

基于工程参数变化趋势异常诊断的卡钻 实时预警方法

胜亚楠

(中石化中原石油工程有限公司钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 川南工区是中石化重点页岩气勘探开发工区, 该工区地层压力系数高、钻井地质条件苛刻, 导致该工区钻井复杂、故障频发, 其中卡钻故障最为突出, 严重制约了川南页岩气的安全高效开发。现有卡钻识别技术存在监控信息综合利用能力差、风险预警不及时、主观性强等问题。本文通过分析钻井作业过程中卡钻故障的专家知识判断, 确定了卡钻风险对应的关键表征参数, 并研究了卡钻发生位点的关键表征参数的变化趋势, 得到了相应的变化规律; 在此基础上建立了基于工程参数变化趋势异常诊断的卡钻实时预警方法。选取 WY-XX 井为实例进行分析, 软件预警结果与实际井下风险相吻合, 验证了模型的准确性和可靠性, 准确率达 83%。

关键词: 页岩气勘探开发; 卡钻; 风险预警; 实时预警; VDX 钻井参数仪; 川南工区

中图分类号: TE28; P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0068-07

Real-time early warning of pipe sticking based on abnormal diagnosis of engineering parameter change trend

SHENG Yanan

(Drilling Engineering and Technology Research Institute, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd.,
SINOPEC, Puyang Henan 457001, China)

Abstract: South Sichuan work area is a key shale gas exploration and development area of Sinopec. The high formation pressure coefficient and harsh drilling geological conditions in this work area lead to complex drilling and frequent failures, among which sticking fault is the most prominent which seriously restricts the safe and efficient development of shale gas in South Sichuan. There are some problems in the existing technology, such as poor comprehensive utilization of monitoring information, not timely risk warning and strong subjectivity. In this paper, through the analysis of the expert knowledge judgment of sticking fault in the drilling process, the key characterization parameters corresponding to the risk of sticking are determined, the change trend of the key characterization parameters at the location of sticking is studied and the corresponding change rules are obtained. On this basis, a real-time early warning method for sticking fault based on abnormal diagnosis of engineering parameter change trend is established. Well WY-XX is selected as an example for analysis, as a result, the warning results by this software is consistent with the actual downhole risk which verified the correctness and reliability of the model with the success rate of 83%.

Key words: shale gas exploration and development; sticking; risk early warning; real-time warning; VDX parameter

收稿日期: 2023-06-16; **修回日期:** 2023-08-22 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2024.01.009

基金项目: 中石化中原石油工程有限公司项目“井下工程参数采集及随钻传输系统研制”(编号: 2023101)、“基于 VDX 实时数据的井下风险监控及预警系统研制”(编号: 2021112); 中石化中原石油工程有限公司博士后课题“川南页岩气钻井工程风险评估与预警技术研究”(编号: 2020116B)

作者简介: 胜亚楠, 男, 汉族, 1989 年生, 副研究员, 钻井工程专业, 博士, 主要从事钻井工程风险评价、井身结构优化设计和油气井井下信息控制等方面的研究工作, 河南省濮阳市华龙区中原东路 462 号, shengyanan_upc@163.com。

引用格式: 胜亚楠. 基于工程参数变化趋势异常诊断的卡钻实时预警方法[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 68-74.

SHENG Yanan. Real-time early warning of pipe sticking based on abnormal diagnosis of engineering parameter change trend[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 68-74.

instrument; South Sichuan work area

0 引言

近年来,中国石化加快了页岩气资源的勘探开发,并在川渝地区取得了重大突破,其中川南工区是我国页岩气资源最为丰富、最具开发潜力的地区之一。该工区地质环境复杂苛刻、施工工艺尚未配套,导致钻井复杂、故障频发,其中卡钻故障最为突出,占复杂、故障总时效的47.48%,严重制约了页岩气安全高效开发。目前解决此类问题最有效的方法是对钻井过程中的卡钻风险进行准确预测分析,并及时采取风险规避措施,避免卡钻故障的发生。国内外学者对于卡钻的预测进行了长期的研究,卡钻预警方法多以区域井统计分析和基于传统钻井物理模型为主。对于前者来说,需要收集大量区域井资料和数据,通过对卡钻原因和过程进行分析,然后利用人工神经网络、模糊数学、层次分析法等方法建立卡钻预测模型^[1-3]。该类方法受限于数据难以准确获取,同时收集到的数据往往具有区域独特性,这就使得通过该类方法建立的模型难以推广到其他区域,不具有普适性。对于后一类方法来说,需要进行摩阻扭矩的精确计算才能实现异常的有效监测;但是传统钻井物理模型计算需要大量数据并且难以实时更新计算结果,这就限制了该类方法异常判断的实时性^[4-9]。目前钻井现场的卡钻故障识别仍然是依靠司钻和技术人员,以个人经验进行异常判断,缺乏配套软件,降低了风险识别的准确度和效率。现有卡钻识别技术存在监控信息综合利用能力差、风险

预警不够及时、主观性太强等问题较为突出。本文通过分析钻井作业过程中卡钻故障的专家知识判断,确定了卡钻风险对应的关键表征参数,并研究了卡钻发生位点的关键表征参数的变化趋势,得到了相应的变化规律;在此基础上建立了基于工程参数变化趋势异常诊断的卡钻故障实时预警方法,实现了卡钻故障的智能诊断,提高了异常工况的诊断准确率。结合VDX参数仪建立了卡钻故障预警系统,对卡钻故障进行动态辨识与分析,选取已钻井历史复杂故障进行模型验证与完善,实例分析验证了方法的可靠性。本文技术的攻关和应用对于在川南工区深层页岩气钻井降低复杂和故障损失、提高钻井效率具有重要意义。

1 川南页岩气卡钻故障专家知识总结

综合考虑川南工区卡钻故障的特殊性,通过整理分析工区内已钻井历史复杂与故障,总结该区块主要的卡钻故障类型有:沉砂卡钻、掉块卡钻、压差卡钻及泥包卡钻。沉砂卡钻一般发生在排量不足、携砂不及时的严重漏失的井段。掉块卡钻往往发生在存在“大肚子”井眼,在钻进过程中或上提过程中存在掉块卡钻,或者是钻遇破碎带,在定向或上提过程中存在卡钻风险。压差卡钻一般发生在地层造浆、泥岩发育、易缩径地层。泥包卡钻一般发生在堵漏结束后井段和造浆地层、易缩径地层。

川南工区典型卡钻统计数据见表1。

表1 川南工区典型卡钻故障井统计
Table 1 Typical sticking wells in South Sichuan

序号	井号	卡钻井深/m	地层	卡钻位置	主要原因	损失时间/d
1	Z-204H-XX	4727	五峰组	钻头/扶正器	井壁失稳、垮塌	12.58
2	Z2-01H-XX	5094	五峰组	旋转导向	停泵1 min旋导找信号,地层破碎	25.04
3	Z-201H-XX	3907.13/4860/5134	龙马溪、五峰组	钻头/旋导/钻头+螺杆	掉块、井眼轨迹差	9.26/3.19/11.88
4	YS-115H-XX	3108(61.5°)	龙马溪组	旋导扶正器	掉块	4.22
5	W202H-XX	4144	龙马溪组	钻头/扶正器	掉块	0.63
6	W204H-XX	1131	雷口坡组	钻杆	泥浆密度过高、粘卡	2.50
7	WY-24-XX	4937.3	龙马溪组	旋导扶正器	掉块、井眼轨迹差	30
8	L-203H6XX	3000.3	龙马溪组	钻头/扶正器	固井水泥掉块	1.20

由表1可以看出:工区各区域水平段目的层龙马溪组和五峰组均易发生卡钻故障,卡钻发生的主要原因是地层不稳定,直接原因是钻头、扶正器和旋转导向等大尺寸位置在井眼中通过阻力大,停泵、起钻等操作易诱发卡钻发生;卡钻前工况多发生在接单根,上提钻具、倒划眼等钻柱上提过程;掉块卡钻距离井底近(86%发生在立柱第一根),突发概率高、具有“秒杀”特征;沉砂卡钻井底岩屑逐渐积累,具有“推土机”效应。同时可以看出卡钻危害较大,一旦发生卡钻即使成功解卡,亦浪费较长的时间,严重影响生产效率,如果解卡失败,则会造成严重的经济损失。

结合传统专家知识判断方法,对卡钻故障的定性识别方法进行梳理和归纳,这也是进行人工智能风险预测重要的基础工作之一。通过卡钻故障的专家知识判断^[10-11],能够表征卡钻故障的参数有:大钩载荷、泵压、扭矩、机械钻速、转盘转速、钻压。

2 卡钻故障关键表征参数变化规律探究

尽管卡钻故障诱发的原因和卡钻的类型不同,但是在卡钻故障发生以后,最终造成的结果都是钻头或者钻具在井下失去了自由活动的能力,卡钻故障在综合录井的实测数据表现的规律是一致的。从钻井过程中钻进、钻具上下活动等工况下分析故障在发生以后对应井下实测数据发生的变化:在钻进过程中发生卡钻故障后,存在钻时升高、转盘扭矩升高、泵压升高、转速降低等参数变化规律;起钻过程中发生卡钻后,存在大钩负荷升高、扭矩升高等参数变化规律;在下钻过程中发生卡钻后,存在大钩负荷降低、扭矩升高、转速升高等参数变化规律。

通过研究卡钻发生位点监测数据的关键特征和变化趋势,挖掘卡钻故障发生前后的关键表征参数的变化特点及趋势,剖析参数变化与卡钻的关联性,为后续卡钻预警模型的构建提供依据。

以压差卡钻为例:压差卡钻故障征兆及表征参数变化规律见图1。

3 基于参数变化趋势异常诊断的卡钻预警模型

在对卡钻故障发生前后的工程监测数据的变化特点及趋势进行总结分析的基础上,建立和完善基于专家知识和数据智能算法的风险评估算法,构建卡钻故障识别与诊断模型,对卡钻故障的发生频率

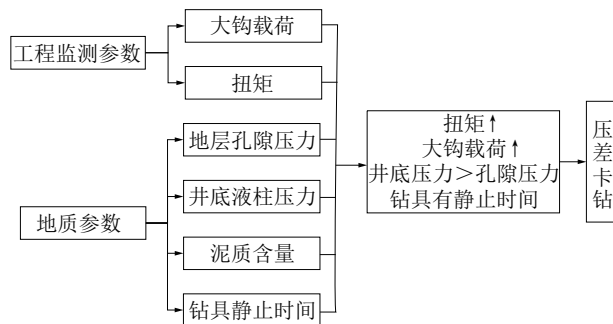


图1 压差卡钻故障征兆及表征参数变化规律

Fig.1 Pressure differential sticking risk sign and change law of the characterization parameters

及烈度进行定量评估;基于构建的卡钻故障智能识别算法,实现井下复杂故障的智能定量诊断,把井下复杂故障从事后诊断升级为事前预警,并结合本院自研的VDX参数仪建立井下卡钻风险预警机制,对卡钻故障进行动态辨识与分析,并选取已钻井历史复杂故障进行模型验证与完善,最终将预警系统应用于钻井现场,提高异常工况的诊断准确率、降低钻井风险。

卡钻故障对应故障征兆的变化趋势需要通过通过对一定时间段内的测量数据进行分析才能确定,而不是当前时间点的单一数值。参数的异常变化反映在曲线形态上即是曲线斜率的增大或减小。卡钻发生时,突出表现为悬重、扭矩和泵压发生浮动变化。通过自动监测时间序列悬重、扭矩和泵压变化,实现卡钻故障实时预警。算法主要步骤如下。

3.1 野点剔除

工程参数曲线的毛刺或突变可能是异常跳动,也可能是井下工况突变。对异常跳动、毛刺或突变应该剔除;对井下工况突变,则应该保留。未确知有理数方法能够很好地识别异常值和真值突变问题^[12]。

假设某时刻工程参数响应为未确知有理数 A ,如式(1):

$$A = \left[\left[\min(X_i), \max(X_i) \right], p(x) \right] \quad (1 \leq i \leq N) \quad (1)$$

式中: X_i ——某深度处的钻井工程参数; $p(x)$ ——钻井工程参数的可信度分布函数。

对比异常值和真值突变:如果 X_i 是异常值,则它是孤立的,在其邻域内与其数值相近的数据很少;如果是真实突变,则在 X_i 的邻域内与其数值相近的

数据较多。由此认为, X_i 邻域内与其相近的数据越多, 则 X_i 的可信度大, 反之 X_i 的可信度小。可信度函数为:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} & x = X_i \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_i —— X_i 邻域内 $|X_i - X_j| \leq \lambda$; $(i - \delta < j < i + \delta)$ 中包含 X_j 的个数。

这样就可以采用未确知有理数 A 的期望

$E(A) = \sum_{i=1}^n X_i p(X_i)$ 来代替, 实现异常值剔除。

3.2 参数归一化

本文采用最大最小法对工程参数进行归一化处理^[13]:

$$x_k = (x_k - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (3)$$

式中: $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ ——序列中的最小值和最大值。

3.3 基于参数变化趋势异常诊断的卡钻预警算法

对于工程参数所显示的增长趋势, 引入移动平均值的偏差, 计算公式为:

$$\Delta M = M_\alpha - M_\beta \quad (\alpha < \beta) \quad (4)$$

式中: M_α 、 M_β —— t 时刻的移动平均值; α 、 β ——滑动窗口长度; ΔM —— t 时刻移动平均值的插值。

上述技术仅适用于量化数据的增加和降低趋势, 为了量化数据变化趋势的异常, 将线性回归应用于实时数据分析, 将时刻 t 处回归的斜率值记为 $K_{i,t}$, 正值为正趋势, 负值为负趋势。平均局部斜率的计算公式为:

$$\bar{K}_t = \frac{\sum_{i=1}^t w_i K_{i,t}}{\sum_{i=1}^t w_i} \quad (5)$$

式中: w_i ——一个逻辑函数, 表示从 0~1 的指数转换, 公式为:

$$w_i = \left[1 + \exp \left(-2 \frac{i - \lambda_1 - t}{\lambda_2} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

式中: λ_1 、 λ_2 ——分别为控制过渡的位置和锐度, $\lambda_1 = 0.5 - \alpha$, $\lambda_2 = 0.1$; w_i ——时间步骤 t 之前数据点 i 的加权因子, 当 $i = t - \alpha$ 时, 加权因子接近 0, 当 $t - \alpha < i \leq t$ 时, 接近 1。

分别选取 t 时刻之前 0.5、1、1.5、2、2.5、3 min (时

间间距可调整) 做参数变化趋势分析, 如果斜率一直增加, 并且 t 时刻之前 0.5 min 之内数据回归斜率 > 0 , 则表明该工程参数有异常增大趋势。如: 当起钻过程中, 悬重测量参数 t 时刻之前 0.5、1、1.5、2、2.5、3 min, 6 个时间段内数据回归斜率一直增加, 并且 t 时刻之前 0.5 min 之内数据回归斜率 > 0 , 则发生卡钻预警。同理, 根据扭矩、泵压变化规律也可判断卡钻故障。卡钻风险指数可以通过将不同的加权因子分配给悬重监测指标、扭矩监测指标和泵压监测指标的概率值来计算, 公式为:

$$R_{sk} = w_D P_D + w_T P_T + w_P P_P \quad (7)$$

式中: R_{sk} ——卡钻风险指数; P_D 、 P_T 、 P_P ——分别为悬重、扭矩和泵压监测指标风险概率; w_D 、 w_T 、 w_P ——加权因子, 根据专家经验或已钻井历史数据确定加权因子。

卡钻自动监测算法流程如图 2 所示, 过程如下:

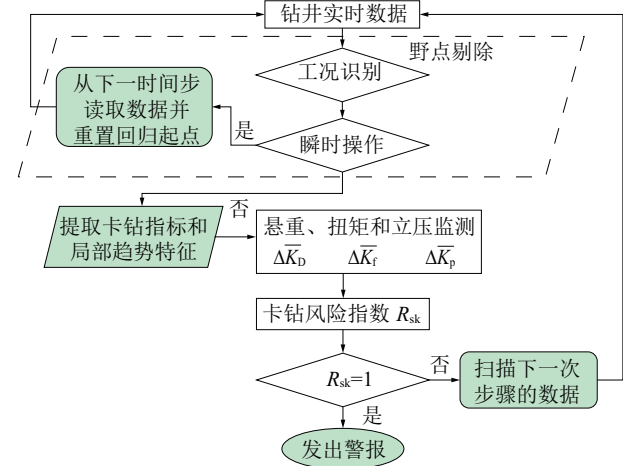


图 2 基于参数变化趋势异常诊断的卡钻实时预警流程

Fig.2 Real-time warning flow of the sticking based on the abnormal diagnose of the parameter change trend

(1) 首先在使用卡钻监测算法之前对实时数据进行异常点剔除, 通过实时钻井参数对钻井状态进行工况识别, 并判断操作是否属于任何瞬态活动; 上述预处理过程可以为风险预警建立一个合理的起点, 并避免由于瞬态操作或异常点引起的误报警。

(2) 基于当前和先前时间步骤的数据计算卡钻关键表征参数: 悬重、扭矩、泵压移动平均值的偏差和 t 时刻之前 0.5、1、1.5、2、2.5、3 min 局部趋势特征。如果平均移动偏差值指示局部增加趋势, 同时 6 个时间段内数据回归斜率绝对值一直增加, 则根据不

同工况下卡钻故障判断准则做出卡钻预警。

(3)通过为得到的概率值分配不同的加权因子,可以获得最终的卡钻风险指数。如果风险指数等于1,算法给出报警信号。

4 实例应用与分析

为验证算法的可靠性,选取WY-XX井为实例进行分析。WY-XX井是布置于四川盆地铁山一威远构造带白马镇向斜上的一口开发井。设计井深:5670 m;目的层:龙马溪组一段2-3①小层;完钻原则:钻至设计水平段长完钻。该井于2020年2月8日16:00导眼开钻;2月17日18:00一开开钻;3月1日10:00二开开钻;4月21日4:00三开开钻;5月9日18:40钻进至4956.28 m,循环30 min后,倒划眼至井深4937.3 m时发生遇阻复杂。遇阻卡层位:龙马溪组3-1小层,岩性:页岩。

卡钻发生过程:2020年05月09日18:40正常钻完立柱至井深4956.28 m,至19:11循环31 min。按照操作规程,看好悬重、每次上提几厘米、倒划眼清砂,倒划至井深4937.3 m,扭矩由15 kN·m上升至20 kN·m,顶驱憋停(顶驱力限设置20 kN·m),排量29 L/s,泵压31 MPa,立即下压钻具,悬重由1100 kN下压至200 kN(游动系统悬重200 kN),多次上提下放活动、憋扭矩未能活动钻具。钻进参数:钻压120~140 kN,排量29 L/s,扭矩力限25 kN·m;倒划前降低扭矩力限至20 kN·m。

井内钻具组合:Ø215.9 mm PDC钻头×0.33 m+Ø172 mm 贝克旋转导向工具×11.50 m(自身最大外径Ø212.0 mm 螺旋扶正器,距离钻头2.19 m)+Ø172 mm 无磁承压钻杆×9.18 m+Ø127 mm 加重钻杆×9.27 m+Ø172 mm 滤网接头×1.7 m+127 mm 回压阀×0.50 m(外径168 mm)+Ø127 mm 加重钻杆×18.31 m+Ø158.8 mm 随钻震击器×9.78 m+Ø127 mm 加重钻杆×55.37 m+Ø127 mm 钻杆×2079.64 m。

清砂接头位置:

- ①号 4697.28~4698.37 m;
- ②号 4582.73~4583.82 m;
- ③号 4468.05~4469.14 m;
- ④号 4353.38~4354.47 m;
- ⑤号 4238.22~4239.31 m;
- ⑥号 4123.35~4124.44 m。

钻井液性能:密度2.35 g/cm³、粘度74 s、高温高压滤失量1.8 mL、泥饼厚度1 mm、含砂量0.1%、塑性粘度78 mPa·s、动切力8.5 Pa、初/终切力4/8 Pa、破乳电压1669 V、含水率6%、含油率49%、油水比90:10、固相含量45%、PH2.0、钻井液六速旋转粘度计600 r/300 r=173/95、200 r/100 r=65/36、6 r/3 r=12/7。

选取WY-XX井卡钻前一段时间内工程参数进行分析(见图3),通过做平均移动偏差值(见图4),可以看出:8000 s时刻之后,长短窗口滑动平均值出现明显偏差,表明工程参数发生波动。

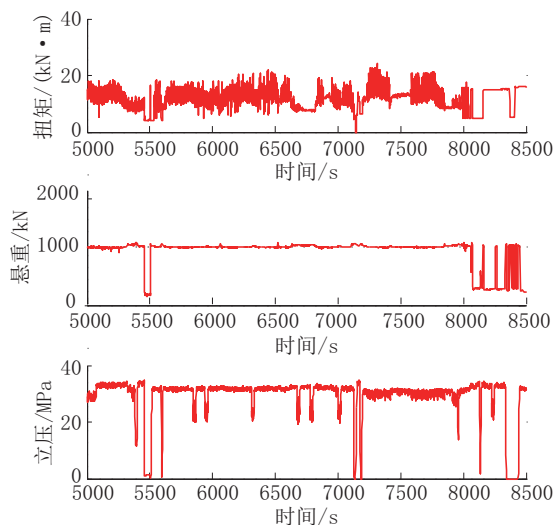


图3 WY-XX井卡钻前一段时间内工程参数监测数据
Fig.3 Monitoring data of the engineering parameters within a period of time before WY-XX stuck

进一步利用构建的卡钻预警模型,实时计算悬重、扭矩监测参数每一时刻之前30、60、90、120、150、180 s时间段内局部斜率,当悬重和扭矩的变化趋势满足6个时间段内数据回归斜率一直增加,并且该时刻之前30 s之内数据回归斜率 >0 ,则发出卡钻预警,结果如图5所示。可以看出:在8000 s时刻发生卡钻前,该软件有2次上提遇阻和一次憋扭矩预警(卡钻风险指数达到1),如果在遇阻报警发出后及时地采取相应的卡钻风险规避措施,就可以规避后续卡钻故障的发生。

查阅井史报告,在8000 s时刻(2020年5月9日19:28)倒划眼遇阻,继而发生卡钻故障。软件预警结果与实际井下风险相吻合,验证了模型的准确性和可靠性,实现了卡钻故障的智能诊断,提高了异常

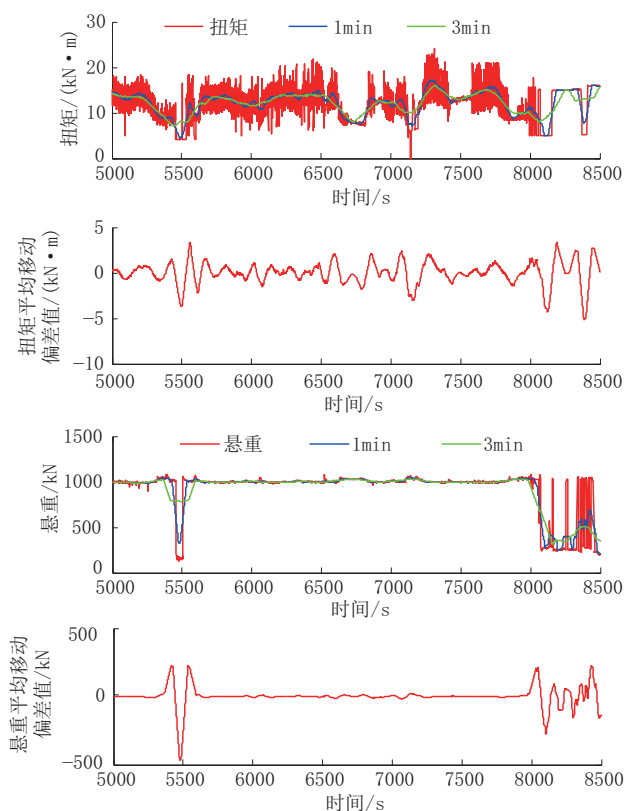


图4 WY-XX井卡钻前一段时间内工程参数
平均移动偏差值

Fig.4 Average moving deviation value of the engineering
parameters within a period of time
before Well WY-XX stuck

工况的诊断准确率。

自2021年8月起至今在川南页岩气工区推广应用卡钻风险预警软件30余井次,监控井日均报警2.23次/井·日,运行期间共报警8917次,其中准报6852次,误报2065次,去掉误报较多的数据异常提醒550条后,准确率83%。

5 结论

(1)在钻井作业过程中,井下风险发生之前都会有一定的征兆,如果能在风险发生的早期对于可能发生的风险进行预警,可以及时对风险进行调控。

(2)通过卡钻故障的专家知识总结,能够表征卡钻故障的工程参数有:大钩载荷、泵压、扭矩、机械钻速、转盘转速、钻压。地质参数有:岩性、地质构造、地层压力、钻井液性能等。

(3)本文研究了卡钻发生位点的关键表征参数的变化趋势,得到了相应的变化规律;在此基础上建

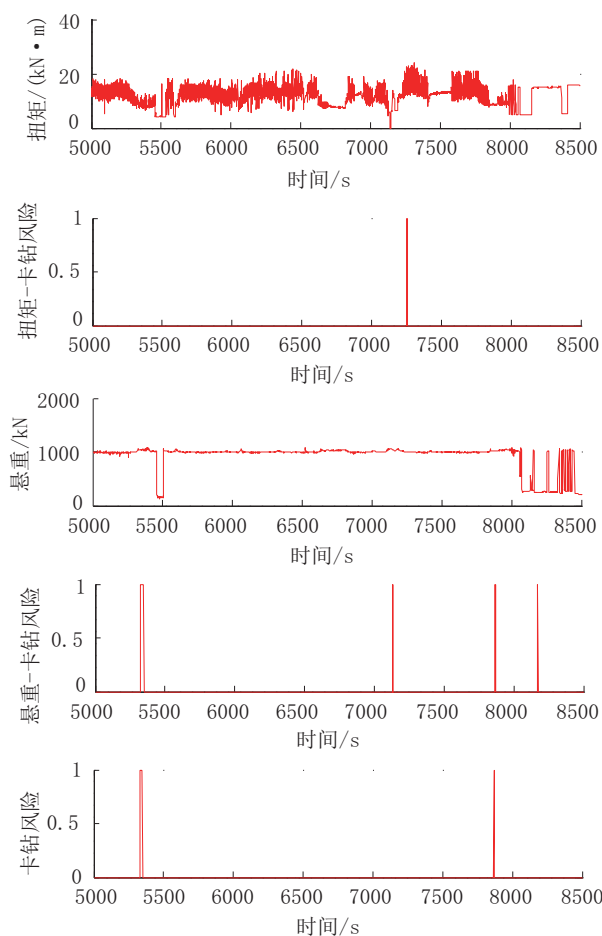


图5 WY-XX井卡钻故障预警结果

Fig.5 Warning result of the sticking risk for
Well WY-XX

立了基于工程参数变化趋势异常诊断的卡钻实时预警方法,WY-XX井实例分析验证了本文构建方法的可靠性,实现了卡钻故障的智能诊断,把井下复杂故障从事后诊断升级为实时预警判断,提高了异常工况的诊断准确率,准确率达83%。

参考文献(References):

- [1] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题(第2版)[M]. 北京:石油工业出版社,2006:72-80.
JIANG Xiwen. Drilling Accidents and Complex Problems (Second Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 72-80.
- [2] 李紫璇,张菲菲,祝钰明,等. 钻井模型与机器学习耦合的实时卡钻预警技术[J]. 石油机械,2022,50(4):15-21,93.
LI Zixuan, ZHANG Feifei, ZHU Yuming, et al. Real time stuck drilling warning technology coupled with drilling model and machine learning [J]. Petroleum Machinery, 2022, 50(4): 15-

- 21,93.
- [3] 刘海龙,李彤,张奇志.基于自适应遗传算法改进的BP神经网络卡钻事故预测[J].现代电子技术,2021,44(15):149-153.
LIU Hailong, LI Tong, ZHANG Qizhi. BP neural network based on adaptive genetic algorithm improvement for predicting stuck drill accidents[J]. Modern Electronic Technology, 2021, 44(15):149-153.
- [4] 朱硕,宋先知,李根生,等.钻柱摩阻扭矩智能实时分析与卡钻趋势预测[J].石油钻采工艺,2021,43(4):428-435.
ZHU Shuo, SONG Xianzhi, LI Gensheng, et al. Intelligent real time analysis of drill string friction and torque and prediction of stuck trend[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2021,43(4):428-435.
- [5] Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach[J]. Safety Science, 2013,57(3):108-117.
- [6] 苏晓眉,张涛,李玉飞,等.基于K-Means聚类算法的沉砂卡钻预测方法研究[J].钻采工艺,2021,44(03):5-9.
SU Xiaomei, ZHANG Tao, LI Yufei, et al. Research on the prediction method of sand sticking based on K-Means clustering algorithm [J]. Drilling and Production Technology, 2021, 44(3):5-9.
- [7] 魏纳,李蜀涛,陈亮,等.AD401-7井定向井卡钻复杂事故的处理及分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):10-16.
WEI Na, LI Shutao, CHEN Liang, et al. AD 4017 directional well's processing and analysis of drilling complex accident [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(4):10-16.
- [8] 翟育峰,赵辉,王鲁朝,等.湘南3000 m科学深钻孔内事故处理及对策[J].钻探工程,2023,50(4):32-40.
ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, WANG Luzhao, et al. Down-hole incident treatment and prevention for the 3000m scientific deep borehole in southern Hunan [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):32-40..
- [9] 朱迪斯,赵洪波,刘恩然,等.长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程难点及对策分析[J].钻探工程,2022,49(5):11-21.
ZHU Disi, ZHAO Hongbo, LIU Enran, et al. Shale gas drilling difficulties and their solutions in the lower reach of the Yangtze River (Anhui)[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):11-21..
- [10] 陈庭根,管志川.钻井工程理论与技术[M].东营:中国石油大学出版社,2006:51-54.
CHEN Tinggen, GUAN Zhichuan. Theory and Technology of Drilling Engineering [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000:51-54.
- [11] Jahanbakhshi R, Keshavarzi R, Shoorehdeli M A, et al. Intelligent prediction of differential pipe sticking by support vector machine compared with conventional artificial neural networks: An example of Iranian Offshore Oil Fields [J]. SPE Drilling & Completion, 2012,27(4):586-595.
- [12] 赵虎.数据采集中的未确知有理数滤波方法[J].自动化仪表,2008(8):12-14.
ZHAO Hu. Unascertained rational number filtering method in data acquisition [J]. Automatic Instrument, 2008, 14(8):12-14.
- [13] 柳小桐.BP神经网络输入层归一化[J].机械工程与自动化,2010,11(3):122-126.
LIU Xiaotong. Input layer normalization of BP neural network [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2010, 11(3):122-126.

(编辑 王文)