定的井间区域内 CO<sub>2</sub> 的分布

生的原因为：将三节点电势值取平均值代替了网格单元的电势值，使得计算过程产生一定的误差；根据场域内测量电极处的电压划分投影域，投影角度较少，场域划分不够精细。如果成像区域存在明显的电阻率变化或边界，或者投影数据中存在强度较高的噪声，利用经典的线性反投影算法往往会得到带有一定伪影的重建图像。

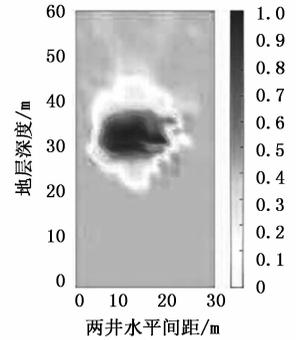


图 11 反演的井间区域内 CO<sub>2</sub> 饱和度分布

### 3.3 CO<sub>2</sub> 运移状态监测模块测试

用户在登录界面输入用户名和密码，若用户输入的信息与用户信息数据库中含有的用户名和密码一致，则可以成功登录系统。用户输入账号或密码错误时，系统提示“账号或密码输入错误，请重新输入”。系统登录界面如图 12 所示。



图 12 监测数据处理平台登录界面

进入主界面后, 管理员账户可在账户管理模块实施新增用户、删除用户等操作。如图 13 所示, 平台当前的用户量为 4。在成像显示模块中的当前 CO<sub>2</sub> 运移状态显示栏内可查看当前 CO<sub>2</sub> 饱和度图像; 在历史 CO<sub>2</sub> 运移状态显示栏内选择拟查看 CO<sub>2</sub> 封存状态的时间, 即可查看历史 CO<sub>2</sub> 饱和度图像, 如图 14 所示。



图 13 平台系统管理员的账户管理界面

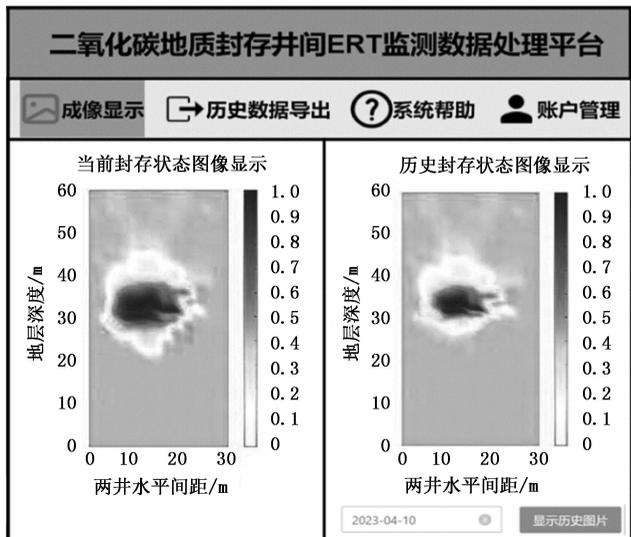


图 14 CO<sub>2</sub> 饱和度图像显示界面

#### 4 结束语

针对 CO<sub>2</sub> 地质封存过程中井间 ERT 监测数据处理的需求, 设计并开发了监测数据综合处理平台。基于 4G 网络实现了远程数据传输, 基于 MySQL 数据库实现了监测数据信息和用户信息的存储, 基于有限元法和线性反投影法实现了井间 ERT 图像重建, 基于 B/S 架构和 MVC 设计模式开发了 Web 软件。该数据处理平台主要具备监测数据从现场传输至远程监控中心并存储、地层中 CO<sub>2</sub> 饱和度成像、地层中 CO<sub>2</sub> 运移状态监测等功能。远程用户登录该平台能够对地质封存过程中 CO<sub>2</sub> 运移状态进行动态实时监测和历史状态查询。

#### 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): 190-205.  
 [2] 赵小令, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 中国二氧化碳捕集利用和封存技术经济性与规模预测 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50 (3): 1-12.  
 [3] 向勇, 侯力, 杜猛, 等. 中国 CCUS-EOR 技术研究进展及发展前景 [J]. 油气地质与采收率, 2022, 29 (4): 1-17.  
 [4] 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.  
 [5] 谢斌, 卢大贵, 吴彩斌. 碳捕集利用与封存技术研究进展 [J]. 有色金属科学与工程, 2023: 1-8.  
 [6] 王高峰, 曹亚明, 解志薇, 等. CCUS-EOR 开发同步埋存阶段长度的确定方法 [J]. 油气地质与采收率, 2023, 30 (2): 1-6.  
 [7] 朱民, Nicholas S, Joseph E, 等. 拥抱绿色发展新范式: 中国碳中和政策框架研究 [J]. 世界经济, 2023, 46 (3): 3-30.  
 [8] 赵改善. 碳中和愿景下石油工业和地球物理行业的生存与突围之道 [J]. 石油物探, 2021, 60 (6): 867-878.  
 [9] 张志超, 柏明星, 高硕, 等. CO<sub>2</sub> 地质封存系统泄漏风险评估 [J]. 油气地质与采收率, 2023, 30 (3): 1-9.  
 [10] 霍宏博, 刘东东, 陶林, 等. 基于 CO<sub>2</sub> 提高采收率的海上 CCUS 完整性挑战与对策 [J]. 石油钻探技术, 2023: 1-10.  
 [11] 李姜辉, 李鹏春, 李彦尊, 等. 离岸碳捕集利用与封存技术体系研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 29 (2): 1-14.  
 [12] 张凯, 陈掌星, 兰海帆, 等. 碳捕集、利用与封存技术的现状及前景 [J]. 特种油气藏, 2023: 1-12.  
 [13] 邓一荣, 汪永红, 赵岩杰, 等. 碳中和背景下二氧化碳封存研究进展 [J]. 地学前缘, 2023: 1-11.  
 [14] 李冬. CO<sub>2</sub> 封存储层精细描述及运移监测方法研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2021.  
 [15] 田宝卿, 徐佩芬, 庞忠和, 等. CO<sub>2</sub> 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.  
 [16] 任妹娟. 深部咸水层二氧化碳地质储存监测技术应用研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.  
 [17] BERGMANN P, SCHMIDT-HATTENBERGER C, KIESSLING D, et al. Surface-downhole electrical resistivity tomography applied to monitoring of CO<sub>2</sub> storage at Ketzin, Germany [J]. Geophysics, 2012, 77 (6): B253-B267.  
 [18] PETER A, LAMERT H, BEYER M, et al. Investigation of the geochemical impact of CO<sub>2</sub> on shallow groundwater: design and implementation of a CO<sub>2</sub> injection test in Northeast Germany [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 335-349.  
 [19] CARRIGAN R C, YANG X, LABRECQUE J D, et al. Electrical resistance tomographic monitoring of CO<sub>2</sub> movement in deep geologic reservoirs [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 18: 401-408.

(下转第 320 页)