

# 基于专家知识和参数阈值的钻探孔内事故 判别准则研究

杨科, 蒲春\*, 廖麟祥, 曹灶开

(中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川成都 610036)

**摘要:** 在找矿突破战略行动中, 钻探深度不断加大, 智能化工况识别已成为钻探安全、高效、低成本钻进的必要措施。其步骤包括信号采集、特征提取、状态识别及诊断决策等。其中建立准确可靠的孔内事故判别准则是状态识别和诊断决策的难点和核心。本文首先基于孔内事故相关理论知识和工程实践经验, 对钻探孔内埋钻、卡钻、烧钻、断钻、孔漏、孔溢6种事故类型作了细致划分, 归纳总结了它们的发生征兆; 对实时钻探信号参数特征及变化趋势表达方式进行了详细分析; 在此基础上提出通过泵压、钻速、扭矩、转速、悬重、出口流量6个特征参数的相对均值、标准差、均值斜率、标准差斜率及它们的阈值来表征各参数的变化情况; 最后采用矩阵的形式建立了事故判别准则。该判别准则具有较强的理论和实践基础, 在实际使用时能够划分详细的钻探事故类别, 可以为后续软件开发提供理论依据。

**关键词:** 孔内事故; 工况识别; 判别准则; 阈值

**中图分类号:** P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0070-08

## Research on the criterion of hole accident about core drilling based on expert knowledge and parameter thresholds

YANG Ke, PU Chun\*, LIAO Linxiang, CAO Zaokai

(Civil-Military Integration Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** In the strategic action of ore prospecting breakthrough, the drilling depth is constantly increasing, and intelligent working condition recognition has become a necessary measure for safe, efficient and low-cost drilling. Its steps include signal acquisition, feature extraction, state recognition and diagnosis decision, among which the establishment of accurate and reliable in-hole accident discrimination criterion is the difficulty and core of state recognition and diagnosis decision. Firstly, based on the theoretical knowledge and engineering practice experience of in-hole accidents, this paper divides the six types of accidents in drilling holes into buried drilling, stuck drilling, burned drilling, broken drilling, hole leakage and hole overflow, and summarizes their occurrence symptoms. The characteristics and change trend expression of real-time drilling signal parameters are analyzed in detail. On this basis, the relative mean, standard deviation, mean slope, standard deviation slope and their thresholds of six characteristic parameters, including pump pressure, drilling speed, torque, rotation speed, overhead weight and outlet flow, are proposed to characterize the change of each parameter. Finally, the accident discrimination criterion is established in the form of matrix. The discrimination criterion has strong theoretical and practical basis, and can divide the detailed drilling accident categories in actual use, which can provide a discrimination basis for subsequent software development.

**Key words:** hole accident; working condition recognition; criterion; threshold value

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-06-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.010

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“西部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(军民融合中心)”(编号: DD20243097)

第一作者: 杨科, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩心钻探方面的工作, 四川省成都市茶店子路399号, 395241315@qq.com。

通信作者: 蒲春, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文、工程钻探方面的工作, 四川省成都市茶店子路399号, putieren@163.com。

引用格式: 杨科, 蒲春, 廖麟祥, 等. 基于专家知识和参数阈值的钻探孔内事故判别准则研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 70-77.

YANG Ke, PU Chun, LIAO Linxiang, et al. Research on the criterion of hole accident about core drilling based on expert knowledge and parameter thresholds[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 70-77.

## 0 引言

岩心钻探是固体矿产勘探的重要手段,作为一项隐蔽的地下工程,存在着大量的模糊性、随机性和不确定性。在钻探作业中,受地质、工程以及人员管理等因素制约,往往在钻探过程中不可避免地发生很多情况复杂甚至严重的孔内事故,损失大量人力、物力、财力<sup>[1-4]</sup>。由于孔内事故通常发生在地下,因此很难直观地判断事故发生的类型,也很难为事故进行预判和处理。实时获取钻探过程信息,在出现事故征兆时,及时识别和判明孔内情况,是制定相应预防、处理措施,防止事故发生或进一步恶化,实现安全、高速、低成本钻进目标的重要途径<sup>[5]</sup>。

近年来,在新的找矿突破战略行动中,找矿工作难度不断加大和深度不断加深,给岩心钻探工作增加了难度和挑战,使得过去仅凭经验判断孔内状态的方式难以继续。因此,岩心钻探界部分人员已清醒地认识到,使用钻探参数监测仪对钻探过程进行连续监测,实现钻探智能化是由凭经验打钻走向科学施工的必由之路<sup>[6]</sup>,是钻机实现安全、高效、低成本生产的关键技术<sup>[7]</sup>。当前借助钻参仪对钻探孔内的过程信息进行搜集、分析已越来越多的应用于施工领域<sup>[8-10]</sup>,已有的智能化工况模式判别多是基于小波分析<sup>[11]</sup>、神经网络模型<sup>[12]</sup>等。虽然近年来应用人工智能技术解决钻探过程中安全事故诊断和预警的案例较多,但“钻井技术智能化”仍然只是在发展的路上<sup>[13]</sup>。当前大多文献是基于某一种工况进行研究,如胜亚楠<sup>[14]</sup>采用参数变化趋势诊断卡钻事故,张欣等<sup>[15]</sup>基于机器学习算法预测井漏,李谦等<sup>[16]</sup>对钻速预测模型的有效性进行了分析。此外,因钻探领域专家知识过于分散,难以对所有工况进行全面细致的分析和总结,因此整合出适用范围更广泛的基于专家知识和参数信号分析建立智能化工况判别模型例子还较少。基于此,本文根据以往经验对大多数孔内复杂情况和事故种类及参数变化情况进行梳理和认真总结,对事故类型进行了细致分类,并结合每种工况的参数变化特征分析,根据不同工况参数的阈值建立起了事故类型判别矩阵,可以为事故诊断理论、人工智能技术建立孔内事故判别模型提供理论支持,为下一步开发多工况智能识别软件奠定基础。

## 1 材料

以往专家知识分析的常见的孔内事故类型主要有6种:埋钻、卡钻、烧钻、断钻、孔漏、孔溢等<sup>[17-20]</sup>。这些知识经验较为分散,通过对前人留下的文献和实际施工经验将此6种事故类型进一步划分为22种细分类型,并对各细分类型的钻探征兆和参数变化特征做了详细的总结和描述(如表1所示)。

## 2 方法

将钻进阶段事故判别所需要的特征数据分成2大类<sup>[35]</sup>:一是实时钻进参数,包括钻进工程参数、泥浆参数;二是辅助判别信息,它是事故发生后用于确定事故类型的信息。

钻进工程参数主要包括:钻压、泵压、钻速、悬重、转盘转速、转盘扭矩、孔深。

泥浆参数主要包括:出/入口流量、泥浆池体积、出/入口密度、出/入口电导率。

辅助判别参数:水位测量情况、钻具运动情况(上提遇卡、下放遇阻或正常)以及异常声响振动等。

### 2.1 实时特征参数分析方法

钻进状态下,钻参仪采集到的特征参数可以看作是一个随机的非平稳的动态样本序列,因此可以用均值、标准差及它们的阈值来处理钻进阶段信号参数。均值代表了某段时间内特征参数的整体集中趋势,其变化趋势代表了参数平均变化趋势,可以判断特征参数是否正常变化;标准差代表了信号的平均波动程度和稳定性,也可以判断系统是否处于正常状态;阈值代表了特征参数的合理波动范围限值,是否超过阈值可以判断系统是否异常。三者结合能有效提高判断系统运行状态的可靠性。

### 2.2 实时参数处理方法

由表1可知,孔内事故可分为突发型和长期趋势型,应分别获取短时间体系特征参数变化情况和长时间体系特征参数变化情况,以便于事故诊断。

假设钻进过程采样频率 $f_H$ 为准确实时监测钻探参数,采样频率不低于钻机各部件最大振动频率(一般是钻头振动频率的整数倍),可取采样频率 $f_H = 40 \text{ Hz}$ <sup>[36]</sup>。

设采样周期为 $\Delta T$ ,孔内状态由正常进入到异常有一小段时间,一般落物卡钻、断钻、烧钻等事故从发生征兆到造成事故之时间为10~15 s,而其他

表1 常见事故类型及征兆

事故类型	事故分类	持续类别	征兆
埋钻	孔壁坍塌埋钻	突发型	(1)埋钻前,钻进中扭矩增大,时有憋钻现象;(2)泵压突然升高;(3)孔口返水减少或不返水;(4)上提钻具会遇卡 <sup>[21-22]</sup>
	岩粉沉淀埋钻	长期趋势型	(1)埋钻前,下钻不能到底,钻进中扭矩逐渐增大;(2)开始有些堵水,继而泵压快速升高,产生憋泵现象;(3)孔口返水减少直至不返水;(4)上提钻具受阻
卡钻	坍塌卡钻	突发型	(1)钻进中扭矩增大,时有憋钻现象;(2)泵压升高;(3)上提、下放钻具受阻;(4)孔口返水减少,并忽大忽小;(5)下钻不能到底;(6)孔口返屑增多,常常返出未破碎的岩块 <sup>[23]</sup>
	压差/粘吸卡钻	长期趋势型	(1)钻具不能转动;(2)泥浆循环正常,泵压不变;(3)上提下放困难;(4)卡钻前在孔内静置过一段时间 <sup>[24-26]</sup>
	砂桥卡钻	长期趋势型	(1)下钻时井口不返钻并液或者钻杆内反喷钻并液,随着下钻深度的增加阻力逐渐增加;(2)起钻时环空液面水位不降而钻具内液面降低;(3)钻进时,开泵循环过程中,钻具活动自如,停泵则钻具提不上来 <sup>[27]</sup>
	缩径卡钻	长期趋势型	(1)单向遇阻,表现为上提和下放会受阻,但不同时受阻;(2)阻卡点相对固定;(3)泵压升高,严重时憋泵;(4)扭矩视阻卡情况可能正常也可能升高并有憋钻现象(阻卡严重时) <sup>[28]</sup>
	键槽卡钻	长期趋势型	(1)只在起钻过程中发现;(2)阻卡点相对固定;(3)泵压及孔口流量无变化;(4)在键槽中受阻,拉力增大时启动转盘困难,但下放钻柱脱离键槽后转盘转动正常 <sup>[29]</sup>
	泥包卡钻	长期趋势型	(1)机械钻速降低;(2)扭矩增加;(3)泵压略有升高;(4)起钻时阻力升高,泥包越重阻力越大;(5)起钻时环空液面可能随钻具上升而外溢,钻杆内看不到液面 <sup>[30]</sup>
	落物卡钻	突发型	(1)在钻进中有憋钻现象产生,小落物有可能提脱,大落物越提越卡死;(2)落物卡钻的卡点一般在钻头或者扶正器位置,较大的落物也有可能在钻杆接头处;(3)落物卡钻时,开泵循环正常,泵压、孔口流量无变化
	套管鞋卡钻	突发型	同键槽卡钻(1)、(2)、(3)点,区别于键槽卡钻:在键槽中受阻,拉力增大时启动转盘困难,放开拉力后,键槽会有一定的卡阻,钻具不会马上下落;而套管鞋卡钻没有卡阻,会马上下落
	烧钻	长期趋势型	(1)钻头由硬岩层进入软岩层,钻速突然变快、泵压增高、钻机扭矩增大;(2)此时泵压、扭矩上升且曲线脉动加剧,孔口流量减小;(3)烧钻初期钻速短暂上升,随即急剧下降,甚至钻压曲线也呈脉动状,烧钻事故发生后,冲洗液循环中止、钻具不能提动也不能转动 <sup>[31]</sup>
断钻	钻柱受拉过大而折断	突发型	各种断钻虽然受力方式不同,但其征兆都基本相同:(1)当钻杆或接头处出现裂纹并逐渐扩展时,其他参数曲线无明显特征,而泵压随时间而逐渐降低;(2)当钻杆折断时,一般扭矩突然增大,待折断后扭矩又突然减小;(3)悬重下降;(4)泵压降低,返回冲洗液逐渐变清,但返出量无明显变化;(5)钻具断脱后,钻速可能急剧降为零也可能突然升 <sup>[32]</sup>
	钻柱受压过大而折断	突发型	
	钻柱受扭过大而折断	突发型	
	混合作用力折断	突发型	
钻孔漏失	渗透性漏失	长期趋势型	四种类型孔漏区别于其他工况最主要、最直观的判别方法是:观察泵压和孔口流量的变化。发生孔漏时,泵压下降,返浆流量减小,甚至不返;钻速增加,有时突然增大;悬重增加或突然增大;扭矩减小或突然减小 <sup>[33-34]</sup>
	小微裂隙性漏失	长期趋势型	
	较大裂隙或溶洞性漏失	长期趋势型	
孔溢	地层压力过大而泥浆密度过低造成孔溢	长期趋势	四种类型孔溢区别于其他工况最直接的征兆是:孔口流量增加,泥浆池体积增大,钻井液密度减小。泵压根据侵入的流体不同而有所不同:当侵入流体为气体时,由于泥浆密度降低,泵压会降低;当侵入流体为液体比如水时,虽然泥浆的密度一般会降低,但由于侵入流体的体积远大于泥浆体积,泵压会增加
	气体侵入孔内使泥浆密度下降而孔溢	长期趋势	
	起钻速度过快,钻头泥包引起抽吸作用而孔溢	突发型	
	起钻时泥浆补充不及时	突发型	

如缩径卡钻等事故延续时间较长,理论上讲 $\Delta T$ 尽量取小可保证数据的及时性,考虑数据传输速度,可取 $\Delta T = 5 \text{ s}$ 。则一个采样周期 $\Delta T$ 有 $5f_{\text{H}}$ 个采样数据。设 $\Delta T$ 内时间序列如下:

$$\Delta T = \{\alpha_j, \alpha_{j-1}, \alpha_{j-2}, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_1\}$$

数据的时间顺序: $\alpha_j \rightarrow \alpha_{j-1} \rightarrow \alpha_{j-2} \rightarrow \dots \rightarrow \alpha_i \rightarrow \dots \rightarrow$

$\alpha_1, \alpha_0$ 为当前采样数据。

设短时间段为 $ST$ ,长时间段为 $LT$ 。短时间段 $ST$ 含 $m$ 个采样周期,即 $ST = m\Delta T$ 。长时间段为 $LT$ 等分为 $n$ 个短时间段,即 $LT = n \cdot ST$ ,一般的取

$ST = 1 \sim 3 \text{ min}$ ,  $LT = 10 \sim 30 \text{ min}$  较为合适<sup>[37]</sup>。其时间序列形式如下:

$$ST = \{\Delta T_m, \Delta T_{m-1}, \Delta T_{m-2}, \dots, \Delta T_i, \dots, \Delta T_1\}$$

$$LT = \{ST_n, ST_{n-1}, ST_{n-2}, \dots, ST_i, \dots, ST_1\}$$

对于  $ST$ , 数据的时间顺序:  $\Delta T_m \rightarrow \Delta T_{m-1} \rightarrow \Delta T_{m-2} \rightarrow \dots \rightarrow \Delta T_i \rightarrow \dots \rightarrow \Delta T_1$ ,  $\Delta T_0$  为当前采样周期,  $\Delta T_1 \sim \Delta T_m$  分别记录历史采样数据。对于  $LT$ , 其数据的时间顺序为:  $ST_n \rightarrow ST_{n-1} \rightarrow ST_{n-2} \rightarrow \dots \rightarrow ST_i \rightarrow \dots \rightarrow ST_1$ ,  $ST_0$  为当前短时间段。

特征参数处理方法与过程如下:

(1) 对采集数据进行“去燥”处理。取置信区间  $\bar{x} \pm 3\delta_x$  范围内数值为有效值, 其可信度 99%, 其余数值剔除。

(2) 计算相对均值和标准差。在当前短时间段  $ST_0$  内, 每隔  $\Delta T$  时间, 根据传感器数据计算均值和标准差。则在  $m$  个  $\Delta T$  后, 在  $ST_0$  内形成如下特征参量序列:

$$\mu(ST_0) = \{\mu_m, \mu_{m-1}, \dots, \mu_i, \dots, \mu_1\}$$

$$S(ST_0) = \{S_m, S_{m-1}, \dots, S_i, \dots, S_1\}$$

判别孔内事故类型时从孔内动态过程信号特征参数的相对均值、均值变化趋势和波动特性进行分析。

① 相对均值。在一个采集周期  $\Delta T$  内, 一旦特征参数相对均值超过(或低于)正常约束的阈值, 则造成孔内事故。其约束条件为:

$$U = \frac{|\mu_0 - \mu_i|}{\mu_i} \times 100\% \leq U_{\max} \quad (1)$$

式中:  $\mu_i$ ——加权移动平均值;  $U_{\max}$ ——正常工况条件下获得的参数偏离移动平均值的阈值。

设收集得到的一组特征数据  $\{\mu_j, \mu_{j-1}, \mu_{j-2}, \dots, \mu_i, \dots, \mu_1, \mu_0\}$ , 数据的时间顺序  $\mu_j \rightarrow \mu_{j-1} \rightarrow \mu_{j-2} \rightarrow \dots \rightarrow \mu_i \rightarrow \dots \rightarrow \mu_1, \mu_0$  为当前采样数据。该组数据是正常钻进数据, 没有发生孔内事故。设  $t$  时出现均值  $\mu_i$ , 从  $\mu_i$  开始往前取  $n$  个有效周期, 其时间序列  $\{\mu_{i+n}, \dots, \mu_{i+2}, \mu_{i+1}, \mu_i\}$ 。因为时间间隔小, 且特征数据为正常钻进数据, 根据钻进特征参数特点, 距离越近的数据越相近, 故可近似地认为时间序列的加权移动平均数为特征参数的理论均值。

加权移动平均给各期限内的每个特征参数以不相等的权重。其原理是: 历史各期数据信息对预

测未来参数的准确性是不一样的。离目标期  $\mu_i$  越近的参数与  $\mu_i$  理论值越接近, 给予权重越大; 远离目标期的变量值的预测准确性相对较低, 给予较低的权重, 按等差数列设置权重, 设最近的权重为

$$\omega_1 = \frac{n}{\sum(1+2+\dots+n)}, \text{ 最远的权重为 } \omega_n = \frac{1}{\sum(1+2+\dots+n)}, \sum \omega_n = 1, \text{ 则加权移动平均值 } \mu_i:$$

$$\mu_i = \frac{n\mu_{i+1} + (n-1)\mu_{i+2} + \dots + 2\mu_{i+n-1} + \mu_{i+n}}{1+2+\dots+(n-1)+n} \quad (2)$$

② 均值变化趋势。均值可以用来表征参数的变化趋势。由于  $\mu$  是  $\Delta T$  周期特征参数平均值, 故可以看作是随时间  $t$  变化的离散点, 因为时间段  $ST_0$  一般比较小, 可以将均值  $\mu$  的变化看作是随时间  $t$  的线性变化, 通过线性回归, 求出斜率  $k_\mu$ , 即求出均值  $\mu$  的变化趋势和变化速度。设回归方程为:

$$\mu(t) = k_\mu \cdot t + b_\mu \quad (3)$$

考虑到诊断系统运行的速度和复杂性, 为保证系统判别的精度, 我们设任一诊断时间为  $T_D$ , 其满足  $T_D = h \cdot \Delta T < ST, 0 < t \leq T$ 。每次求解回归方程之前要将时间坐标归零处理, 则一共有  $h$  组数据参加线性回归方程的拟合, 采用最小二乘法的求解结果如下:

$$k_\mu = \frac{\sum_{i=1}^h (\mu_i - \bar{\mu})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^h (t_i - \bar{t})^2} \quad (4)$$

其中,  $\bar{\mu} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \mu_i, \bar{t} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h t_i, t_i = \frac{h \cdot \Delta T}{2}$ 。  $k_\mu$  值的正(负)表示特征参数均值的变大(变小),  $|k_\mu|$  的大小表示特征参数变化速度的快慢。

③ 波动特性。用信号波动特性来判别事故, 不仅要考虑其值的大小, 还得考虑其变化趋势。特征参数的波动特性用标准差序列  $S(t)$  来表示。其计算过程同均值, 设  $S(t)$  的线性回归方程为:

$$S(t) = k_s \cdot t + b_s \quad (5)$$

则斜率为:

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^h (S_i - \bar{S})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^h (t_i - \bar{t})^2} \quad (6)$$



$S(t)$ 的大小表示信号波动程度的大小; $S(t)$ 的增大(减小)即 $k_s$ 的正负,表示信号波动的增大(减小)。 $S(t)$ 超过阈值会导致系统出事故, $S(t)$ 增大或减小则表示系统工作状态不稳定。

(3)时间体系数据更新。时间体系数据更新方法如下:

初始只有 $\Delta T_0$ 时间段内的特征参量,记为 $\Delta T_0(\mu, S)$ 。初始化时先将 $\Delta T_0(\mu, S)$ 赋值给 $\Delta T_{1-m}(\mu, S)$ 和 $ST_{1-n}(\mu, S)$ 。

每隔 $\Delta T$ 时间更新一次数据,为防止数据覆盖,需要注意数据赋值顺序。其更新顺序为: $\Delta T_m(\mu, S) \leftarrow \Delta T_{m-1}(\mu, S) \leftarrow \dots \leftarrow \Delta T_i(\mu, S) \leftarrow \dots \leftarrow \Delta T_1(\mu, S) \leftarrow \Delta T_0(\mu, S)$ 。

(4)特征参数变化趋势的表达。综上,孔内事故特征参数的变化趋势分为:突增、突减、增大、减小、波动、稳定(无影响)。钻探动态参数信号的变化趋势可以由相对均值 $U$ 、标准差 $S$ 、均值斜率 $k_\mu$ 及标准差斜率 $k_s$ 来表示,分为以下几种变化趋势:

① 参数信号基本稳定  $\rightarrow U \approx 0, S \approx 0, k_\mu \approx 0, k_s \approx 0$

② 参数信号增加  $\rightarrow 0 < U \leq \text{阈值}, k_\mu > 0$

③ 参数信号减小  $\rightarrow 0 < U \leq \text{阈值}, k_\mu < 0$

④ 参数信号突增  $\rightarrow U > \text{阈值}, k_\mu > 0$

⑤ 参数信号突减  $\rightarrow U > \text{阈值}, k_\mu < 0$

⑥ 参数信号波动  $\rightarrow U \approx 0, k_\mu \approx 0, S > 0$

实时参数处理流程如图1所示。

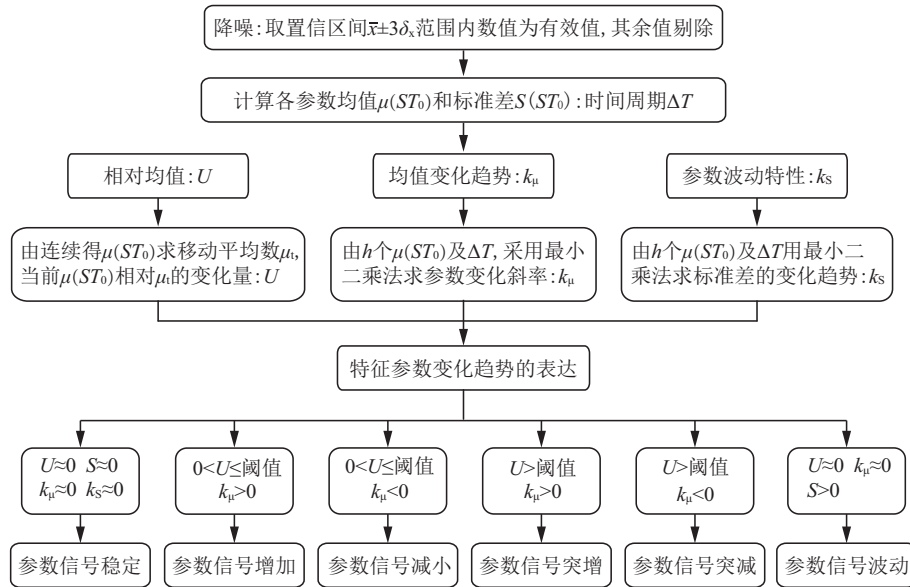


图1 实时参数处理流程

### 3 结果与讨论

在钻进状态下判别孔内事故时,特征参数的选择要考虑其对事故的敏感性、在钻探中的重要性、判别时的区分性和判别系统的简易性以及事故判别的实时性,本文选择泵压、钻速、扭矩、悬重、转速、出口流量为实时特征参数。研究的事故类型包括:埋钻(孔壁坍塌埋钻和岩粉沉淀埋钻)、卡钻(坍塌卡钻、砂桥卡钻、缩径卡钻、泥包卡钻、落物卡钻)、烧钻、断钻(钻柱受拉过大而折断、钻柱受压过大而折断、钻柱受扭过大而折断、混合作用力折断)、孔漏(渗透性漏失、小微裂隙性漏失、较大裂隙

或溶洞性漏失)、孔溢(地层压力过大孔溢、气体侵入使泥浆密度降低孔溢)。

#### 3.1 事故类型判别矩阵的建立

根据表1分析的结果,以横向为事故类型,纵向为实时参数,初步建立孔内事故定性判别模型如表2所示。

将钻探动态参数信号的变化趋势由相对均值 $U$ 、标准差 $S$ 、均值斜率 $k_\mu$ 及标准差斜率 $k_s$ 进行表示后,正常钻进工况的阈值及孔内事故特征参数合理范围如表3、表4所示。

表2 钻探事故特征参数定性判别模型

事故类型	事故细分	组合方案	实时钻进参数					
			泵压	钻速	扭矩	转速	悬重	出口流量
埋钻	坍塌埋钻	1	↑↑	↓↓	↑↑	↓	---	↓↓
	岩粉沉淀埋钻	2	↑	↓	↑	↓	---	↓
		3	↑	↓	↑	---	---	↓
卡钻	坍塌卡钻	1	↑	↓	↑	↑↓	---	↑↓
	砂桥/缩颈卡钻	2	↑	↓	↑	---	---	---
		3	↑	↓	---	---	---	---
	落物卡钻	4	---	↓	↑	↓	---	---
	落物卡钻	5	---	↓	↑	---	---	---
	泥包卡钻	6	↑	↓	↑	---	---	↓
烧钻		1	↑↓&.↑↑	↑↑	↑↓&.↑↑	↑↓&.↓	---	↓
		2	↑↓&.↑↑	↓↓	↑↓&.↑↑	↑↓&.↓	---	↓
断钻	有裂纹扩展	1	↓	---	---	---	---	---
	直接折断	2	↓	↑↑	↓↓	---	↓↓	---
		3	↓	↓↓	↓↓	---	↓↓	---
孔漏	渗透性漏失	1	↓	↑	---	---	---	↓
	小微裂隙性漏失	2	↓	---	---	---	---	↓
	较大裂隙或溶洞性漏失	3	↓↓	↑↑	↓↓	---	↑	↓↓
孔溢	地层压力过大孔溢	1	↑	---	---	---	---	↑
	气体侵入泥浆密度降低孔溢	2	↓	---	---	---	---	↑

注: ↑表示增加; ↓表示减小; ↑↑表示突增; ↓↓表示突减; ↑↓表示抖动; ---表示平稳。

表3 正常钻进工况阈值

钻进参数	泵压 $P$	钻速 $V$	扭矩 $M$	转速 $n$	悬重 $G$	出口流量 $Q$
相对均值阈值	$\bar{U}_{Pmax}[i]$	$\bar{U}_{Vmax}[i]$	$\bar{U}_{Mmax}[i]$	$\bar{U}_{nmax}[i]$	$\bar{U}_{Gmax}[i]$	$\bar{U}_{Qmax}[i]$
标准差阈值	$S_{Pmax}$	$S_{Vmax}$	$S_{Mmax}$	$S_{nmax}$	$S_{Gmax}$	$S_{Qmax}$

表4 孔内事故特征参数合理范围

钻进参数	泵压 $P$	钻速 $V$	扭矩 $M$	转速 $n$	悬重 $G$	出口流量 $Q$
均值正斜率合理范围值	$k_{\mu Pmax}[i]$	$k_{\mu Vmax}[i]$	$k_{\mu Mmax}[i]$	$k_{\mu nmax}[i]$	$k_{\mu Gmax}[i]$	$k_{\mu Qmax}[i]$
均值负斜率合理范围值	$k_{\mu Pmin}[i]$	$k_{\mu Vmin}[i]$	$k_{\mu Mmin}[i]$	$k_{\mu nmin}[i]$	$k_{\mu Gmin}[i]$	$k_{\mu Qmin}[i]$
标准差斜率合理范围值	$k_{S Pmax}[i]$	$k_{S Vmax}[i]$	$k_{S Mmax}[i]$	$k_{S nmax}[i]$	$k_{S Gmax}[i]$	$k_{S Qmax}[i]$

注:表中  $i=1,2,3,4,5,6$ , 分别对应为“埋钻”、“卡钻”、“烧钻”、“断钻”、“孔漏”、“孔溢”。

设钻探特征参数  $X=P, V, M, n, G, Q$ , 在  $\Delta T$  内分别求出  $\bar{U}_X, S_X, k_{\mu X}, k_{S X}$ 。

如果  $\bar{U}_X > \bar{U}_{Xmax}$ , 令  $\bar{U}_X = 1$ , 否则  $\bar{U}_X = 0$ ;

如果  $S_X > S_{Xmax}$ , 令  $S_X = 1$ , 否则  $S_X = 0$ ;

如果  $k_{\mu X} > k_{\mu Xmax}$  令  $k_{\mu X} = 1$ , 如果  $k_{\mu X} < k_{\mu Xmin}$  令  $k_{\mu X} = -1$ , 否则  $k_{\mu X} = 0$ ;

如果  $k_{S X} > k_{S Xmax}$ , 令  $k_{S X} = 1$ , 否则  $k_{S X} = 0$ 。

由以上分析, 将表2进一步数字化后建立孔内

事故判别矩阵如表5所示。

### 3.2 判别矩阵应用

对实时测量的6个特征参数: 泵压  $P$ 、钻速  $V$ 、扭矩  $M$ 、转速  $n$ 、悬重  $G$ 、出口流量  $Q$  分别求出相对均值  $\bar{U}_X$ 、标准差  $S_X$ 、均值斜率  $k_{\mu X}$ 、标准差斜率  $k_{S X}$ , 对照表3、表4, 得到一个组合方案, 判断该组合方案在表5中位置, 即可判断出事故类别。

例: 当收集到6个特征参数: 泵压  $P$ 、钻速  $V$ 、扭

表5 孔内事故判别矩阵

序 号	事故 类型	方案 号	实时特征参数																											
			泵压 $P$				钻速 $V$				扭矩 $M$				转速 $n$				悬重 $G$				出口流量 $Q$							
			$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$	$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$	$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$	$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$	$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$	$\bar{U}_X$	$k_{\mu X}$	$S_X$	$k_{S X}$				
1	埋钻	1	1	1	0	0	1	-1	0	0	1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
		2	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
		3	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
2	卡钻	1	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
		2	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		4	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		5	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		6	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
3	烧钻	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
		2	1	1	1	0	1	-1	0	0	1	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
4	断钻	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		2	0	-1	0	0	1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
		3	0	-1	0	0	1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
5	孔漏	1	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
		2	0	-1	0	0	1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
		3	0	-1	0	0	1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0
6	孔溢	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
		2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

矩  $M$ 、转速  $n$ 、悬重  $G$ 、出口流量  $Q$ ，出现泵压升高、钻速降低、扭矩升高、转速降低、悬重稳定、出口流量稳定的状态时，其对应的相对均值  $\bar{U}_X$ 、标准差  $S_X$ 、均值斜率  $k_{\mu X}$ 、标准差斜率  $k_{S X}$  分别为  $\{0, 1, 0, 0\}$ 、 $\{0, -1, 0, 0\}$ 、 $\{0, 1, 0, 0\}$ 、 $\{0, -1, 0, 0\}$ 、 $\{0, 0, 0, 0\}$ 、 $\{0, 0, 0, 0\}$ ，根据判别矩阵表(表5)，该事故类型为落物卡钻。实例证明该判别准则具有良好的可行性。

#### 4 结语

当前钻探孔内工况识别技术还处于理论试验阶段，还没有比较完备的体系，工况识别过程包括信号采集、特征提取、状态识别及诊断决策等步骤，其中，孔内事故判别准则状态识别及诊断决策的核心。本文围绕孔内工况识别具体步骤，首先基于孔内事故相关理论知识和工程实践经验，对钻探孔内事故类别作了细致划分，归纳总结了“埋钻”、“卡钻”、“烧钻”、“断钻”、“孔漏”、“孔溢”6类事故发生的征兆及泵压  $P$ 、钻速  $V$ 、扭矩  $M$ 、转速  $n$ 、悬重  $G$ 、出口流量  $Q$  等特征参数的变化特征；在此基础上提出

通过对钻探信号参数的特征进行分析，提出利用相对均值  $\bar{U}_X$ 、标准差  $S_X$ 、均值斜率  $k_{\mu X}$ 、标准差斜率  $k_{S X}$  及它们的阈值组合来表征特征参数变化趋势，该方法不仅能判别突发性事故，也能判别趋势型事故；最后采用矩阵的形式建立了事故判别准则，该准则具有较强的理论和实践基础，可以为后续软件开发提供判别依据。但该判别准则没有考虑极端地层，如滚石、软硬互层时的参数变化，缺少实践检验，后续还需进一步深入地研究。

#### 参考文献：

- [1] 宋媛媛. 钻井井下事故建模与仿真处理研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- [2] 曾义金, 刘汝山. 钻井井下复杂问题预防与处理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [3] 杨科, 罗龙, 曹灶开, 等. 阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 119-126.
- [4] 裴森龙, 李博, 侯朝勇, 等. 西南天山复杂地层绳索取心钻探跑钻事故处理方法[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 53-58.
- [5] 张彦龙, 葛云华, 张晓林, 等. 钻完井工程技术人工智能专家系统初探[M]. 西安石油大学. 2019油气田勘探与开发国际会议论文集. 西安: 西安石油大学, 2019: 1251-1253.
- [6] 罗光强, 胡郁乐. 科学深钻 DPI-1 智能化多功能钻参仪的研制

- 与应用研究[J].地质与勘探,2014,50(4):777-782.
- [7] 张金昌,尹浩,刘凡柏,等.自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J].地质论评,2022,68(4):1382-1392.
- [8] 鄢泰宁,张涛.超深科学钻探井内钻进数据的采集与传输问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):287-291.
- [9] 汤小仁,孟义泉,瞿兵,等.钻探参数实时采集系统研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):46-53.
- [10] 文浩贤,杜胜,张典,等.地质钻探过程状态监测App软件设计与应用[J].钻探工程,2022,49(4):41-48.
- [11] 鄢泰宁,张杰,方俊,等.基于小波分析的钻探孔内工况识别技术[J].煤田地质与勘探,2010,38(5):77-80.
- [12] 蒲春,赵阳刚,杨斌,等.基于神经网络的钻探事故类型判别模型研究[J].钻探工程,2023,50(S1):555-560.
- [13] 张永勤.论地质钻探技术的担当使命及智能化与绿色发展[J].钻探工程,2023,50(1):5-9.
- [14] 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.
- [15] 张欣,田英英,韩泽龙,等.基于机器学习算法的井漏预测与诊断理论模型研究[J].钻探工程,2022,49(2):58-66.
- [16] 李谦,曹彦伟,朱海燕.基于人工智能的钻速预测模型数据有效性下限分析[J].钻探工程,2021,48(3):21-30.
- [17] 孙建华,刘秀美,王志刚,等.地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):4-9.
- [18] 施健雄,易强忠,夏清阳.矿山地质钻探施工中主要发生的事故类型和防范措施[J].中国金属通报,2022(3):219-221.
- [19] 陈蕊.地质钻探孔内安全评价体系研究[D].北京:中国地质大学(北京):2014.
- [20] 蒲春,赵阳刚,杨科,等.甘肃阳山金矿区碳质千枚岩地层井故分析及预防[J].黄金,2024,45(2):85-88.
- [21] 蒋杰,蒋顶辉.深孔钻进事故处理经验[J].西部探矿工程,2023,35(2):20-22.
- [22] 石逊,刘江,李红梅,等.水平分支注浆孔卡埋钻事故处理实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):33-38.
- [23] 易思琦,魏凯.基于SMOTE欠采样的随机森林卡钻风险评估方法[J].石油地质与工程,2023,37(4):100-103.
- [24] 汤明,叶寒,何世明,等.盐水溢流衍生黏附卡钻的机理研究[J].石油机械,2023,51(4):16-22.
- [25] 姜小龙,袁修锦,陈刚,等.东海某井压差卡钻原因分析及处理措施[J].海洋石油,2018,38(3):70-74.
- [26] 代万庆,赵汉伟.水敏性地层“粘附卡钻”事故的分析与处理[J].矿产勘查,2022,13(7):967-974.
- [27] 谭天一.页岩气水平井砂桥卡钻机理与控制方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2022.
- [28] 肖明君,赵岩,田勇,等.浅析惠水地热勘查DR1孔卡钻事故与处理[J].西部探矿工程,2024,36(1):34-37.
- [29] 刘华东,石现明.键槽卡钻与粘附卡钻产生的原因与预防措施[J].内蒙古石油化工,2013,39(14):81-82.
- [30] 胡郁乐,胡晨,张恒春.钻头泥包原因分析及松科二井防泥包钻井液的应用[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):254-261,268.
- [31] 朱冬钰,赵娟,王海宾.浅谈岩心钻探烧钻事故及预防措施[J].地质装备,2020,21(3):44-46.
- [32] 裴森龙,李高,李博.复杂地层金刚石绳索取芯钻探断钻具事故处理[J].内蒙古煤炭经济,2021(3):182-184.
- [33] 赵涛.红石泉地区复杂漏失地层钻探施工工艺的探索与应用[J].地质装备,2023,24(6):37-42.
- [34] 翟锋锋,雷跃,卿家兵.煤田地质钻探中钻孔漏失及堵漏问题分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(24):141-142.
- [35] 田青.基于机器学习的岩心钻探工况判别模型研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [36] 张杰.孔内典型工况识别技术研究及其在高精度钻参仪中的实现[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [37] 连晓圆.钻井过程中故障检测与诊断方法的研究[D].大连:大连理工大学,2013.

(编辑 荐华)