

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.040

累加偏移角度的滑坡深部三维信息监测技术

霍蔚然^{1,2}, 聂闻², 蔡伟佳^{2,3}

- (1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;
2. 中国科学院 海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362216;
3. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362251)

摘要:为解决使用现有测斜仪监测滑坡深部数据不精确、信息不完整的问题,提出一种使用测斜初始偏移角累加、测量参考坐标转换的测斜数据计算方法,并且协同地表三维信息监测设备 GNSS,实现精确至毫米级的数据监测精度。通过与现有测斜计算方法的对比结果表明:累加测斜偏移角度的监测数据精度更高,计算结果更贴合测斜真实位移量;且融合地表三维坐标信息,实现了实时监测滑坡深部的三维变化状况。

关键词:测斜仪;GNSS;滑坡深部监测

中图分类号:TP2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0205-04

Deep Landslide 3D Information Monitoring Technique Based on Accumulated Inclination Offset Angles

HUO Weiran^{1,2}, NIE Wen², CAI Weijia^{2,3}

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China;
3. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China)

Abstract: To address the issues of imprecise and incomplete deep landslide data obtained from existing inclinometers, this paper proposes a method for calculating inclinometer data based on accumulating initial inclination offset angles and converting measurement reference coordinates. Combined with GNSS surface three-dimensional information monitoring equipment, millimeter-level monitoring accuracy is achieved. Comparative results with existing inclinometer calculation methods show that monitoring data using accumulated inclination offset angles are more accurate and better reflect the actual displacement measured by inclinometers. Furthermore, by integrating surface three-dimensional coordinate information, real-time monitoring of three-dimensional changes in deep landslide areas is achieved.

Keywords: inclinometer; GNSS; deep landslide monitoring

0 引言

测斜仪作为滑坡深部变形监测使用最广泛、最常见的设备之一,对于滑坡深部的土体倾斜、位移变形监测在预警防治中起着至关重要的作用^[1]。由于受限于现有测斜仪设备的监测原理以及自身设备构造等因素,传统监测方案不仅难以便携地完成实时远程监测多个深部高度的倾斜位移^[2],还因三维坐标信息的缺失,无法及时准确地监测滑坡深部变化信息^[3]。

大量研究在测斜数据采集和处理过程中,通

常将测斜仪底端视为固定不动点,进行测斜仪角度位移的计算^[4];且将测斜管架设时产生的初始偏移角,以及测量过程中由于外力影响等因素造成的原始测斜仪的测量轴向发生偏移进行了忽略处理,所得到的监测数据与实际真实值有一定的偏差。

针对上述讨论,本文提出通过累加测斜初始偏移角与偏移角度坐标转换的方法,使测斜仪在监测过程中数据精度更高;且提出使用 GNSS 设备监测数据融合,优化数据推算方法,获得实时精准的滑坡深部变形信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(41072232);福建省科学院科学技术合作计划项目(STS,2022T3051);江西省杰出青年基金项目(20212ACB214005)

第一作者简介:霍蔚然(2000—),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为电子信息控制工程,1649875979@qq.com。

通信作者简介:聂闻(1982—),男,江西南昌人,教授,博士,研究方向为矿山灾害预测预警,wen.nie@fjirsm.ac.cn。

1 偏移角度的累加及转换

在测斜仪设备架设以及测量期间,由于一般情况下初始钻孔并不能达到理想铅垂状态^[5],或者在测斜管安装架设时发生一定角度的偏移^[6],此时在测斜数据的监测计算过程中需要将初始偏移角以及钻井偏移角度等进行累计计算^[7]。在测斜仪架放置于测斜管中后,稳定输出的监测数值记为初始稳定状态,按照钻井发生倾斜变形后的稳定状态时静态测斜三维投影关系如图1所示:

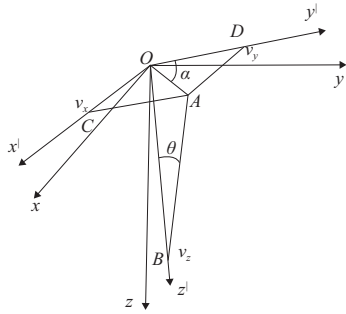


图1 井斜静态测斜投影

监测钻井未发生倾斜时测斜仪加速度计的测量坐标系 $O-xyz$, 即为大地坐标系, 其中 xOy 为水平面, z 轴正方向为井深方向。 $O-x^1y^1z^1$ 坐标系为钻井发生倾斜时加速度计的测量坐标系, z^1 轴方向为倾斜后的井深方向。 v_x 、 v_y 以及 v_z 分别为重力加速度在 x^1 轴、 y^1 轴以及 z^1 轴上的投影分量作用下对应的输出电压, 其中 v_x 和 v_y 作为加速度计测量时的输出信号, AB 在 $O-x^1y^1z^1$ 上沿重力方向投影 OA 为重力高边, OA 与 y^1 轴正方向夹角 α 为井斜相对方位角, 关系如下

$$\begin{cases} \phi = \sin^{-1} \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_g} = \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \theta_x + \sin^2 \theta_y} \\ \alpha = \sin^{-1} \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} = \sin^{-1} \frac{\sin \theta_x}{\sqrt{\sin^2 \theta_x + \sin^2 \theta_y}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_x 、 θ_y 分别为 x 轴、 y 轴与水平面的夹角; ϕ 为井斜角, 即初始偏移角; α 为方位角。

在安装测斜仪时实际坐标系 $O-x_1y_1z_1$, 可以记作理想初始坐标系 $O-xyz$ 在某方向上旋转一定角度之后得到的坐标系。若在测斜设备安装后钻井未发生角度变化, 则两坐标系可以由以下两种方式转换: 1) 初始坐标系 $O-xyz$ 绕 y 轴顺时针旋转 γ° , 得到坐标系 $O-x^1y^1z^1$, 其中 y 轴与 y^1 轴重合。 2) $O-x^1y^1z^1$ 坐标系绕 x^1 轴顺时针旋转 β° , 得

到坐标系 $O-x_1y_1z_1$, 其中 x_1 轴与 x^1 轴重合。坐标系之间的转换原理如图2所示。

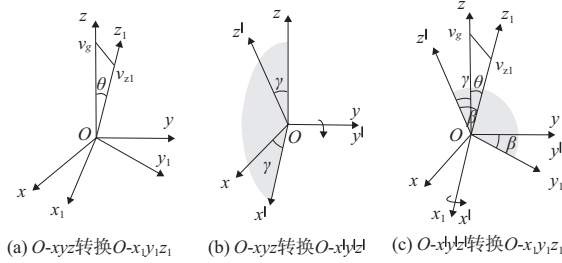


图2 测斜仪安装坐标系转换示意图

其中 $O-x_1y_1z_1$ 是由 $O-xyz$ 坐标系经过两次旋转得到, 则有以下关系

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 v_x 、 v_y 和 v_z 以及 v_{x1} 、 v_{y1} 和 v_{z1} 分别为同一个点在 $O-xyz$ 坐标系以及 $O-x_1y_1z_1$ 坐标系中各轴的坐标, 与重力矢量的关系如下

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma \\ -\sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} v_g$$

其在 $O-x_1y_1z_1$ 坐标系中各轴的投影为

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_{x1} \\ \sin \theta_{y1} \\ \cos (90^\circ - \theta_{z1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma \\ -\sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

当测斜仪设备放入测斜管中, 初始状态为铅垂水平面时可以得出

$$\begin{cases} \cos \theta = \cos (90^\circ - \theta_{z1}) = \cos \beta \cos \gamma \\ \theta = \cos^{-1} (\cos \beta \cos \gamma) = \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \theta_{x1} + \sin^2 \theta_{y1}} \end{cases} \quad (4)$$

设幅值为 v_g 的重力矢量 G 与坐标系 $O-xyz$ 中 z 轴的夹角, 即真实井斜角记为 ϕ , 由测斜仪设备实际所测得的井斜角为 ϕ_1 , 如图3所示。

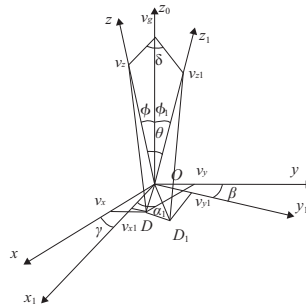


图3 井斜角真实值与实际测量值坐标转换

其中 v_x 、 v_y 、 v_z 以及 v_{x1} 、 v_{y1} 、 v_{z1} 分别为重力矢量 G 在坐标系 $O-xyz$ 、 $O-x_1y_1z_1$ 上的投影分量。

2 三维坐标数据转换

工程应用与导航定位研究中最常用的大地坐标系为 WGS-84 坐标系^[8], 原点为地球质心, z 轴指向协议地球北极方向, x 轴指向零子午面与 CTP 赤道的交点, y 轴为右手系。其规定长半轴 a 取 6 378 137 m, 短半轴 b 取 6 356 752.314 245 m 进行计算。 e^2 为椭球的第一偏心率, N 为椭圆曲率半径, 计算公式如下

$$\begin{cases} e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \end{cases} \quad (5)$$

大地坐标系坐标原点为地心, z 轴与地球自转轴重合, x 轴方向为格林尼治子午面与赤道的交点, y 轴为右手系食指方向。该坐标系随地球自转而转动。大地坐标系转换直角投影坐标原理如图 4 所示。

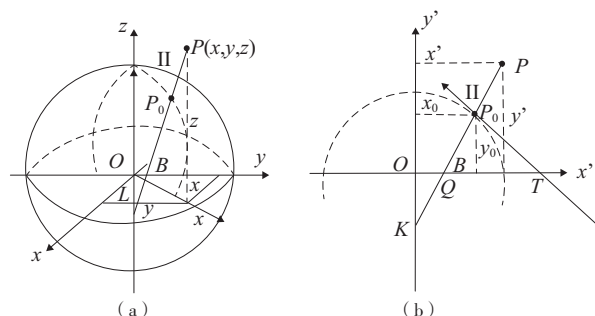


图 4 大地坐标系坐标转换投影坐标

其中以点 P 纬度、经度以及大地高 3 个信息组成大地坐标集合 (B, L, H) 转换为空间直角坐标 (x, y, z) , 首先求出 P 点与经纬度的关系

$$\begin{cases} x = (N+H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ y = (N+H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ z = [N(1-e^2) + H] \cdot \sin B \end{cases} \quad (6)$$

其次求得子午线平面坐标 (x', y') 在大地坐标系中的坐标 (x, y, z)

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos L \\ y = x' \cdot \sin L \\ z = y' \end{cases}$$

在平面 $O-x'y'$ 内的坐标

$$\begin{cases} x' = PK \cdot \cos B \cdot \cos L \\ y' = PQ \cdot \sin B \cdot \sin L \end{cases}$$

式中

$$\begin{cases} PK = N+H \\ PQ = [N(1-e^2) + H] \end{cases} \quad (9)$$

通过以上公式即可得出 GNSS 接收机监测所得参考 WGS-84 坐标系下的三维大地空间坐标转换为高斯克吕格投影空间直角坐标, 以便在后续数据处理以及可视化阶段更加直观地显示设备的点位变化状况。

3 协同监测融合分析

将测斜管进行连接固定架设, 使用铅垂对中装置使得测斜管位于初始铅垂状态并稳定。放置测斜仪, 且在测斜仪顶端固定连接 GNSS 设备进行监测。

将测斜管初始偏移角度 3° 并进行固定, 使用测斜仪进行多次单点测量, 并在监测期间以测斜管轴心旋转, 使测斜仪的初始参考测量轴发生一定的角度偏移。分别使用原始测斜仪累计位移计算方法, 以及使用初始偏移角与参考坐标轴的转换累加计算方法, 进行测斜仪监测数据的计算分析。并将两种计算方法得出的数值与测斜仪偏移量的真实测量值进行对比, 如图 5 所示。

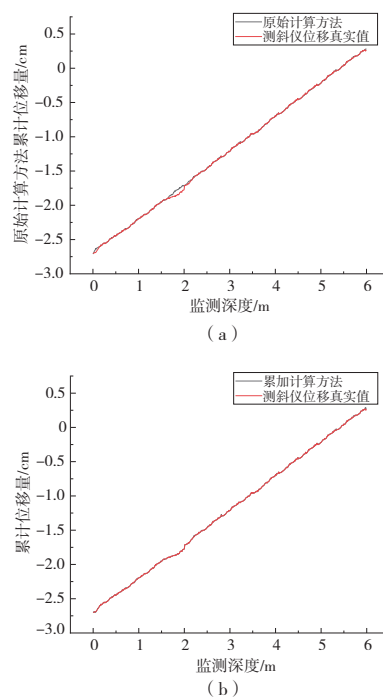


图 5 累加偏移角度方法前后与真实值对比

得出测斜仪偏移角度转换位移量的监测数值, 通过原始计算方法对比真实值的平均相对误差为 0.343%; 通过角度累加与坐标转换角度累加计算方法, 对比真实值的平均相对误差为 0.058%。结果表明通过角度累加的计算方法明

显优于原始直接计算方式,能够极大地减小测量数据的误差。

监测期间 GNSS 设备根据其稳定初始监测点处开始连续监测并将监测大地坐标系的 BLH 点位转换为高斯克吕格投影坐标后的 xyz 分别代表其东向、北向以及高程的三轴位移数据,其空间相对变形移动轨迹如图 6 所示,三轴相对变形位移变化如图 7 所示。

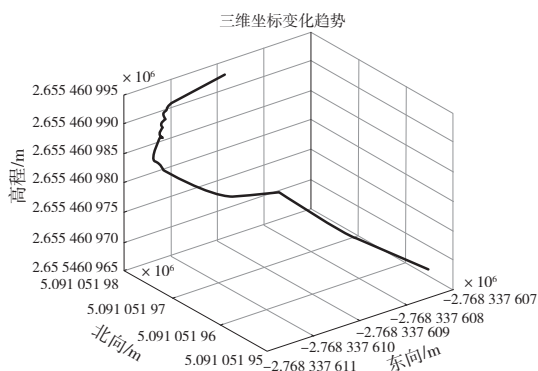


图6 三维坐标监测变形轨迹

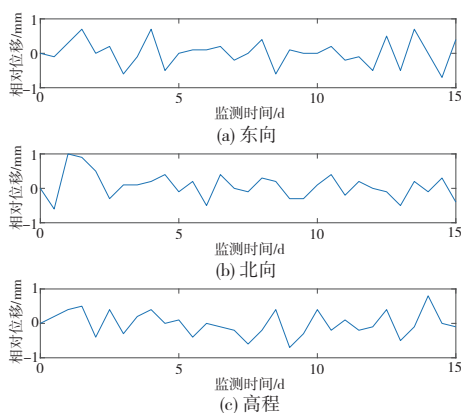


图7 三分向相对位移变化

由 GNSS 监测数据以及测斜仪累计合位移、偏移角度等进行数据融合分析,得出每一时间点处的测斜仪测量传感器探头的绝对以及相对三维点位坐标,并由此可以判断出测斜仪在边坡深部的三维点位坐标,从而推算得出边坡深部土体的变化移动趋势。与分开未使用累加偏移角度计算方法的测斜仪监测滑坡深部位移,以及由底部推算至顶部的计算方法监测对比,绘制出监测点位的顶部、中部以及底部的相对坐标位移变化可视化效果图。两监测计算方案数据对比如图 8 所示。

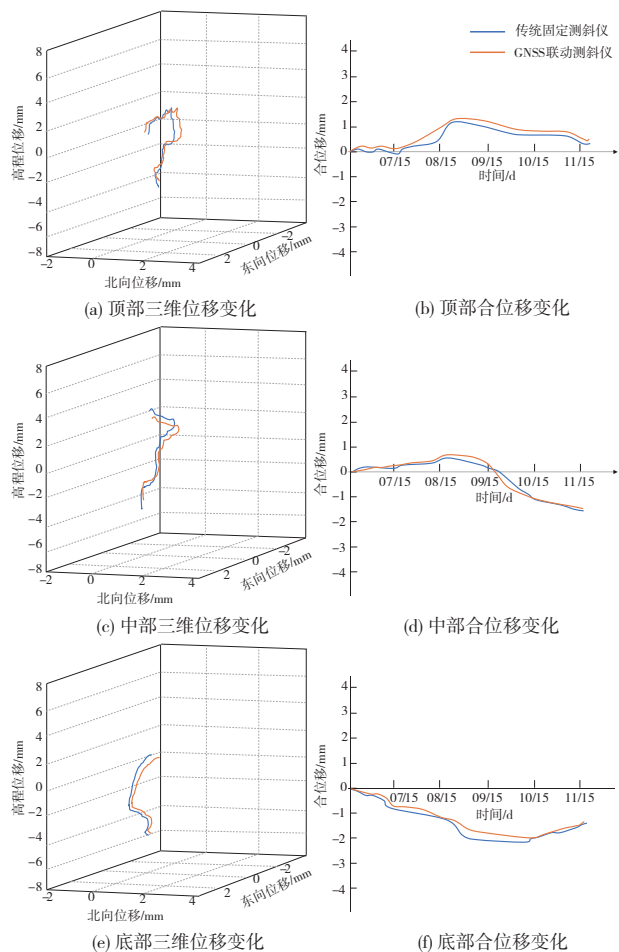


图8 两监测计算方案数据对比

4 结语

本文针对使用测斜仪监测滑坡深部变形中,以往研究对初始偏移角以及监测过程中参考轴发生变化的忽略,所造成的测量精度不高;以及单一设备对深部三维信息缺失等问题,提出了一种在测斜仪架设及监测过程中累加偏移角度的计算方法。

参考文献:

- [1] 王义锋. 基于测斜仪监测成果的蠕滑体变形机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 212-216.
- [2] 蔡文军, 李建德, 刘涛, 等. 机械式无线随钻测斜仪改进与应用[J]. 石油机械, 2012, 40(2): 63-66, 100.
- [3] LEBOURG T, BINET S, TRIC E, et al. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a deep seated landslide[J]. Terra Nova, 2005, 17(5): 399-406.

(下转第 223 页)

续表 1		表 1 不同算法性能对比			
算法	运行 时间/s	算法 参数量	召回 率/%	IoU	每秒 帧数/帧
YOLOv5+ 注意力机制	4.32	2 875	91.25	0.76	1 157
YOLOv5+ 深度神经网络	4.12	2 453	91.58	0.79	1 214
本文算法	3.87	1 865	92.36	0.82	1 292

从表 1 中可以看出,在运行时间对比中,本文算法的运行时间更短只有 3.87 s。相较于 YOLOv4 算法其运行时间缩短了 1.49 s。同时本文算法的算法参数量最少只有 1 865。但其召回率和 IoU 值都相对较高,分别达到 92.36%和0.82。本文算法相较于 YOLOv4 算法其召回率提升了 3.74个百分点,IoU 值提升了 0.14。由此可见本文算法的性能更好,在加入不同模块后其性能有明显的提升。

4 结语

研究针对当前城市轨道交通接触网设备巡检中,巡检效果不佳、对设备损伤识别准确率不高等问题。研究提出了一种基于深度神经网络和 YOLOv5 算法的智能巡检系统。研究结果表明,在不同的算法对比中,本文算法的识别准确率最高,相比于 YOLOv4 和 YOLOv5 算法其识别准确率分别提升了 5.13 个百分点和 3.42 个百分点。同时在算法的精确率对比中,本文算法的精确率分别高于 YOLOv4 和 YOLOv5 算法 3.80 个百分点和 1.12 个百分点。在算法指标性能对比中,本文算法的运行时间更短,算法参数量更少。由此可见,本文算法在算法性能指标对比中具有更好的算法性能,这说明使用新系统能够更好地对接触网设备进行巡检。研究虽然取得了一些成果但还

存在一些不足,因此在后续研究中,研究还应该对不同领域的接触网情况进行测试分析。

参考文献:

[1] 宋佳明,占栋,陈唐龙. 接触网巡检系统空间综合定位方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 116-121.

[2] PARLAK B O, YAVASOGLU H A. A comprehensive analysis of in-line inspection tools and technologies for steel oil and gas pipelines[J]. Sustainability, 2023, 15(3):2783.

[3] 刘杰,许建国,高春丽,等. 基于机器视觉的接触网吊弦缺陷检测研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5): 91-97.

[4] 魏秀琨,所达,魏德华,等. 机器视觉在轨道交通系统状态检测中的应用综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(2):257-282.

[5] 李宗荫,郭迎庆,郭子杰,等. 铁路接触网振动频率检测控制系统设计[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(4): 762-770.

[6] 石颖. 地铁车辆弓网监控系统的构成与主要技术[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2):106-108.

[7] 姚冬,陈东生,陶凯,等. 高速铁路基础设施综合检测监测技术探讨[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3): 42-48.

[8] 刘东海,马子茹,黄斌,等. 基于无人机巡检与深度学习的河道整治施工进度图像识别[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(4):92-100, 110.

[9] 姜凌霄,高宝明,段雨松. 基于 YOLOv5 神经网络模型的变电所压板开关状态的识别方法[J]. 煤炭工程, 2024, 56(7):181-186.

[10] 王磊,郝涌汀,潘明然,等. 电力巡检中改进 YOLOv5s 的缺陷检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(10):256-265.

收稿日期:2024-10-11

(上接第 208 页)

[4] WANG K L, LIN J T, CHU H K, et al. High-resolution LiDAR digital elevation model referenced landslide slide observation with differential interferometric radar, GNSS, and underground measurements[J]. Applied Sciences, 2021, 11(23):11389.

[5] LIU Z P, BOONEN P, MUNSELL S, et al. Improved Borehole Image Dip Calculation in Irregularly Shaped and Curved Boreholes in High Angle and Horizontal Wells [C]// Proceedings of the SPWLA 51st Annual Logging Symposium. Perth: Society of Petrophysicists and Well-Log

Analysts, 2010: 1-8.

[6] 王凯,郑吉玉,夏威,等. 工作面采动煤体卸压增透效应研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 65-70.

[7] LIU X S, SU Y N. A design method of borehole deviation control scheme[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7):857-863.

[8] 许家琨. 常用大地坐标系的分析比较[J]. 海洋测绘, 2005, 25(6):71-74.

收稿日期:2024-03-04