



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403697

引用格式:张昊,郑恭明,邹先坚.造腔井两相介质界面光纤监测算法[J].科学技术与工程,2025,25(10):4102-4108.

Zhang Hao, Zheng Gongming, Zou Xianjian. Optical fiber monitoring algorithm of two-phase dielectric interface in cavity well[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4102-4108.

# 造腔井两相介质界面光纤监测算法

张昊<sup>1</sup>, 郑恭明<sup>1\*</sup>, 邹先坚<sup>2</sup>

(1. 长江大学电子信息与电气工程学院, 荆州 434000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要** 盐穴造腔时调控腔体形态的关键因素是控制阻溶剂与卤水界面的深浅,而阻溶剂与卤水界面的准确监测又是其控制的前提条件。当前的两相介质界面监测技术存在实时性差、精度不高等缺点。提出了一种针对造腔井内两相介质监测的专用算法。利用分布式光纤采集腔内垂直方向的温度数据,并对原始温度曲线分别进行局部加权回归分析和卡尔曼滤波处理。通过对处理后的曲线进行差分运算,识别出温差变化最明显的区域,初步确定两相介质的界面位置。然后,对初步定位区域内的温度曲线进行卷积平滑滤波处理,计算卷积平滑滤波曲线的加权变化率,找到温度变化率的最大值,最终确定两相介质交界面的具体位置。该算法通过实际工况下造腔两相介质界面监测。实验结果表明,该系统获取的测量数据与中子测井法所得结果相比,其误差控制在0.3 m的范围内。本文算法相较于传统的光纤监测技术,具有操作简单、测量精度和可靠性高的优点。

**关键词** 地下储气库; 溶腔造库; 数据滤波; 介质界面监测

中图分类号 TE972; 文献标志码 A

## Optical Fiber Monitoring Algorithm of Two-phase Dielectric Interface in Cavity Well

ZHANG Hao<sup>1</sup>, ZHENG Gong-ming<sup>1\*</sup>, ZOU Xian-jian<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**[Abstract]** The key factor to control the shape of salt cavern cavity is to control the depth of the interface between solvent and brine, and the accurate monitoring of the interface is the prerequisite for its control. The current two-phase media interface monitoring technology has the disadvantages of poor real-time performance and low precision. A special algorithm for two-phase media monitoring in cavity well was proposed. Distributed optical fiber was used to collect the temperature data in the vertical direction of the cavity, and the original temperature curves were respectively processed by local weighted regression analysis and Kalman filtering. Through the difference calculation of the treated curve, the region with the most obvious temperature difference was identified, and the interface position of the two-phase medium was preliminarily determined. Then, the temperature curve in the initial location area was processed by convolutional smoothing filtering, the weighted rate of change of the convolutional smoothing filter curve was calculated, the maximum value of the temperature change rate was found, and the specific location of the interface of the two-phase medium was finally determined. The algorithm was used to monitor the interface of two phase media under actual conditions. The experimental results show that the error of the measured data obtained by this system is controlled within 0.3 m compared with that obtained by neutron logging method. Compared with the traditional optical fiber monitoring technology, the proposed algorithm has the advantages of simple operation, high measurement accuracy and high reliability.

**[Keywords]** underground gas storage; cavity storage; data filtering; medium interface monitoring

盐穴储气库的大规模商业化建设和安全运营是国家战略需求和“十四五”新型储能发展的主要目标之一<sup>[1]</sup>。盐穴储气库是在地下盐层或盐丘中

利用水溶采盐形成的地下空腔来储存天然气的能源战略储备设施<sup>[2-3]</sup>。在盐穴储气库的溶腔建库过程中,腔体形态是决定储气库容量和稳定运行的关

收稿日期: 2024-05-18; 修订日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(42377178); 武汉知识创新专项项目(2023010201010078)

第一作者: 张昊(1999—),男,汉族,山东潍坊人,硕士研究生。研究方向:电子信息。E-mail:1847517418@qq.com。

\*通信作者: 郑恭明(1980—),男,汉族,重庆人,博士,副教授。研究方向:人工智能、物联网技术。E-mail:zgm831@yangtzeu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

键因素<sup>[4-5]</sup>。造腔过程中通过控制阻溶剂与卤水的界面位置,可以有效地调控腔体形态<sup>[6]</sup>。阻溶剂和卤水界面的精准监测不仅对造腔形态具有重要意义,还可减少阻溶剂的使用量,具有显著的经济效益<sup>[7]</sup>。

因盐穴造腔的地质环境和条件,传统的两相介质界面监测方法(压力表对比法、地面观察法、浮子法、水锤激发测面法、超声波液位法)均不适用<sup>[8-9]</sup>。为满足储气库溶腔精度的需求,目前也有许多学者开展了相关研究,文献[10-14]分别就盐穴储气库造腔油水界面深度实时检测技术、盐穴储气库中子寿命测试油水界面技术、基于深度学习的盐穴储气库油水界面监测方法、基于光纤技术的盐穴储气库溶腔过程油水界面监测、光纤技术在盐穴储气库油水界面监测中的应用进行深入研究。其中应用广泛的监测方法主要有中子测井法和分布式光纤监测法两种<sup>[11]</sup>。中子测井法虽然能较准确地获取两相介质界面深度,但存在无法连续监测、施工要求高、时间长且价格昂贵等缺点<sup>[15]</sup>。分布式光纤监测法是将光纤通过造腔管道布设到腔体内部,可实现实时测量、不影响施工、价格便宜<sup>[16]</sup>。但目前分布式光纤监测介质界面位置精度为0.6 m,且需人工定位,测量精度及操作便捷性有待进一步提高。

综上所述,传统的介质界面监测技术在应用于盐穴储气库造腔井时存在局限性,而光纤测井法其精度和操作便捷性仍有提升空间。因此,针对这一问题,现提出一种基于分布式光纤两相介质界面监测算法,旨在满足对盐穴储气库介质界面进行高精度监测的实际需求。

## 1 造腔井两相介质界面光纤监测原理

在盐穴储气库溶腔阶段,因为卤水的饱和度下高上低,造成上溶速率大于底部和侧溶速率。为了控制造腔速度和腔体形态,必须在卤水上部注入阻溶剂,阻溶剂与卤水之间的分界面称为两相介质界面<sup>[17]</sup>。目前常用的阻溶剂有柴油及氮气两种,由于氮气压力高、泄漏风险大,对管柱气密性、耐压性具有较高要求<sup>[18]</sup>,所以目前造腔井大多采用柴油作为阻溶剂,施工单位主要采用油垫法水溶建腔的工艺进行水溶造腔,即通过淡水注入通道引入淡水溶腔,卤水排出管道用将卤水排出,并通过对阻溶剂注入管道注入柴油,形成一定厚度的油垫层在腔体顶部,从而实现对腔体上溶的控制<sup>[19]</sup>。图1为水溶造腔示意图。

造腔井两相介质界面监测是基于光纤测温原理和介质比热容差异原理的综合应用,利用不同介

质比热容差别,通过分布式光纤监测温度变化,实现介质界面监测。

综上所述,传统的介质界面监测技术在应用于盐穴储气库造腔井时存在局限性,而光纤测井法其精度和操作便捷性仍有提升空间。因此,本研究旨在针对这一问题,提出了一种基于分布式光纤两相介质界面监测算法,旨在满足对盐穴储气库介质界面进行高精度监测的实际需求。

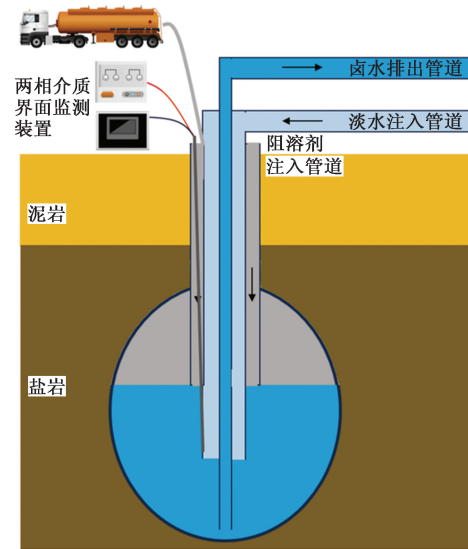


图1 油垫法水溶造腔示意图

Fig. 1 Diagram of water-soluble cavity by oil pad method

### 1.1 分布式光纤测温原理

分布式光纤测温原理如下:使用激光器发射一束脉冲激光到传感光纤中,脉冲激光在传输过程中与光纤介质分子相互作用会发生拉曼散射现象<sup>[20-22]</sup>,拉曼散射具有较强的温敏特性<sup>[23]</sup>,易受光纤散射点的温度影响,通过安装在激光器同侧的探测器进行探测和获取拉曼后向散射光,结合光时域反射定位算法<sup>[24]</sup>及光强温度解调算法<sup>[25]</sup>,实现对光纤沿直线方向的分布式测温。图2为在分布式光纤中的光散射现象示意图。

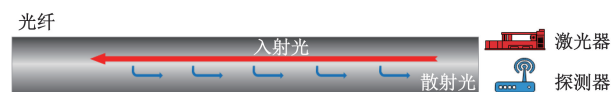


图2 分布式光纤中的光散射现象

Fig. 2 Light scattering phenomena in distributed optical fibers

### 1.2 分布式光纤两相介质界面监测原理

分布式光纤测温装置(distributed temperature sensing, DTS)采集并保存造腔井内垂直方向的温度-距离曲线,为达到对盐穴储气库造腔井进行局部加热的要求,在特种铠装光缆外铠内放入带有电阻的电缆用于加热<sup>[26]</sup>。当电缆通电时,消耗的电能会

在电缆上转换为热能<sup>[27]</sup>,进而使铠装光缆周围环境局部升温。在复合光缆进行主动加热的过程中,由于不同介质(如柴油和卤水,氮气和卤水)具有不同的比热容,导致其升温 and 降温速率存在显著差异,表现出不同的温敏特性<sup>[28]</sup>,理想状态下(只考虑三者比热容的差异,且均未到达沸点及燃点)差异如图3所示。这种差异性导致在气-油-水等交叉界面的位置发生突变,形成明显的温度阶梯。

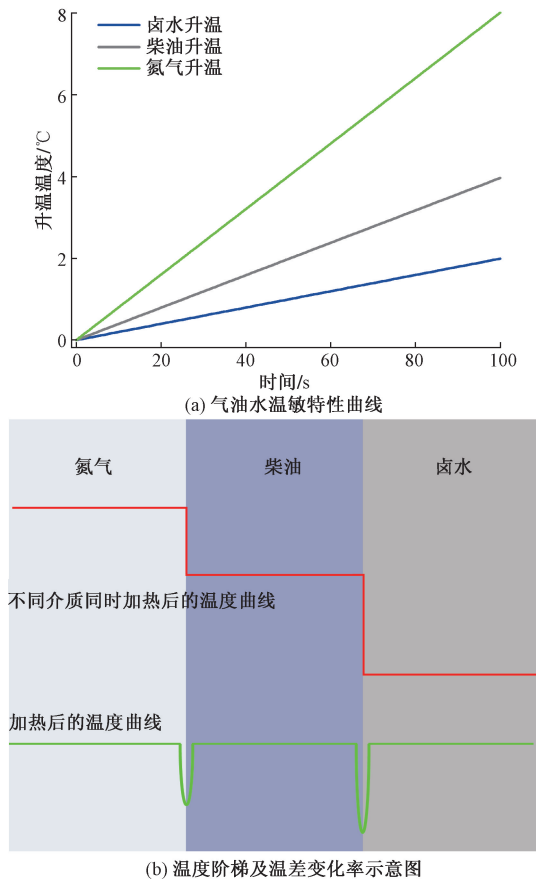


图3 不同介质温敏特性示意图

Fig. 3 Temperature-sensitive characteristics of different media

## 2 造腔井两相介质界面光纤监测算法

### 2.1 两相介质界面监测算法

根据图3不同介质的温敏特性,在相同加热条件下,不同介质区的升温不同,两相介质分界面处的温差悬殊,变化率剧烈。因此本文研究提出一种基于温差变化率的两相介质界面监测算法,主要包括初步定位和精确定位两个核心步骤。

#### 2.1.1 介质界面初步定位

鉴于井下复杂环境存在多种潜在干扰,为确保在进行噪声滤除的基础上保留两相介质界面的温度阶梯,首先采用卡尔曼滤波算法<sup>[29]</sup>对原始温度曲线进行处理得到卡尔曼滤波曲线。考虑到井下整

体温度受地温梯度影响会随着深度增加而升高的特性,利用局部加权回归算法<sup>[30]</sup>拟合温度曲线的趋势得到趋势拟合曲线;最后,使用卡尔曼滤波曲线与其对应的趋势拟合曲线进行差分运算得到差值曲线,由于前端数据包含大量杂波,并且在初步定位过程中意义不大,舍弃前100 m差值数据并结合式(1)迭代循环识别出温度差值的显著突变点,其中 $X_{\text{kalmalmax}}(i)$ 为卡尔曼滤波曲线的第 $i$ 个温度值, $X_{\text{local}}(i)$ 为趋势拟合曲线的第 $i$ 个温度值, $\text{diff}_{\text{max}}$ 为差值曲线最大值。从 $\text{diff}_{\text{max}}$ 沿温差曲线向后找到差值曲线首个过零点,该过零点的横坐标选定为初步定位点,选取其前20 m、后20 m范围内数据作为初定位区域以进行精确定位。图4为初定位曲线示意图,紫色曲线为迭代循环得到的差值最大值曲线,为便于观察将差值曲线上移30 °C处理。

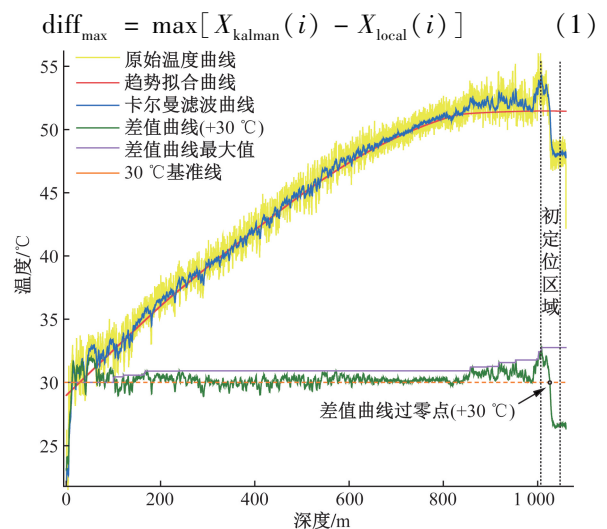


图4 初定位曲线示意图

Fig. 4 Initial positioning curve diagram

#### 2.1.2 介质界面精确定位

在精确定位阶段,为提高原始温度曲线的信噪比,对比卡尔曼滤波算法及卷积平滑滤波算法(Savitzky-Golay)<sup>[31]</sup>在两相介质界面位置处的跟随效果,使用低阶卷积平滑滤波算法对初步定位区域内的原始数据进行平滑处理能更好地保留阶梯特征,如图5所示。

对卷积平滑滤波曲线进行多次不同间隔点的变化率求解,并将求得的多组变化率进行加权求和,对比不同 $N$ 值对算法定位精度的影响,取加权表达式 $N$ 值为10。然后仅对初步定位区域内的变化率加权曲线进行分析,循环迭代找到局部变化率极小值点,其横坐标便是两相介质界面的精确定位。如图6所示。

在上述求解局部变化率的过程中,若利用固定

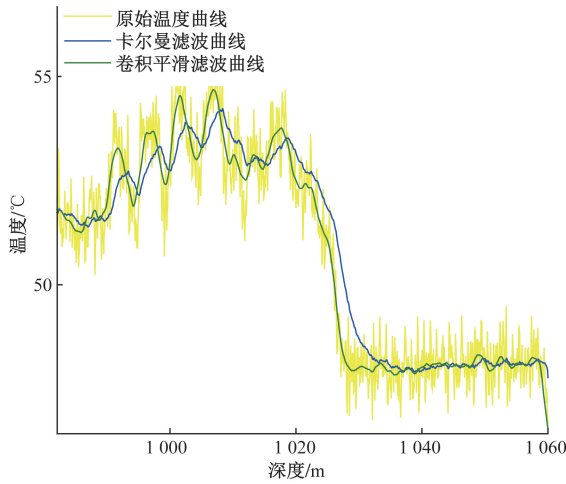


图5 卡尔曼滤波算法与卷积平滑滤波算法对比图  
Fig. 5 Comparison between Kalman filter algorithm and convolutional smoothing filter algorithm

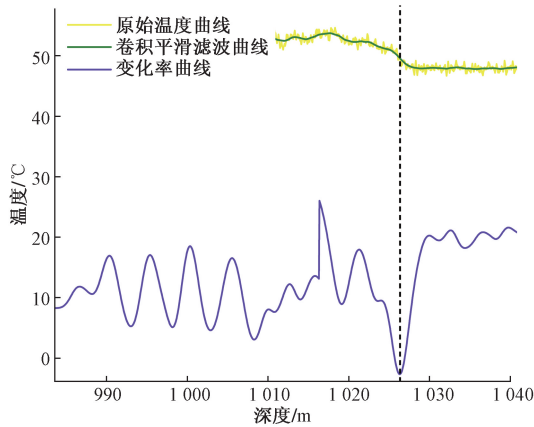


图6 精确曲线示意图  
Fig. 6 Exact curve diagram

间隔来计算变化率,会使变化率曲线受到杂波的显著影响,降低算法定位精度。为准确求解特定点的局部变化率,提出一种变化率加权求和算法,通过设定多组不同间隔,对曲线上特定点的变化率进行计算,并将不同组的变化率进行加权求和。加权规则为:若进行 $2N$ 组变化率计算,则 $N$ 处权重最大,两侧权重依次减少,加权表达式为

$$y_i = \sum_{j=1}^{2N} w_j \frac{x_{i+j} - x_{i-j}}{2} \quad (2)$$

式(2)中: $y_i$ 为第 $i$ 个点处的变化率加权求和值; $w_j$ 为第 $j$ 组变化率权重。

权重计算公式为

$$w_j = \begin{cases} \frac{2}{|N-j|+1}, & j \leq N \\ \frac{1}{|N-j|+1}, & j > N \end{cases} \quad (3)$$

综合 2.1.1 节与 2.2.2 节描述,图 7 为本文算

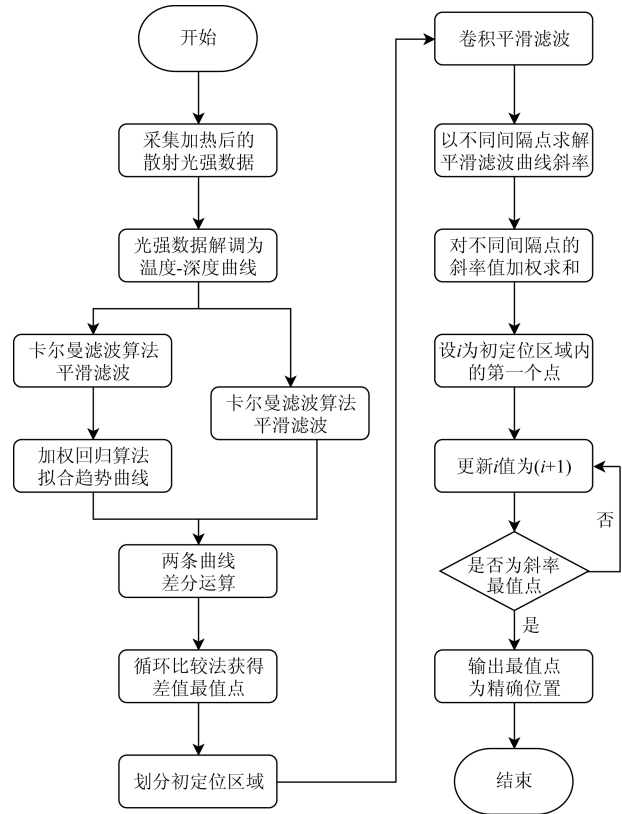


图7 算法流程图  
Fig. 7 Algorithm flow chart

法的流程框图。

### 2.2 与传统测井法对比

传统测井方法包括 3 个主要步骤。首先,测量井内的初始温度曲线;然后对光纤进行加热处理,并采集经加热后的井内温度曲线数据;最后,对这两组数据进行差分处理,进而确定介质界面的位置。本研究提出的算法仅需要对加热后的温度曲线数据进行分析处理,从而简化操作流程,无需施工人员手动标定界面位置;并且通过多种滤波算法及对变化率进行加权计算的方式,提高介质界面定位精度。

### 3 现场测试

为了验证设计的有效性和准确性,将测试结果与传统的中子寿命测井法进行对比,检验装置的精确度。

#### 3.1 实际测试结果分析处理

为提高测温精度,在温度定标阶段,选取了一根长度为 100 m 的光纤作为定标光纤,置于 DTS 设备内进行定标,因此在数据显示时,前 100 m 数据被舍弃并不作显示,仅对截取后的温度-距离曲线进行处理。

分析实验数据,在位于地表的 0 ~ 20 m 范围内,

由于光纤处于地表,受环境影响所测温度约为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;在 $20\sim 100\text{ m}$ 的范围内,由于光纤与铠装外壳接触不充分,因此数据中含有较多噪声。在 $100\sim 1\ 000\text{ m}$ 的深度范围内,该深度范围内的地下环境受地热的影响,整体温度随深度增加而升高,导致该段温度曲线呈现上升趋势。在距离 $1\ 000\text{ m}$ 之后的区域,随着周围环境的从柴油向卤水的转变,观测到温度呈现出明显的阶梯状变化。

两相介质界面定位算法的过程曲线如图8所示,横坐标表示传感光纤长度,纵坐标表示相应位置的温度,其中黄色曲线为分布式光纤测温系统采集到的原始温度曲线,绿色曲线为原始温度曲线经过卷积平滑滤波得到的曲线,紫色曲线为变化率加权求和曲线。在精确定位过程中,仅对初步定位标区域内的变化率加权曲线进行分析,找到其最小的极值点,该点位置便是温度变化最大的位置,即介质界面精确定位点,深度分别为 $1\ 026.4\text{ m}$ 及 $1\ 026.2\text{ m}$ 。

### 3.2 测试精度检验

通过与相关测试部门使用中子测井法进行某造腔井两相介质界面校验的机会,使用本光纤界面算法对两相介质界面进行定位分析,进一步验证装

置的测试精度,对比结果如表1所示。根据表1可知,本文装置与中子测井法在测得的两相介质界面位置上的绝对差值在 $0.3\text{ m}$ 以内。

表1 算法精度测试表

Table 1 Algorithm accuracy test table

测试次数	注退油量/ $\text{m}^3$	界面位置/ $\text{m}$		测量差值/ $\text{m}$
		中子测量	光纤测量	
1	退0.5	1 026.2	1 026.4	0.2
2	退1.0	1 025.9	1 026.2	0.3
3	退0.5	1 024.9	1 025.1	0.2
4	退0.5	1 023.4	1 023.3	-0.1
5	退0.2	1 022.2	1 022.5	0.3

## 4 结论

为提高造腔井两相介质界面的定位精度并降低操作难度,提出了一种新型高精度的造腔井两相介质界面监测算法,得到如下结论。

(1)对工程数据进行测试分析得:在拟合温度趋势方面,局部加权回归算法优于卡尔曼滤波算法及卷积平滑滤波算法;在温度阶梯处的跟随效果方面,低阶卷积平滑滤波算法优于卡尔曼滤波算法及局部加权回归算法。

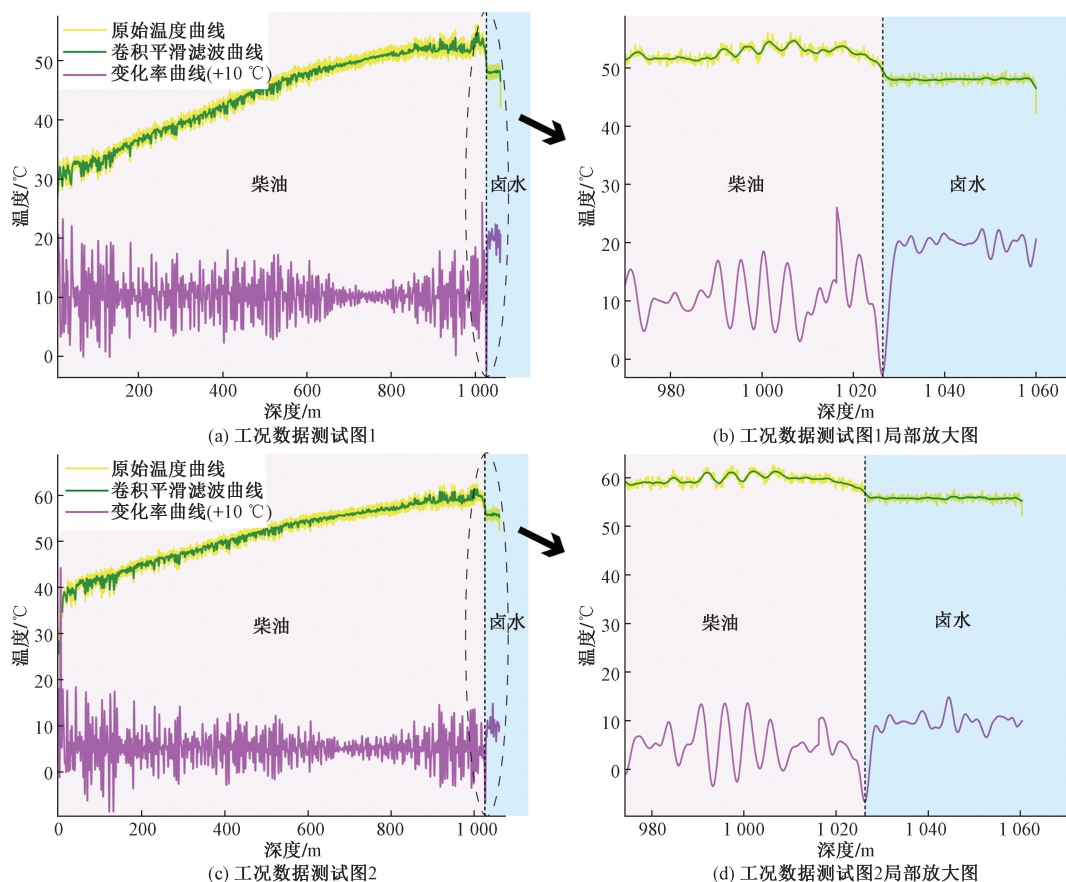


图8 两相介质界面定位算法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of interface location algorithm for two-phase media

(2)提出了一种变化率加权求和算法,通过对不同间隔变化率进行加权求和处理,可以准确求解特定点的局部变化率,增加介质界面定位精度。

(3)相较于传统光纤测井方法,本文算法在提高精度的前提下还具有简化操作流程的优势,仅需对加热后的温度数据进行处理即可,并且无需手动标定。

(4)对本文算法进行了实际工程测试,结果显示,在以现场中子测井法定位点为参考点的情况下,定位点误差控制在0.3 m 范围内。

### 参 考 文 献

- [1] 黄宽,张万益,王丰翔,等. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 105-117.  
Huang Kuan, Zhang Wanyi, Wang Fengxiang, et al. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions [J]. Geology in China, 2024, 51(1): 105-117.
- [2] 冉莉娜,郑得文,罗天宝,等. 盐穴地下储气库的建设与运行特征[J]. 油气储运, 2019(9): 778-781, 787.  
Ran Lina, Zheng Dewen, Luo Tianbao, et al. Construction & operation characteristics of salt cavern underground gas storages[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019(9): 778-781, 787.
- [3] 鲁宇涛,张引弟,徐刘伟,等. 基于遗传算法的盐穴储气库注气能力方案优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11): 4472-4478.  
Lu Yutao, Zhang Yindi, Xu Liuwei, et al. Optimization of gas injection capacity of salt cavern gas storage based on genetic algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(11): 4472-4478.
- [4] 王建夫,安国印,王文权,等. 盐穴储气库氮气阻溶造腔工艺技术及现场试验[J]. 油气储运. 2021, 40(7): 802-808.  
Wang Jianfu, An Guoyin, Wang Wenquan, et al. Solution-mining-under-nitrogen technology for salt-cavern gas storage and field test [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(7): 802-808.
- [5] 陈西西,杨小平,荣伟,等. 盐穴储气库小间距双井造腔参数研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8780-8787.  
Chen Xixi, Yang Xiaoping, Rong Wei, et al. Research on cavity forming parameters of salt cavern gas storage with small space and double wells[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8780-8787.
- [6] 高丽,丁双龙,刘伟,等. 不同浓度淡卤水对盐穴储气库造腔的影响[J]. 中国井矿盐, 2023, 54(6): 9-11.  
Gao Li, Ding Shuanglong, Liu Wei, et al. Effect of different concentrations of dilute brine on cavity building in salt cavern energy storage[J]. China Well and Rock Salt, 2023, 54(6): 9-11.
- [7] 刘伟,李德鹏,高丽,等. 盐穴能源储库氮气阻溶造腔气垫控制理论研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2205-2220.  
Liu Wei, Li Depeng, Gao Li, et al. Control theory of gas blanket in energy storage salt cavern construction with nitrogen dissolution inhibition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2205-2220.
- [8] Ula R, Sabine F, Gabriela K. Monitoring of biofilm development and physico-chemical changes of floating microplastics at the air-water interface[J]. Environmental Pollution, 2023, 322: 1-9.
- [9] Zhang Y F, Dong H B, Wang T L, et al. Ultrasonic guided wave monitoring of dendrite formation at electrode-electrolyte interface in aqueous zinc ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2022, 542: 1-9.
- [10] 王宇琦. 盐穴储气库造腔油水界面深度实时检测技术[J]. 江汉石油职工大学学报, 2018, 31(2): 39-41.  
Wang Yuqi. Real-time detection technology of oil-water interface depth in salt cavern gas storage cavity[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2018, 31(2): 39-41.
- [11] 许佳良,王建夫,乔宽,等. 盐穴储气库中子寿命测试油水界面技术[J]. 石油化工应用, 2019, 38(10): 77-80.  
Xu Jialiang, Wang Jianfu, Qiao Kuan, et al. Neutron lifetime test oil-water interface technology in salt cavern gas storage[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(10): 77-80.
- [12] 陈健. 基于深度学习的盐穴储气库油水界面监测方法[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(12): 36-39.  
Chen Jian. Oil-water interface monitoring method of salt cavern gas storage based on deep learning[J]. Technical Supervision of Petroleum Industry, 2022, 38(12): 36-39.
- [13] 李海伟,杨清玉. 盐穴储气库溶腔过程中腔体净容积及油水界面计算实例[J]. 石油化工应用, 2015, 34(6): 56-58.  
Li Haiwei, Yang Qingyu. Calculation example of net volume and oil-water interface of salt cavern gas storage during cavity dissolution[J]. Petrochemical Applications, 2015, 34(6): 56-58.
- [14] 付亚平,吴斌,敖海兵,等. 光纤技术在盐穴储气库油水界面监测中的应用[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 73-78.  
Fu Yaping, Wu Bin, Ao Haibing. Application of optical fiber technology to the oil/water interface monitoring of salt-cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 73-78.
- [15] 吴坤. 钾冰晶石中子/伽马探测器制备及谱测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.  
Wu Kun. Research on preparation and spectrum measurement technology of Kcrorite neutron/gamma detector[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [16] 董家永,杨华侨,徐太保,等. 分布式复合缆光纤产出剖面测井工艺在海上油气田的应用[J]. 化工管理, 2024(6): 134-136, 140.  
Dong Jiayong, Yang Huaqiao, Xu Taibao, et al. Application of distributed composite cable optical fiber production profile logging technique in offshore oil and gas fields[J]. Chemical Engineering Management, 2024(6): 134-136, 140.
- [17] 王建夫,王斌,丁双龙,等. 盐穴储气库天然气阻溶造腔快速投产技术[J]. 盐科学与化工, 2023, 52(4): 4-8.  
Wang Jianfu, Wang Bin, Ding Shuanglong, et al. Leaching under natural gas for salt-cavern gas storage advanced production[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2023, 52(4): 4-8.
- [18] 杨春和,王同涛. 深地储能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1729-1759.  
Yang Chunhe, Wang Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [19] 王建夫,朱阔远,李友才,等. 金坛盐穴储气库造腔关键参数

- 优化[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 471-475.  
Wang Jianfu, Zhu Kuanyuan, Li Youcai, et al. Optimization of key cavity construction parameters of Jintan salt-cavern gas storage [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 471-475.
- [20] Lu L D, Wang Y S, Liang C, et al. A novel distributed optical fiber temperature sensor based on raman anti-stokes scattering light [J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11214.
- [21] 马寒松, 李海涛, 罗红文, 等. 气藏直定井温度剖面影响规律分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14192-14200.  
Ma Hansong, Li Haitao, Luo Hongwen, et al. Analysis of influence law of temperature profile of direct well in gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14192-14200.
- [22] 周众钦, 吴静红, 李一雄, 等. 分布式温度感测技术在金坛地区地层导热性能评价中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 7899-7908.  
Zhou Zhongqin, Wu Jinghong, Li Yixiong, et al. Application of distributed temperature sensing technology to evaluation of formation thermal conductivity in Jintan Area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7899-7908.
- [23] 李硕, 王纪强, 高忠国, 等. 基于拉曼信号分段重构的分布式光纤测温空间分辨率提升研究[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(10): 293-298.  
Li Shuo, Wang Jiqiang, Gao Zhongguo, et al. Research on spatial resolution improvement of distributed optical fiber temperature measurement based on Raman signal segmentation and reconstruction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(10): 293-298.
- [24] 苟怡, 郭清华. 分布式光纤测温系统温度与定位补偿算法研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(4): 83-86, 98.  
Gou Yi, Guo Qinghua. Study the temperature and positioning compensation algorithm of distributed optical fiber temperature measurement system [J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(4): 83-86, 98.
- [25] 周龙. 基于拉曼分布式光纤测温系统的设计与优化[D]. 桂林: 广西师范大学, 2023.  
Zhou Long. Design and optimization of distributed fiber optic temperature measurement system based on Raman [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2023.
- [26] 李剑, 陈金宏, 黄益, 等. 新型测井光缆研制及应用[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(5): 16-21.  
Li Jian, Chen Jinhong, Huang Yi, et al. Development and application of new logging cable [J]. Petroleum Pipe and Instrument, 2023, 9(5): 16-21.
- [27] 李拴魁, 林原, 潘锋. 热能存储及转化技术进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1551-1562.  
Li Shuankui, Lin Yuan, Pan Feng. Research progress in thermal energy storage and conversion technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1551-1562.
- [28] 刘亚静, 乔宽, 李天友, 等. 光纤式油水界面仪井下损坏分析及防范措施[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 523-526.  
Liy Yajing, Qiao Kuan, Li Tianyou, et al. Analysis and preventive measures for the downhole damage of optical fiber based optical fiber oil-water interface instrument [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 523-526.
- [29] 戚群涛. 矿井环境下基于改进卡尔曼滤波的UWB定位算法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.  
Qi Quntao. Research on UWB location algorithm based on improved kalman filter in underground coal mine environment [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023.
- [30] 柯能, 朱新慧, 王刃, 等. 基于局部加权回归及经验模态分解的地心运动降噪方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(9): 904-908.  
Ke Neng, Zhu Xinhui, Wang Ren, et al. A noise reduction method for geocentric based on locally weighted regression and empirical modal decomposition [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(9): 904-908.
- [31] 李卫平, 何静, 曾祥平, 等. 基于Savitzky-Golay滤波的雷暴天气大气电场信号分析[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(10): 14-17.  
Li Weiping, He Jing, Zeng Xiangping, et al. Analysis of atmospheric electric field signal in thunderstorm weather based on savitzky-golay filtering [J]. Microcomputer Applications, 2023, 39(10): 14-17.