

# “三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统

戴永寿<sup>1</sup>, 岳炜杰<sup>1,2</sup>, 孙伟峰<sup>1</sup>, 李立刚<sup>1</sup>, 张亚南<sup>3</sup>, 程佳成<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国航空油料有限责任公司北京分公司, 北京 100088;  
3. 青岛鼎信通讯股份有限公司, 山东青岛 266073; 4. 中国石油北京销售公司, 北京 100107)

**摘要:**为解决钻井过程中传统溢流监测实时性和可靠性差的问题,设计开发出一套“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统。该系统针对常规单一参数、单一手段溢流监测实时性低、可靠性差的问题,综合应用微流量、随钻压力(pressure while drilling, PWD)以及综合录井3类参数,通过多参数、多手段相互印证的方式提高溢流监测的实时性与可靠性。提出基于专家系统和改进的贝叶斯判别相融合的溢流等钻井事故判别方法:当缺少训练数据时,应用专家系统判别溢流等钻井事故;当训练数据充足时,应用专家系统和改进的贝叶斯判别相结合识别溢流等钻井事故。改进的贝叶斯判别模型对于因属性变量间不独立而引起的误判具有一定的抑制作用,能够提高判别准确度,且训练简单,应用灵活。通过两种算法的有机结合,优势互补,可以提高井控安全的智能化水平与现场适用性。测试实验结果表明,该系统能够实时、有效地监测溢流等钻井事故。

**关键词:**井喷;溢流监测;专家系统;改进的贝叶斯判别;“三高”油气井

**中图分类号:**TE 28      **文献标志码:**A

**引用格式:**戴永寿,岳炜杰,孙伟峰,等.“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):188-194.

DAI Yongshou, YUE Weijie, SUN Weifeng, et al. Online monitoring and warning system for early kick foreboding on "three high" wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 188-194.

## Online monitoring and warning system for early kick foreboding on "three high" wells

DAI Yongshou<sup>1</sup>, YUE Weijie<sup>1,2</sup>, SUN Weifeng<sup>1</sup>, LI Ligang<sup>1</sup>, ZHANG Yanan<sup>3</sup>, CHENG Jiacheng<sup>4</sup>

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. China Aviation Oil Company Limited Beijing Branch, Beijing 100088, China;

3. Qingdao Topscmm Communication INC, Qingdao 266073, China;

4. China Petroleum Beijing Sales Company, Beijing 100107, China)

**Abstract:** In order to solve the problem about the poor instantaneity and reliability of early kick detection during drilling process by traditional methods, a realtime monitoring and warning system for kick foreboding on "three high" wells was designed and developed. Regarding the above defects of kick detection by conventional means in which only one parameter or one mode was used, the method makes use of three parameters which include micro-flux, pressure while drilling (PWD) and comprehensive logging parameters, and applies the multi-parameter and multi-means to cross-verify and improve the instantaneity and reliability of kick detection. An identification method based on expert system in combination with the improved Bayes discriminant was proposed. If lacking of training data, the method applies expert system to identify kick and other accidents; otherwise it applies expert system combining with the improved Bayes discriminant to identify kick and other accidents. The improved Bayes discriminant model can reduce the misjudgment caused by the attribute variables which are not independent completely, and thus improve the identification accuracy. The application is more flexible, and the training is

收稿日期:2014-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(40974072);中石油“十二五”科技攻关项目(2014D-4601)

作者简介:戴永寿,男(1963-),教授,博士生导师,从事钻井安全信息技术应用与开发领域的研究。E-mail:daiys@upc.edu.cn。

easier. The combination of the two kinds of intelligent algorithms, whose advantages are complementary can improve significantly the intelligent level and applicability. The verification tests show that the system can detect kick and other accidents instantaneously and effectively.

**Keywords:** blowout; kick detection; expert system; improved Bayes discriminant; "three high" wells

井喷是钻井过程中最为严重的钻井事故<sup>[1-2]</sup>,溢流是井喷的先兆,实时准确地监测溢流、防止井喷是安全钻井的前提和保证。及时发现溢流,可避免井喷发生,减轻井喷和压井作业对地下油气层的伤害<sup>[3]</sup>。优化溢流监测方法,提高监测的实时性和可靠性,对实现安全、高效、经济钻井具有重要意义<sup>[4]</sup>。然而,现有的溢流监测方法实时性与可靠性较差,无法满足安全钻井的需要。根据应用的监测技术及参数不同,将溢流监测方法总结为6类:利用钻井液相关参数监测溢流<sup>[5]</sup>;通过综合录井仪采集的相关参数监测溢流<sup>[6]</sup>;声波气侵监测法;基于控压钻井技术监测溢流<sup>[7]</sup>;基于随钻井底测量技术监测溢流<sup>[8]</sup>;分析地层岩性和孔隙度预警溢流<sup>[9]</sup>。其中,基于控压钻井技术监测溢流的效果最好,但其实现难度较大,难以广泛应用。其他监测方法的实时性和可靠性难以同时达到监测要求,或实时性较低,或可靠性较差。为提高溢流监测的时效性,满足钻井安全的需要,亟需一套实现简单,且实时性与可靠性较高的系统实现溢流监测。笔者设计开发出一套“三高”(高温、高压、高含硫)油气井早期溢流在线监测与预警系统,该系统在溢流监测方法与溢流等钻井事故判别方法两个方面做出改进,以提高溢流监测的实时性和可靠性,并基于钻井现场的溢流等异常事故数据完成系统有效性测试实验。

## 1 系统总体方案设计

“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统结合3类溢流监测方法(利用钻井液相关参数监测溢流、通过综合录井仪采集的相关参数监测溢流、基于随钻井底测量技术监测溢流)的优势,综合微流量(钻井液进出口流量)、随钻压力(pressure while drilling, PWD)以及综合录井(立管压力、大钩负荷)3类参数应用于溢流监测。从井底和地面两个方位同时进行,以监测井底环空压力变化为基础,并结合钻井液进出口流量和相关综合录井参数的变化,在地层流体还没有返到地面时,提前发现溢流,提高井喷预警的时效性。微流量数据较常规的流量数据实时性好、准确度高,能及时发现钻井液流量的微小变化,可提高溢流监测的实时性与可靠性。其中,微流

量数据是以RS485串口通信的方式从高准科里奥利质量流量计获取,PWD以及综合录井数据是以网络通信的形式分别从PWD服务器以及综合录井服务器获取。在判别方法方面,通过专家系统和改进贝叶斯判别两种智能算法相融合实现溢流等钻井事故的判别,其结构如图1所示。

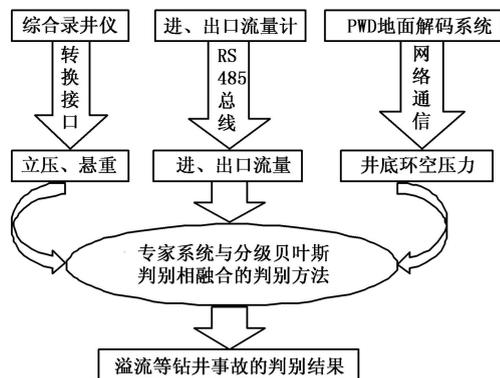


图1 “三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统结构图  
Fig.1 Structure figure of online monitoring and warning system for kick foreboding on “three high” wells

通过上述监测参数的变化,不仅能够监测溢流,还能够实现井漏、放空、卡钻、钻具刺、断钻具、掉水眼以及堵水眼7种溢流相关事故的监测。

利用VC++6.0完成该系统软件的开发。

## 2 溢流等钻井事故判别方法

现有的溢流等钻井事故判别方法可总结为如下5种:阈值法、数学建模法、专家系统、人工神经网络以及贝叶斯判别。阈值法和数学建模法实现简单,应用广泛,但其准确性较低。专家系统的判别准确性有所改善,但由于溢流的模糊性,专家系统仍不能完全准确地判别溢流。人工神经网络与贝叶斯判别均通过现场数据训练得到判别模型,由判别模型给出判别结果,其判别结果相对理想。但是,贝叶斯判别比人工神经网络更能充分利用训练数据,并具有坚实的理论基础<sup>[10]</sup>。

在监测过程中微流量参数、综合录井参数以及PWD参数的变化并非一定是由溢流引起的,如何从变化了的参数中推断出何种异常事故所致,即变为一个求后验概率的问题,贝叶斯判别可以很好地解决这一问题。该判别方法准确性与灵敏度高,能够对干扰

进行自动判断,并给出溢流等事故发生的概率,即选取贝叶斯判别识别溢流等钻井事故最为合适。

贝叶斯判别的应用存在如下不足:

- (1) 贝叶斯判别模型需大量现场数据训练得到。
- (2) 贝叶斯判别模型的准确性与实时性完全取决于训练数据,忽略了先验知识的使用。
- (3) 当地质等条件改变时,训练的贝叶斯判别模型可能产生一定的判别误差,降低判别准确度。

专家系统能够充分利用专家和现场技术人员的先验知识且判别过程无需训练数据,当地质等条件改变时可以通过完善专家知识库来提高溢流等钻井事故的判别准确度。当前的专家系统虽然不能完全准确地判别溢流,但是通过专家系统和贝叶斯判别的有机结合,两种方法优势互补,提高井控安全的智能化水平和现场适用性,从而能够不断丰富积累知识,完善系统性能,提高监测的实时性和准确性。

### 2.1 专家系统判别

不同工况下,溢流等钻井事故的表现形式及可用的溢流监测参数各异,所以不同工况下用于溢流等钻井事故判别的专家知识库和贝叶斯判别模型不

同。从溢流监测的角度出发,将钻井工况划分为钻进、划眼、坐卡、起钻、下钻5种状态。

应用专家系统判别溢流等钻井事故,首先根据相关知识经验建立知识库,知识库建立完成之后,通过高效、合理的推理机实现对溢流等钻井事故的判别。

#### 2.1.1 知识库的建立

针对溢流等钻井事故的判别需要,将总结的经验知识通过一定的表示方式存放在知识库中,以供推理机使用。知识库的建立是一个重要且繁琐的过程,其完善与否直接影响专家系统判别溢流等钻井事故的实时性和准确性。

钻进工况下,监测参数均能够正常获取。划眼工况下,井底环空压力无法准确测量,其他监测参数均能正常获取。起下钻工况下,可用参数只有钻井液进出口流量及大钩负荷。坐卡工况下,只能通过出口钻井液是否溢出判别溢流。上述工况用于溢流等钻井事故判别的知识库可根据表1建立,其中,卡钻是指广义的卡钻事故,包括缩颈卡钻、砂桥卡钻、坍塌卡钻、键槽卡钻、粘吸卡钻、起钻与卡、下钻遇阻等。

表1 专家知识库  
Table 1 Knowledge base

判据		可能发生的事故类型						
		钻进工况		划眼工况		起钻工况	下钻工况	钻卡工况
井底环压	增加	溢流	卡钻					
	缓降	钻具刺	井漏	堵水眼				
	突降	堵水眼	断钻具	井漏				
流量之差	增加	溢流			溢流	溢流	溢流	溢流
	缓降	堵水眼	井漏	堵水眼	井漏		井漏	
	突降	堵水眼	卡钻	井漏	堵水眼	卡钻	井漏	井漏
立管压力	缓增	堵水眼	卡钻	堵水眼	卡钻			
	突增	堵水眼	卡钻	堵水眼	卡钻			
	缓降	溢流	钻具刺	井漏	溢流	钻具刺	井漏	
	突降	掉水眼	断钻具	井漏	掉水眼	断钻具	井漏	
大钩负荷	缓增	溢流						
	突增	放空		卡钻		卡钻		
	缓降						卡钻	
	突降	断钻具		断钻具	卡钻	断钻具	卡钻	

#### 2.1.2 推理机的设计

推理是指依据一定的规则从已有的事实推导出结论的过程。一种钻井事故可能对应多个监测参数的异常变化,且一个监测参数的异常变化可能对应多种钻井事故的发生。为消除上述不确定性,在推理过程中采用多条规则相互印证的方式得到专家系统的判别结果,即取被验证为真的规则结论的交集作为专家系统的判别结果。应用专家系统判别溢流等钻井事故的流程如图2

所示。

### 2.2 改进的贝叶斯判别

首先分析应用传统贝叶斯判别识别溢流等钻井事故存在的问题,然后针对存在的问题对贝叶斯判别做出改进,说明改进贝叶斯判别识别溢流等钻井事故的判别流程及判别结果的求取过程。

#### 2.2.1 传统贝叶斯判别识别

应用于溢流等钻井事故判别的贝叶斯判别模型即贝叶斯公式:

$$p(c_i|X) = \frac{p(X|c_i)p(c_i)}{p(X)} \quad (1)$$

式中,  $c_i$  为某种钻井事故;  $X$  为用于溢流监测的属性变量集;  $p(c_i)$  为某种钻井事故发生的概率;  $p(X)$  为属性变量集为  $X$  的概率;  $p(X|c_i)$  为某种钻井事故发生的条件下属性变量集为  $X$  的概率, 由训练数据统计求得;  $p(c_i|X)$  为某种钻井事故发生概率。

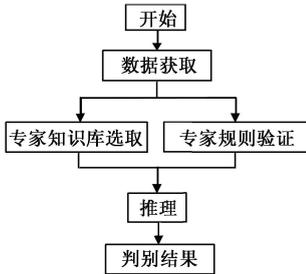


图 2 专家系统判别溢流等钻井事故的流程图  
Fig. 2 Flowchart of applying expert system to identify kick and other accidents

传统的贝叶斯判别应用于溢流等钻井事故判别的过程中仍存在如下问题:

- (1) 由于当溢流等事故发生时, 会引起多个参数的变化, 即选取的属性变量间不独立, 这使得贝叶斯判别模型的训练非常复杂, 难以在实际工程中应用。
- (2) 不同钻井事故所需监测参数不同, 且不同参数监测异常事故的实时性和可靠性不同, 应用传统贝叶斯判别会产生冗余的属性变量, 降低判别精度。

### 2.2.2 分级贝叶斯判别

为解决上述问题, 在朴素贝叶斯判别的基础上, 提出了一种改进的贝叶斯判别——分级贝叶斯判别。分级贝叶斯判别原理与传统贝叶斯判别相同, 但根据不同钻井事故的监测需要以及监测参数的实时性和可靠性不同, 分级应用贝叶斯判别识别溢流等钻井事故。贝叶斯判别级别由选取的属性变量决定, 且每级贝叶斯判别所识别的钻井事故类型不同。在判别过程中, 逐级确认异常, 给出判别结果。

分级贝叶斯判别应用灵活, 训练简单, 对于因属性变量间不完全独立而引起的误判具有一定的抑制作用, 提高了判别准确度。基于分级贝叶斯判别的溢流等钻井事故判别流程如图 3 所示。

根据所选取的监测参数, 可通过四级贝叶斯判别识别溢流等钻井事故, 第一级到第四级贝叶斯判别的属性变量分别为: 钻井液出口与入口流量之差、井底环空压力变化率、立管压力变化率、大钩负荷变化率。

应用分级贝叶斯判别模型识别溢流等钻井事故

的实现流程如图 4 所示。

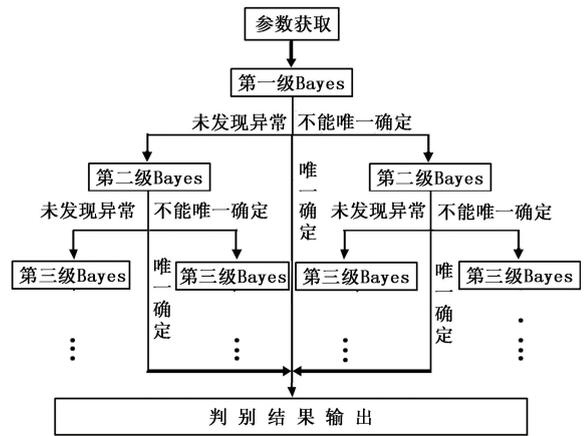


图 3 基于分级贝叶斯判别的溢流等钻井事故判别流程图

Fig. 3 Identifying flowchart of kick and other accidents based on hierarchical Bayes discriminant

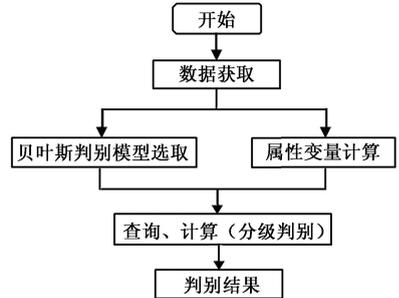


图 4 应用分级贝叶斯判别模型识别溢流等钻井事故流程图

Fig. 4 Flowchart of applying hierarchical Bayes discriminant model to identify kick and other accidents

第一级贝叶斯判别反映的事故有溢流、井漏、堵水眼、卡钻, 且能够唯一确定溢流事故, 但由于井漏、堵水眼以及卡钻事故的严重程度不同, 会导致钻井液出口与入口流量之差的取值各异, 且变化范围较大, 所以该级贝叶斯判别难以准确地唯一确定井漏、堵水眼和卡钻事故。

第二级贝叶斯判别反映的事故有溢流、卡钻、钻具刺、井漏、堵水眼、断钻具。同样由于各事故的严重程度不同, 会导致井底环空压力的异常增加或减小值不同, 所以该级贝叶斯判别难以准确地唯一确定某种异常事故, 只能将可能发生的异常进行分类。

第三级贝叶斯判别能够反映的事故有堵水眼、卡钻、溢流、钻具刺、井漏、掉水眼以及断钻具。该级贝叶斯判别与第二级类似, 不能准确地唯一确定某种异常事故, 只能将可能发生的异常进行分类。第四级贝叶斯判别反映的事故有断钻具、溢流、放空、卡钻, 能够唯一确定放空、断钻具以及卡钻事故。

根据各工况下可用的监测参数,将对级别的贝叶斯判别组合应用,得到各工况下的分级贝叶斯判别模型。以钻进工况为例,钻进工况的分级贝叶斯判别模型如图5所示。其中, $F$ 为钻井液出口与

入口流量之差; $P$ 、 $S$ 、 $H$ 分别为井底环空压力、立管压力、大钩负荷变化率。其他工况(如划眼、起下钻、坐卡等)的分级贝叶斯判别模型与钻进工况相类似,不再赘述。

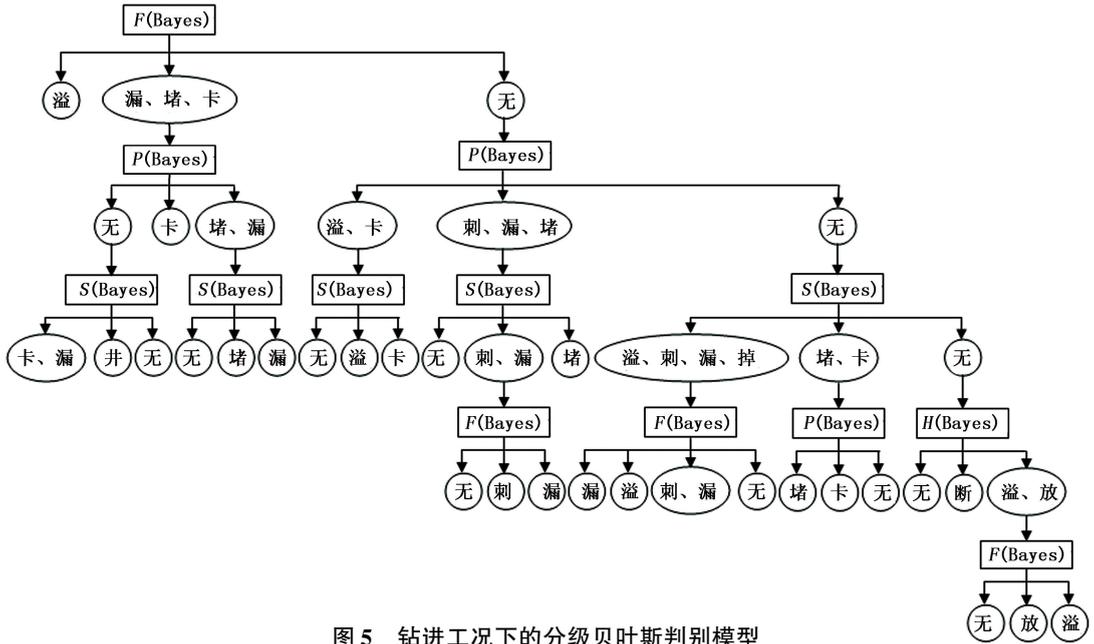


图5 钻进工况下的分级贝叶斯判别模型

Fig. 5 Hierarchical Bayes discriminant model on drilling

2.2.3 溢流等钻井事故发生的概率

分级贝叶斯判别的结果是给出钻井事故发生的概率,求取过程如下。

首先由下式求得各级贝叶斯判别的结果:

$$p(c_i/x) = \frac{p(c_i)p(x/c_i)}{p(x)} \quad (2)$$

式中, $x$ 为属性变量。

对于相同的属性变量, $p(x)$ 是相同的,即每种钻井事故的发生概率只需求取 $p(c_i)p(x/c_i)$ 。对所有的 $p(c_i)p(x/c_i)$ 做归一化处理便可得到各级贝叶斯判别所求得的钻井事故发生概率。

最终概率可以通过各级贝叶斯判别得到的概率相乘并做归一化处理得到。

$$f(c_i/x) = p(c_{i_1}/x)p(c_{i_2}/x) \cdots p(c_{i_n}/x) \quad (3)$$

式中, $p(c_{i_n}/x)$ 为第 $n$ 级贝叶斯判别求得的某种钻井事故发生的概率。

$$p(c_i/x) = f(c_i/x) / \sum_{j=1}^s f(c_{j_i}/x) \quad (4)$$

式中, $p(c_i/x)$ 为钻井事故发生的概率; $s$ 为可能发生的钻井事故种类之和。

2.3 专家系统和改进贝叶斯判别相融合的判别流程

通过专家系统和分级贝叶斯判别相融合识别溢流等钻井事故的流程如图6所示。

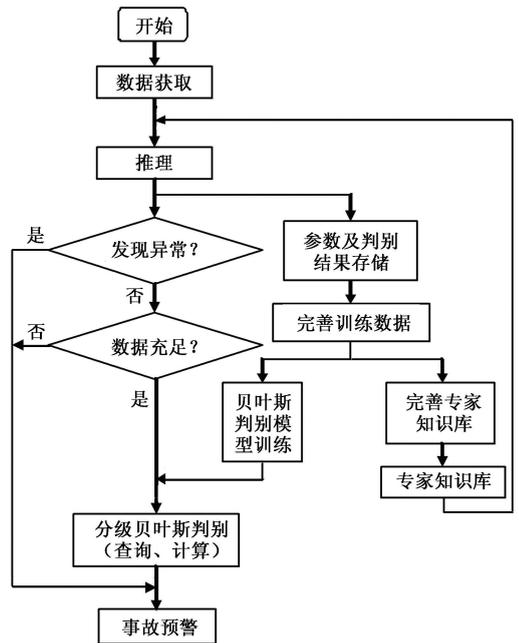


图6 专家系统和分级贝叶斯判别识别溢流等钻井事故流程图

Fig. 6 Flowchart of applying expert system combining with hierarchical Bayes discriminant to identify kick and other accidents

专家系统和分级贝叶斯判别的融合主要体现在两个方面:

(1) 当缺少现场数据时,应用专家系统判别溢流等钻井事故,并且在监测过程中实时存储、完善现场数据,为贝叶斯模型提供训练数据。

(2) 当现场数据充足时,通过两种方法相结合实现溢流等钻井事故的判别。

### 3 测试实验及其结果分析

为验证系统能够实时、有效地发现溢流等钻井事故,基于钻井现场的溢流及断钻具事故数据进行了测试实验。

(1) 基于某口井钻进过程中的溢流事故数据,通过“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统软件得到该溢流事故的实验截图,如图 7 所示。

系统在 10:19 监测到出口流量增加,进行溢流报警。总池体积在 10:24 发现上涨,预警时间比传统的监测总池体积的方法提前了 5 min。

由于系统软件只能以声光报警的形式给出井漏、断钻具等事故的预警,为更加直观形象地呈现实验结果,将该系统软件在 Matlab 中实现。

(2) 基于某口井钻进过程中断钻具事故数据,进行系统有效性测试的 Matlab 实验分析,图 8 为该断钻具事故实验的关键曲线。

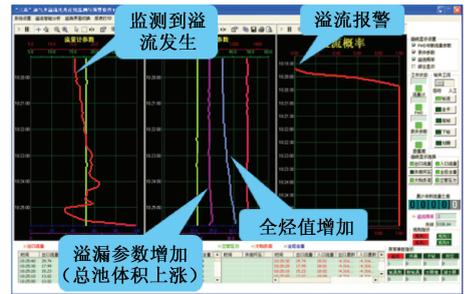
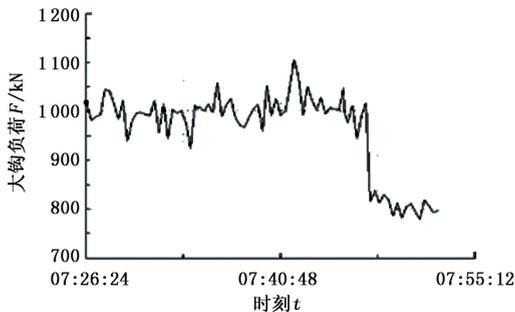
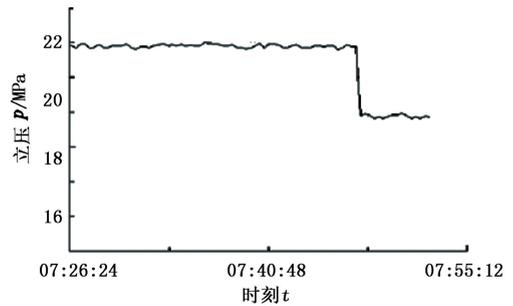


图 7 溢流事故测试实验截图

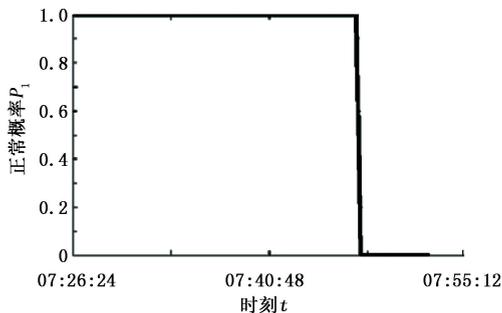
Fig.7 Screenshot of test experiment on kick



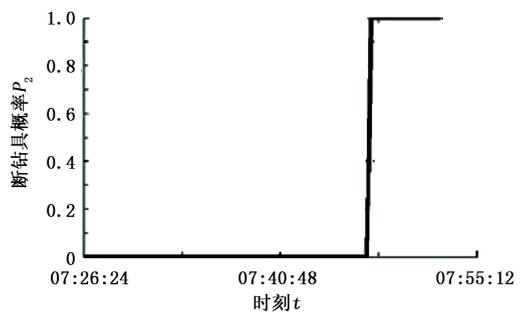
(a) 大钩负荷变化曲线



(b) 立管压力变化曲线



(c) 正常钻进概率曲线



(d) 断钻具概率曲线

图 8 断钻具事故测试实验关键曲线

Fig.8 Curves of test experiment on string parted

由上述曲线可知,当断钻具发生时,系统能够实时监测到异常,给出预警。

(3) 通过某口井划眼过程中的溢流事故数据,进行溢流等钻井事故判别方法有效性验证的 Matlab 仿真实验分析,图 9 为该溢流事故仿真实验的关键曲线截图。

系统在 12:06 监测到出口流量增加,进行溢流报警。总池体积在 12:11 发现上涨,预报时间比传统的监测总池体积的方法提前了 5 min。

综上所述,“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统能够实时、有效地监测到溢流等钻井事故。

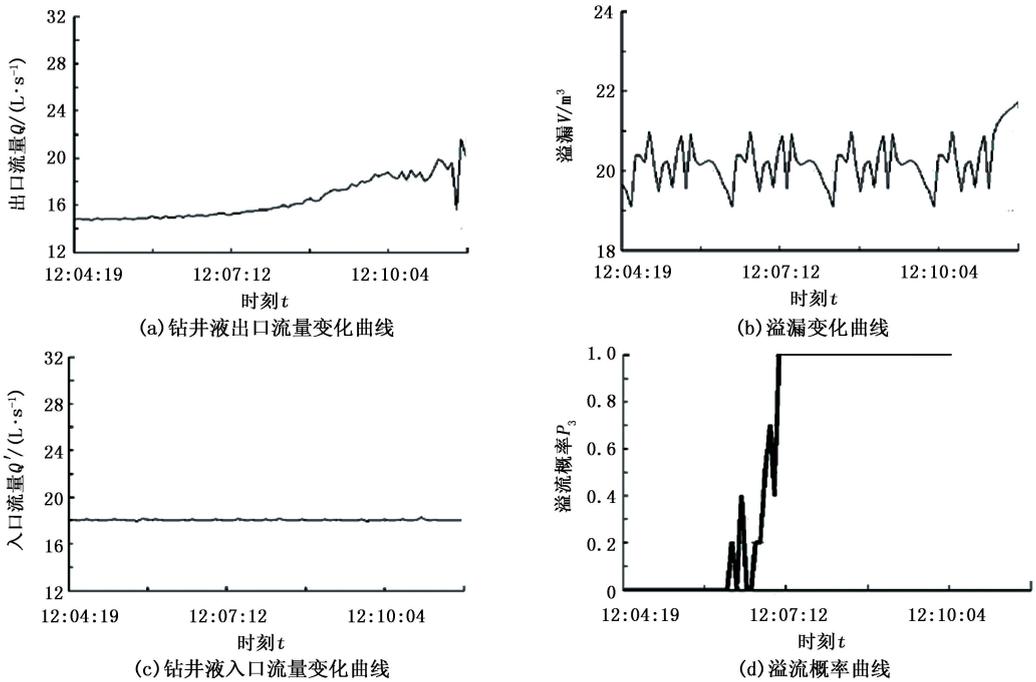


图9 划眼中溢流事故测试实验关键曲线

Fig.9 Curves of test experiment on kick of reaming

### 4 结束语

为提高溢流监测的实时性和可靠性,本文中设计开发了“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统。该系统在溢流监测方法和溢流等钻井事故判别方法方面做出改进,综合应用PWD、微流量以及综合录井3类参数,并结合专家系统和改进的贝叶斯判别相融合的判别方法实现溢流等钻井事故的监测以及实验测试。实验结果表明,该系统能够实时、有效地监测溢流等钻井事故。

### 参考文献:

[1] 蒋希文. 钻井事故与复杂问题[M]. 北京:石油工业出版社,2006:319-323.  
 [2] 王建党,万建仓,沈慧. 钻井工程[M]. 北京:石油工业出版社,2008:298-302.  
 [3] 刘汝山,曾义金. 钻井井下复杂问题预防与处理[M]. 北京:中国石化出版社,2010:2-5.  
 [4] HELIO S, ERDEM C, JOE K, et al. Kick detection and control in oil-based mud; real well test results using micro-flux control equipment[R]. SPE 105454, 2007.  
 [5] CHEMALI R E, VOLKER K, ROCCO D. Early kick detection in an oil and gas well: US, 076464 [P]. 2007-08-22.  
 [6] 廖明燕. 钻井过程实时状态监测与诊断技术研究[D].

青岛:中国石油大学信息与控制工程学院,2010.  
 LIAO Mingyan. Real-time drilling process state monitoring and diagnosis[D]. Qingdao: College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, 2010.  
 [7] GRAVDAL J E, NIKOLAOU M, BREYHOLTZ Y, et al. Improved kick management during MPD by real-time pore-pressure estimation [J]. SPE Drilling & Completion, 2010,54(2):577-584.  
 [8] ZHOU J, NYGARRD G, GODHAVN J M. Adaptive observer for kick detection and switched control for bottom hole pressure regulation and kick attenuation during managed pressure drilling: proceedings of American Control Conference[C]. Baltimore, MD, USA: Society of Petroleum Engineers, c2010 .  
 [9] 王果,刘建华,丁超,等. 控压钻井条件下井深结构优化设计[J]. 石油学报,2013,34(3):545-549.  
 WANG Guo, LIU Jianhua, DING Chao, et al. Casing program optimization with the managed pressure drilling technique[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(3):545-549.  
 [10] TSAY R, ANDO T. Bayesian panel data analysis for exploring the impact of subprime financial crisis on the US stock market[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2012,56(11):3345-3365.

(编辑 修荣荣)