

融合 DBSCAN 多测点算法的磁方位校正*

许泽凡, 宋红伟, 张明菊, 胡少兵, 陈雪菲, 程为彬

(长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100)

摘要: 单测点校正法计算复杂、不稳定、误差较大, 无法满足井下地磁方位角的精度要求。基于间接单测点分析法和 Brooks 多测点分析法, 提出一种新方法, 通过 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 算法识别并剔除噪声, 采用椭圆校正法校正径向干扰, 轴向干扰则由单轴多测点分析法校正。实验证明: 改进多测点法不仅可以进一步提高椭圆校正的拟合效果, 还能降低噪声对参考点计算值的影响, 计算得到的方差曲线收敛性更强、更稳定, 校正后方位角误差进一步降低。

关键词: 磁方位校正; 多测点分析法; DBSCAN; 椭圆校正

中图分类号: TE29

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2097-1788.2023.02.013

引用格式: 许泽凡, 宋红伟, 张明菊, 等. 融合 DBSCAN 多测点算法的磁方位校正[J]. 网络安全与数据治理, 2023, 42(2): 83-88.

Magnetic azimuth correction based on DBSCAN multi-station analysis algorithm

Xu Zefan, Song Hongwei, Zhang Mingju, Hu Shaobing, Chen Xuefei, Cheng Weibin

(Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, MOE, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: The single-point correction method is complex and unstable with large of errors, which cannot meet the precision requirements of the downhole azimuth. Based on the indirect single measurement point analysis method and the multi-station analysis of Brooks, a new method is proposed to identify and eliminate noise by the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN), and the ellipse correction method is used to correct the radial interference, the axial interference is corrected by the uniaxial multi-station analysis algorithm. Experiments show that improving the multi-station analysis not only further improves the fitting effect of ellipse correction, but also reduces the influence of noise on the calculated value of reference points, making the calculated variance curve more convergent and more stable, and the corrected azimuth error is further reduced.

Key words: magnetic azimuth correction; multi-station analysis method; DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise); ellipse correction

0 引言

实钻轨迹的描述与计算是石油钻井中井眼轨迹监测的重要环节^[1], 也是井眼轨迹控制和调整的基础。目前随钻测量工具以加速度计和磁通门作为姿态传感器, 解算井下钻具姿态信息, 已知加速度计误差校正技术相当成熟, 而井下磁场环境未知、复杂, 磁通门实测数据存在较强的磁干扰, 导致方位角解算误差大, 易造成脱靶、井眼碰撞等问题。

磁场干扰的主要误差来源包括外部磁场、传感

器、底部钻具组合、仪器不居中和测量深度^[2]。Russel 在不考虑径向干扰的情况下, 根据当地地磁场、轴向干扰磁场和实测磁场之间的分量几何关系, 提出 Russel 法校正轴向干扰。罗武胜、徐涛等人对此方法进行详细的验证^[3-4]。Sperry-Sun 公司随之提出间接单测点校正法, 即短钻铤修正法。Van Dongen 在考虑轴向干扰时, 提出旋转钻柱 360° 的方法校正径向干扰。针对这类校正法, 范光第、许昊东等人进行对比验证^[5-6]。刘建光、底青云等人对 Brooks 多测点分析算法进行改进^[7], 通过井眼轨迹函数和剩磁场干扰的函数关系缩小轴向校正值的求解范围。

* 基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2020BAB094)

为降低噪声对磁干扰校正结果的影响,由李海涛将 DBSCAN 算法用于磁罗盘校正的研究^[8],得出一种融合 DBSCAN 多测点算法的磁方位校正法,通过 DBSCAN 算法剔除噪点,根据椭圆校正原理校正径向干扰,采用单轴多测点分析法校正轴向干扰。校正结果表明,方位角误差有所减小。

1 方位解算

1.1 方位姿态模型

根据“北-西-天”地理坐标系和仪器坐标系的对应关系,通过欧拉旋转^[9],将仪器坐标系下得到的信息经姿态矩阵换算到地理坐标系中,即可得到最终的钻具姿态信息,如图 1 所示。

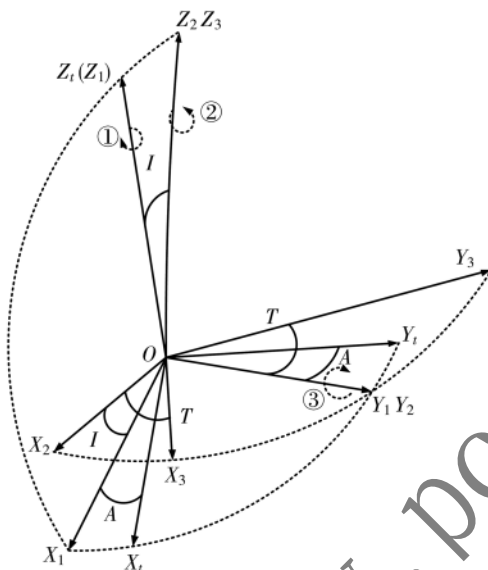


图 1 欧拉旋转坐标图

图 1 的坐标系转换过程可用公式表示如下^[9]:

$$\begin{bmatrix} G_x & M_x \\ G_y & M_y \\ G_z & M_z \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} 0 & B_N \\ 0 & B_W \\ -G & B_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I = \arccos\left(\frac{G_z}{G}\right) \\ T = -\arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \\ A = \arccos\left(\frac{B_S \cos I - M_z}{\sin I \sqrt{B_W^2 + B_N^2}}\right) - \arctan\left(\frac{B_W}{B_N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 、 I 、 T 分别为方位角、井斜角、工具面角, G 取当地重力加速度, B_N 、 B_W 和 B_S 分别为地磁场在地理北、西、天方向的分量, G_x 、 G_y 、 G_z 和 M_x 、 M_y 、 M_z 分别表示实测加速度信号分量和磁通门信号分量。

1.2 多测点方位校正

根据 Brooks 多测点分析算法^[10]基本原理: 设一组测点内共有 N 个点, B_{xi} 、 B_{yi} 、 B_{zi} 和 G_{xi} 、 G_{yi} 、 G_{zi} 表示分别是第 i 个测点处的磁场和加速度实测值, $B_{x\text{corri}}$ 、 $B_{y\text{corri}}$ 、 $B_{z\text{corri}}$ 和 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别是该测点处校正后的磁场值和 X 、 Y 、 Z 轴的干扰校正值, $B_{V\text{corri}}$ 和 $B_{N\text{corri}}$ 则是地磁场的垂直和水平分量。由式(6)可知, 当方差 V 最小时, ε_x 、 ε_y 和 ε_z 即为此时的磁场干扰真

实值。其中 $B_{V0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_{V\text{corri}}$, $B_{N0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_{N\text{corri}}$ 。相关公式如下:

$$\begin{cases} B_{x\text{corri}} = B_{xi} - \varepsilon_x \\ B_{y\text{corri}} = B_{yi} - \varepsilon_y \\ B_{z\text{corri}} = B_{zi} - \varepsilon_z \end{cases} \quad (3)$$

$$B_{V\text{corri}} = \frac{B_{x\text{corri}} G_{xi} + B_{y\text{corri}} G_{yi} + B_{z\text{corri}} G_{zi}}{\sqrt{G_{xi}^2 + G_{yi}^2 + G_{zi}^2}} \quad (4)$$

$$B_{N\text{corri}} = \sqrt{B_{x\text{corri}}^2 + B_{y\text{corri}}^2 + B_{z\text{corri}}^2 - B_{V\text{corri}}^2} \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(B_{N\text{corri}} - B_{N0})^2 + (B_{V\text{corri}} - B_{V0})^2] \quad (6)$$

2 磁场干扰的 DBSCAN 多测点校正

Brooks 多测点分析法(MSA)主要采用多个测点同时进行磁干扰校正,来减少实际校正过程中的偶然性误差,但忽略了异常数据对校正精度的影响。为解决该问题,将磁干扰分为径向干扰(X 轴和 Y 轴)和轴向干扰(Z 轴)两个部分逐一校正。先采用 DBSCAN 算法识别并剔除异常数据,再根据椭圆校正法校正径向干扰,最后通过单轴多测点分析法校正轴向干扰。

2.1 DBSCAN 算法

DBSCAN^[11]是一种基于密度的聚类算法,不仅能从样本分布密度的角度去判定样本集中各种形状的簇,还能在簇的总量未知时,完成样本集中的各个簇的分类及噪声的识别。

DBSCAN 算法流程如下^[12]:

输入: 样本集, 邻域参数(Eps, MinPts)。

(1)初始化参数: 将样本集中的所有对象设为噪声和未访问。

(2)从样本集中任选一个未被访问的核心对象,以其作为起始对象建立一个新簇,递归地找出所有对应的密度可达的对象,加入到此簇中,并标记为已访问对象。

(3)直到所有对象被访问,输出聚类结果,算法结束,否则转步骤(2)。

输出:所有划分的簇。

2.2 椭圆校正磁场径向干扰

无磁干扰下,若将 X 、 Y 轴数据置于一个平面直角坐标系中,其形状为一个圆心在原点且半径为地磁场水平分量大小的圆;反之,近似于一个中心偏移的椭圆。与 Van Dongen 的磁场径向干扰理论一致:当不存在径向磁干扰时, $B_x^2 + B_y^2 = \text{const}$ 这一关系式成立;当径向磁干扰存在且固定,则满足关系式 $(B_x - M_x)^2 + (B_y - M_y)^2 = \text{const}$ 。

径向磁场干扰由椭圆校正法^[13]处理,该原理相关公式如下:

$$\begin{cases} x_f = \max \left(1, \frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{B_{x\max} - B_{x\min}} \right) \\ x_{\text{off}} = \frac{B_{x\max} - B_{x\min}}{2} - B_{x\max} x_f \\ B_{x\text{corr}} = B_x x_f + x_{\text{off}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} y_f = \max \left(1, \frac{B_{x\max} - B_{x\min}}{B_{y\max} - B_{y\min}} \right) \\ y_{\text{off}} = \frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{2} - B_{y\max} y_f \\ B_{y\text{corr}} = B_y y_f + y_{\text{off}} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 单轴多测点校正磁场轴向干扰

改进 Brooks 多测点分析法,即仅考虑轴向干扰,则只需求解 Z 轴磁场校正值。设有 8 个测点,点 O 为参考点,线上各点分别表示取值不同时的实测磁场强度。从图 2 中可看出,当第三次变化时 V 的值最小,即表明第三次的取值更加接近于真实的轴向干扰强度。

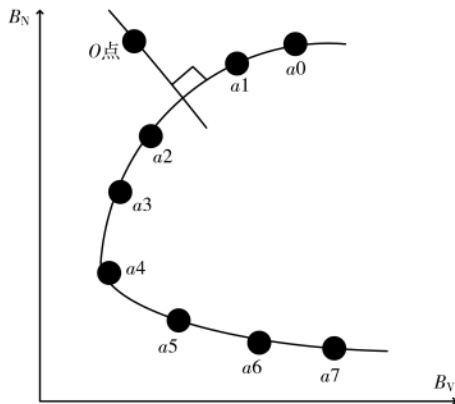


图 2 单轴多测点校正法原理图

单轴多测点分析法相关定义如下:

(1)第 i 个测点处的轴向磁通门信号的垂直分量和水平分量参考式(4)和式(5)。

(2)这 N 个测点所测磁场与参考点磁场 (B_{N0}, B_{V0}) 的方差公式参考式(6)。

(3)根据式(3)~式(6),结合单轴多测点分析法原理可得:

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_z} = \sum_{i=1}^N \left[(B_{Ni} - B_{N0}) \left(\frac{\partial B_{Ni}}{\partial \varepsilon_z} - \frac{\partial B_{N0}}{\partial \varepsilon_z} \right) + (B_{Vi} - B_{V0}) \left(\frac{\partial B_{Vi}}{\partial \varepsilon_z} - \frac{\partial B_{V0}}{\partial \varepsilon_z} \right) \right] = 0 \quad (9)$$

由式(9)求解轴向磁场校正值 ε_z 。

3 校正实验及结果分析

3.1 方案设计

根据融合 DBSCAN 算法后的多测点校正法原理,编写计算机程序,并设计实验方案。

实验时,设置对照组(有无磁干扰),相对距离设为 1 m,并斜角设为 90° ,相对方位为 30° 、 60° 、 120° 、 150° 、 210° 、 240° 、 300° 和 330° ,工具面角从 0° 开始,依次旋转 5° 直至 360° 。磁性套管与测斜仪传感器轴心位置的距离称为相对距离,磁性套管与测斜仪传感器轴心连线与磁极北的夹角称为相对方位,如图 3 所示。

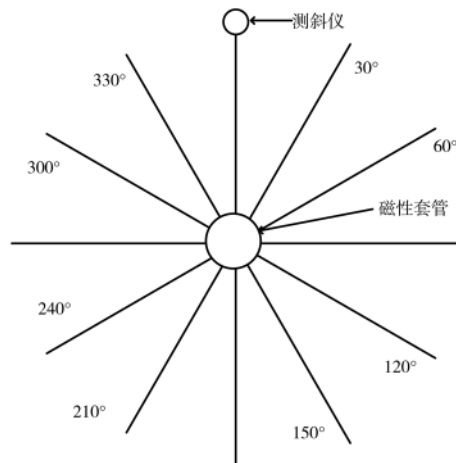


图 3 实验布置原理图

实验装置主要包括:磁性套管(长 3 m、直径 150 mm)、木制套管放置架(避免对地磁场干扰)、测斜仪、数据采集仪和电源等,如图 4 所示。

数据采集过程中,并斜角不变,选定相对方位,工具面角范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,每个测点重复采集 8 次,



图 4 实验器材放置图

由数据采集仪存储并导出。实验结束后,从四个象限各取一个对照组数据,去分析验证剔除异常数据是否能提高方位校正精度。

3.2 过程分析

3.2.1 DBSCAN 处理

现取方位角 A (60° 、 150° 、 240° 和 330°) 进行分析,并以此为例。

预处理过程中,将磁力仪的 X 轴和 Y 轴原始数据导入得 72 个 Clusters, 噪点(标记为“-1”), 然后删除原始数据(加速度计所测数据操作相同)中的噪点数据,保存正常数据。该处理过程中的重要参数以图 5 为例,处理前后的对比图见图 6。

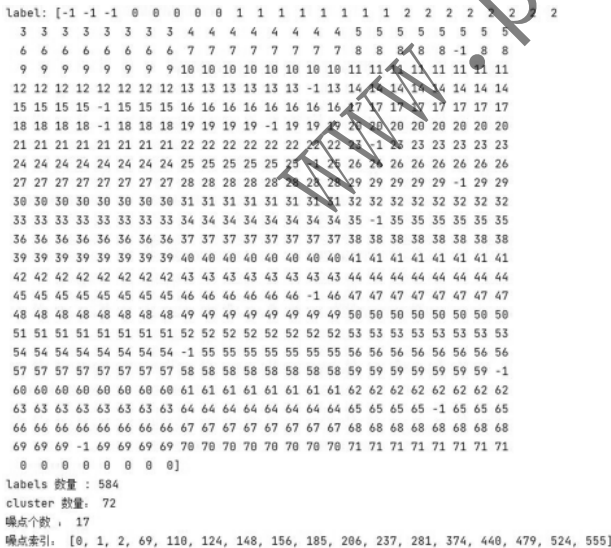


图 5 重要参数图

3.2.2 径向干扰校正

预处理结束后,将所得的磁力仪(X 轴和 Y 轴)

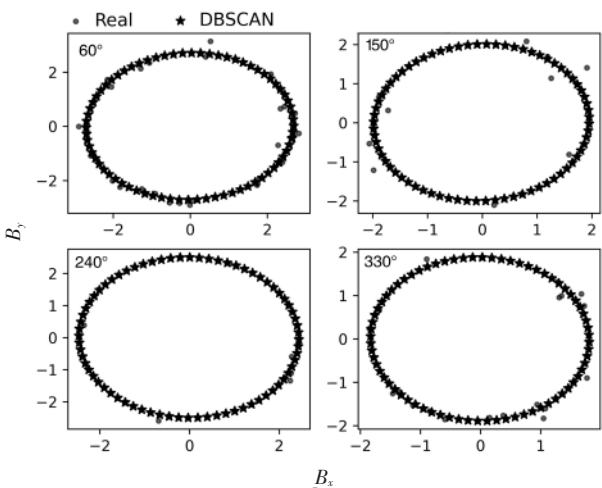


图 6 预处理效果图(方位角分别为 60° 、 150° 、 240° 和 330°)

正常数据和原始数据分开进行椭圆校正,如图 7 所示。分析可知,通过剔除噪点解决偏离问题后,校正图形更加趋近于一个平滑的圆。说明校正前的磁力仪(X 轴和 Y 轴)数据仍存在极小的径向磁干扰,不可忽略,且噪点的剔除使得拟合效果明显提高。

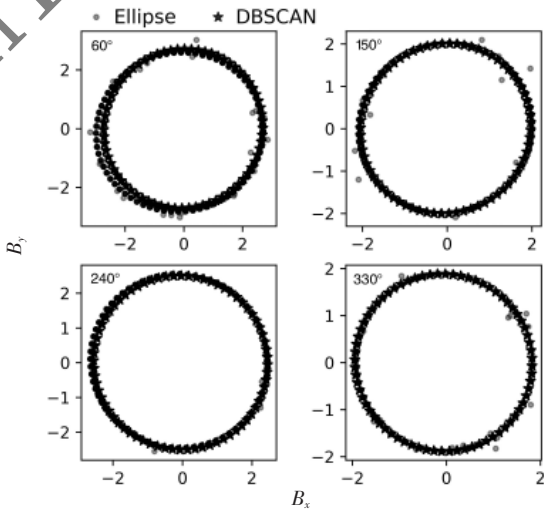


图 7 径向校正图(方位角分别为 60° 、 150° 、 240° 和 330°)

3.2.3 轴向干扰校正

同样,对所得的磁力仪(Z 轴)正常数据和原始数据分开进行单轴多测点校正。

(1)对比中间值——方差,发现剔除噪点后,方差值散点图收敛性更强,如图 8 所示。

(2)根据式(9)计算轴向磁场校正值,并保存校正后的 Z 轴数据。

(3)将校正后的 X 、 Y 、 Z 轴数据代入式(2)和式(3)

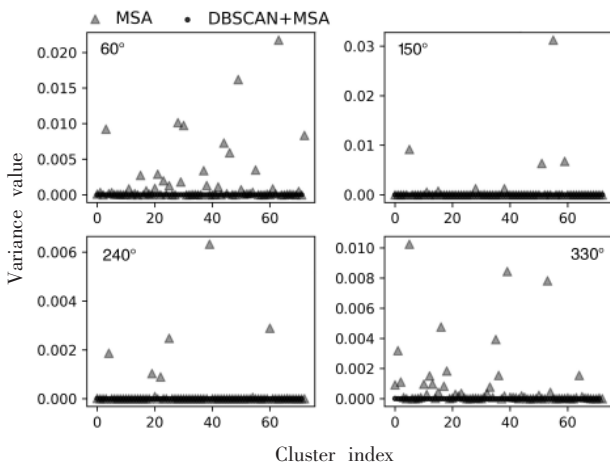


图 8 方差值散点图(方位角分别为 60°、150°、240°和 330°)

解算方位角,各种情况下的方位角曲线对比图如图 9 所示,方位角误差值如表 1 所示。

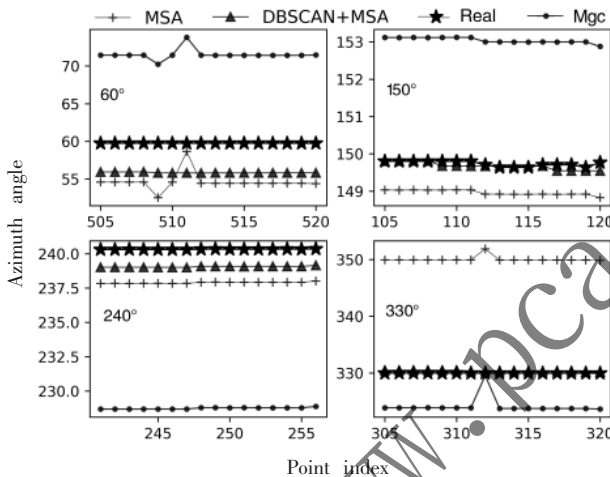


图 9 方位角曲线对比图(方位角分别为 60°、150°、240°和 330°)

表 1 方位角误差值

真实方位角	实测(磁干扰)误差值	多测点改进前误差值	多测点改进后误差值
60	-11.767 82	5.127 95	3.899 15
150	-3.311 25	0.772 51	0.058 69
240	-11.578 61	-2.431 73	-1.269 59
330	-0.581 808	20.077 1	0.403 39

分析可知,对比曲线“Real”“Mgc”和“MSA”证明,多测点分析法(改进前)能够校正磁干扰,但校正结果易受到异常点影响;而将曲线“MSA”和“DBSCAN+MSA”对比发现,多测点分析法(改进后)明显减小误差。如,当真实方位角为 330°时,未消

除噪点,校正误差反而变大;反之,校正误差缩小。

3.3 实验总结

本次实验过程中环境因素局限大,测斜仪传感器所受到的磁干扰综合影响不可控,校正误差无法完全消除。结合上述分析可知,使用 DBSCAN 算法预处理导入数据时,不仅能将其分类成为 72 个 Clusters,还可以识别出 17 个噪点数据(参考图 5)。继而提高径向校正效果,并降低异常数据对求解磁场校正值的影响,使得轴向磁干扰校正值更加接近于真实干扰值,校正误差进一步减小。

4 结论

DBSCAN 算法可对数据标签分类,并标识数据中的噪点。剔除实测数据中的噪点后,径向校正结果更加趋近于一个规则的圆形,轴向校正值更加接近于真实干扰值。改进后的多测点分析法进一步提高井下方位角的磁校正精度,同时计算过程中数据量大,耗时长。

参考文献

- [1] 刘飞,陈栋,孔瑞江.定向井井眼轨迹控制与造斜段施工技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(6):191-192.
- [2] WILLIAMSON H S.Accuracy prediction for directional measurement while drilling[R].SPE 67616,2000.
- [3] 罗武胜,徐涛,杜列波.基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正[J].国防科技大学学报,2007,29(1):106-110.
- [4] 徐涛,温东,孔晓磊.基于加速度计和磁强计的方位测量与校正技术研究[J].仪器仪表学报,2009,30(10):2018-2022.
- [5] 范光第,蒲文学,赵国山,等.磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法[J].石油钻探技术,2017,45(4):121-126.
- [6] 许昊东,黄根炉,程锋瑞,等.磁力随钻测量磁干扰校正方法[J].石油钻探技术,2014,42(2):102-106.
- [7] 刘建光,底青云,张文秀.基于多测点分析法的水平井高精度磁方位校正方法[J].石地球物理学报,2019,62(7):2759-2766.
- [8] 李海涛.基于 DBSCAN 的椭圆拟合算法的磁罗盘校正[J].电子测量技术,2019,42(18):65-68.
- [9] 张旭亮.导向钻井工具欧拉角姿态方程数值解方法研究[D].西安:西安石油大学,2021.
- [10] BROOKS A G,GURDEN P A,NOY K A.Practical application of a multiple-survey magnetic correction

algorithm[J].The SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1998; SPE-49060-MS.

- [11] 胡淼淼,刘宏志,张铎.DBSCAN 算法优化及其在 GSM-R 铁塔监测系统中的应用[J].计算机应用与软件,2018,35(5):308-312,333.
- [12] 张巧.基于自适应的 DBSCAN 的雷达数据处理算法研究与应用[D].成都:四川大学,2021.
- [13] 许昊东.井眼轨迹校正方法及误差椭圆计算[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.

(收稿日期:2022-12-29)

作者简介:

许泽凡(1998-),女,硕士研究生,主要研究方向:井下姿态角解算与校正。

宋红伟(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向:生产测井数据处理及解释。

程为彬(1970-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:油气井下智能测控技术。E-mail:wbcheng@yangtzeu.edu.cn。

(上接第 82 页)

- [18] QIU Z, YAO T, MEI T. Learning spatio-temporal representation with pseudo-3D residual networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 5533-5541.
- [19] HARA K, KATAOKA H, SATOH Y. Learning spatio-temporal features with 3D residual networks for action recognition[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 2017: 3154-3160.
- [20] DONG M, FANG Z, LI Y, et al. AR3D: attention residual 3D network for human action recognition[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1656.
- [21] YANG G, YANG Y, LU Z, et al. STA-TSN: spatial-temporal attention temporal segment network for action recognition in video[J]. PloS One, 2022, 17(3): e0265115.

- [22] 陈莹,龚苏明.改进通道注意力机制下的动作识别网络[J].电子与信息学报,2021,43(12):3538-3545.

- [23] LI Y, SONG S, LI Y, et al. Temporal bilinear networks for video action recognition[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, 33(1): 8674-8681.

- [24] DE SOUZA B A, VIEIRA M B, VILLELA S M, et al. Weighted voting of multi-stream convolutional neural networks for video-based action recognition using optical flow rhythms[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2021, 77: 103112.

(收稿日期:2022-12-27)

作者简介:

冯雨威(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机视觉。

吴丽君(1984-),女,博士,副教授,主要研究方向:计算机视觉、机器学习、智能信号处理等。



版权声明

凡《网络安全与数据治理》录用的文章，如作者没有关于汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权等版权的特殊声明，即视作该文章署名作者同意将该文章的汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权授予本刊，本刊有权授权本刊合作数据库、合作媒体等合作伙伴使用。同时，本刊支付的稿酬已包含上述使用的费用，特此声明。

《网络安全与数据治理》编辑部

www.pcachina.com