文章编号:1673-5005(2019)02-0091-06

基于不确定性分析的钻井工程风险定量评价方法

胜亚楠1,管志川1,罗鸣2,李文拓2,许玉强1

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘要:为建立一套适用于复杂地质环境的钻井工程风险定量评价方法,首先分析地层压力和钻井液循环当量密度的 不确定性,得到地层压力和钻井液循环当量密度的概率分布;在此基础上,基于广义应力与强度干涉理论,将广义应 力定义为致险因子,即钻井液循环当量密度;将广义强度定义为安全因子,即地层压力;将功能函数定义为井下复杂 与事故的风险函数;最终推导建立钻井工程风险概率计算公式,运用该方法可以定量计算钻井作业中危险井段发生 风险的概率值。实例分析结果表明风险评价结果与实际发生风险相吻合。

关键词:钻井风险评价;含可信度地层压力;不确定性;蒙特卡洛模拟

中图分类号:TE 21 文献标志码:A

引用格式:胜亚楠,管志川,罗鸣,等.基于不确定性分析的钻井工程风险定量评价方法 [J].中国石油大学学报(自然 科学版),2019,43(2):91-96.

SHENG Yanan, GUAN Zhichuan, LUO Ming, et al. A quantitative evaluation method of drilling risks based on uncertainty analysis theory [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019, 43(2):91-96.

A quantitative evaluation method of drilling risks based on uncertainty analysis theory

SHENG Yanan¹, GUAN Zhichuan¹, LUO Ming², LI Wentuo², XU Yuqiang¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Zhanjiang Branch, CNOOC (China) Company Limited, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: In order to establish a quantitative evaluation method of drilling risks, firstly, the uncertainty of the formation pressure and the equivalent circulation density of drilling fluids were analyzed and the probability distributions of formation pressure and equivalent circulation density of drilling fluids were obtained. Then based on the theory of generalized stress and strength interference, a quantitative evaluation method of drilling risks was established. In this method, the generalized stress is defined as the risk factor, which is the equivalent circulation density of drilling fluid. The generalized intensity is defined as the safety factor, which is the formation pressure. A risk function is also defined. The results of case studies indicate that this method can be used to predict the probability of the drilling risks, which were in good agreement with the actual drilling scenarios.

Keywords: drilling risk evaluation; formation pressure with credibility; uncertainty; Monte Carlo simulation

海上及深井复杂地层钻井具有高投入、高风险 的特点^[1-3],钻井地质力学参数的不确定性^[4-6]、地 层压力预测结果的误差、方案设计不合理及施工环 节失误等都会导致钻井风险的发生。国内外学者对 于钻井风险进行了长期的研究,建立了层次分析法、 故障树法、人工神经网络法等^[7-11]。传统方法得到 的结果多为定性或半定量,工程实践表明,定性或半 定量的评价结果无法满足海上或深井复杂地层高风

作者简介:胜亚楠(1989-),男,博士研究生,研究方向为钻井工程风险评价,井身结构优化设计。E-mail:shengyanan_upc@163.com。

通讯作者:管志川(1959-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为超深井及深水钻井井下信息与控制、井筒多相流及工程风险评价。E-mail:guanzhch@upc.edu.cn。

收稿日期:2018-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51574275);"十三五"中国海洋石油总公司科技重大项目(CNOOC-KJ 135 ZDXM 24 LTD ZJ 01)

险钻井施工作业的安全要求。因此有必要建立一 套适用于复杂地质环境的钻井工程风险定量评价 方法。笔者首先分析引发钻井风险主要因素之一 的地层压力预测结果的不确定性,构建含可信度 地层压力;然后,基于蒙特卡洛模拟方法构建钻井 液循环当量密度的概率分布;最后,基于广义应力 与强度干涉理论建立钻井工程风险定量计算模型 并进行实例应用。

1 地层压力不确定性

地层压力预测结果的不确定性是导致钻井工程 风险发生的主要因素之一,针对这一问题笔者提出了 含可信度地层压力剖面的建立方法^[12]。基于这种方 法预测的地层压力不再是单一定值,而是具有可信度 的概率分布区间,这样能够使工程人员更好地把握地 层压力信息。具体求取流程如图1所示。



图1 含可信度地层压力求取流程

Fig. 1 Calculation flowchart of formation pressure profile with credibility

图 1 中, G_p 、 G_0 和 G_h 分别为地层孔隙压力梯 度、上覆岩层压力梯度和静液柱压力梯度, g/cm²; V_n 为计算点对应的正常趋势线的参数值; n 为 Eaton 指 数; V_{max} 和 V_{min} 分别为孔隙度为零和刚性为零时的岩 石声速, m/s; V_{int} 为层速度, m/s。

2 钻井液循环当量密度不确定性

钻井液的当量循环密度(equivalent circulating density, ECD)可以定义为钻井液当量静态密度与钻井液动造成的环空压降之和,计算式为

$$Q_{\rm ECD} = Q_{\rm ESD} + \frac{\Delta p_{\rm f}}{0.009\,81H}.$$
 (1)

式中,H为井深,m; Q_{ESD} 和 Q_{ECD} 分别为井深H处的 钻井液当量静态密度和当量循环密度, g/cm^3 ; Δp_f 为井深H处环空压力损耗,MPa。

钻井液当量静态密度和环空压耗的计算模型有 很多^[13-18],不再累述。ECD 的不确定性会引起钻井 风险的发生^[19],基于 Monte-Carlo 模拟建立 ECD 概 率分布的求解方法。Monte-Carlo 模拟是求解工程 技术问题近似解的一种数值计算方法,它以统计抽 样理论为基础利用随机数进行抽样实验或随机模 拟,通过对有关的随机变量进行统计,以求得统计特 征值作为待解问题的数值解。

定义 x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 个相互独立的 ECD 计 算模型中的直接测量参数,则间接测量参数 $Y(代 表 ECD) 与 \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 之间的函数关系为 $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。ECD 不确定性定量描述具体步骤如下:

(1)确定直接测量参数概率分布函数 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ 。

(2)根据精度要求确定模拟次数 N,产生符合
 各直接参数概率分布特性的 N 个随机数样本 X₁,
 X₂,…,X_N,其中,X_i=[x_{1i},x_{2i},…,x_{ni}],(1<*i*<N)。

(3)将随机样本 X_i = [x_{1i}, x_{2i}, …, x_{ni}], (1<*i*<*N*)
 代入 ECD 公式中, 计算得到 Y = [Y₁, Y₂, …, Y_N]。

(4)对 Y=[Y₁,Y₂,…,Y_N]进行分析,利用正态

信息扩散方法确定 ECD 的概率分布 f(y)。

3 钻井工程风险定量评价方法

基于广义应力与强度干涉理论建立钻井工程风 险定量评价方法。在广义应力与强度干涉理论 中^[20],将导致系统失效的因素定义为广义应力,将 阻止系统失效的因素定义为广义强度,广义应力与 广义强度之间的函数关系为功能函数,通过分析功 能函数可以确定系统的可靠度或失效概率。基于广 义应力与强度干涉理论,将广义应力定义为致险因 子,即钻井液当量循环密度;广义强度定义为安全因 子,即地层压力:将功能函数定义为井下复杂与事故 的风险函数。以井涌风险为例具体阐述:钻井液的 功能通常是指钻井液的工作性能,可靠性的工作重 点是钻井液维持井底压力。描述钻井液功能的参数 为可靠度的随机变量,根据应力-强度分布干涉理 论可知,可靠度是指钻井液功能不失效的概率,即钻 井液当量循环密度大于地层孔隙压力的概率 P, 计 算公式为

R=P(Q>S)=P(Q-S>0)=P(Q/S>1). (2) 式中,Q 为钻井液当量循环密度;S 为地层孔隙压 力;R 为可靠度。

如果能满足式(2),则可保证钻井液维持井底 压力平衡的功能可靠,否则就会引发钻井风险。



如图 2 所示,钻井液当量循环密度 Q 和地层孔

Fig. 2 Interference model principle between distribution of pore pressure and ECD

隙压力 S 均呈一定的概率分布状态,当两个概率分 布发生干涉(尾部发生重叠)时,阴影部分表示钻井 工程风险发生的概率。由于钻井液功能的可靠度与 风险概率为互逆事件,则有

F = 1 - R.

式中,F为钻井工程风险发生概率。

为了计算钻井工程风险发生的概率,把图 2 中的干涉部分放大如图 3 所示。

确定钻井液功能可靠度的基本思路是,在危险 井深处,当给定的钻井液当量循环密度 Q 大于地层 孔隙压力值 S 时,钻井风险不发生。由图 3 可知,地 层孔隙压力值 S_1 存在于区间 $\left[S_1 - \frac{dS}{2}, S_1 + \frac{dS}{2}\right]$ 内的 概率等于面积 A_1 ,即

$$P\left(S_1 - \frac{\mathrm{d}S}{2} \leq S_1 \leq S_1 + \frac{\mathrm{d}S}{2}\right) = f(S_1) \,\mathrm{d}S = A_1. \tag{4}$$



Fig. 3 Interference area between pore pressure and ECD

同时,钻井液当量循环密度 Q 超过地层孔隙压力 S_1 的概率为阴影面积 A_2 ,即

$$P(Q > S_1) = \int_{S_1}^{\infty} f(Q) \, \mathrm{d}Q = A_2.$$
 (5)

式(4)和(5)表示的是两个独立的事件各自发 生的概率,这两个事件同时发生的概率是可靠度概 率,根据概率乘法法则推导,得

$$dR = A_1 A_2 = f(S_1) dS \times \int_{S_1}^{\infty} f(Q) dQ.$$
 (6)

钻井液功能的可靠度为钻井液当量循环密度大 于所有可能的地层孔隙压力 S 的概率,

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}R = \int_{-\infty}^{\infty} f(S) \left[\int_{S}^{\infty} f(Q) \,\mathrm{d}Q \right] \mathrm{d}S.$$
(7)

同理,如从地层孔隙压力*S*小于给定的钻井液当量循环密度 Q_1 出发,在给定的钻井液当量循环密度 0,存在于区间 $\left[O_1 - \frac{dQ}{d}, O_1 + \frac{dQ}{d} \right]$ 内的概率为

$$P\left(Q_{1} - \frac{dQ}{2} \le Q_{1} \le Q_{1} + \frac{dQ}{2}\right) = f(Q_{1}) dQ = A'_{1}.$$
 (8)

同时,地层孔隙压力 S 小于钻井液当量循环密

度 Q₁ 的概率为

$$P(S < Q_1) = \int_{-\infty}^{Q_1} f(S) \, \mathrm{d}S = A'_2. \tag{9}$$

式(8)和(9)表示的也是两个同时发生的独立 事件,于是钻井液当量循环密度为 Q₁时的可靠度概 率为这两个概率的乘积,即为

$$dR = A'_{1} A'_{2} = f(Q_{1}) dQ \times \int_{-\infty}^{Q} f(S) dS.$$
(10)

钻井液功能的可靠度为所有可能的钻井液当量 循环密度的不失效概率,

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}R = \int_{-\infty}^{\infty} f(Q) \left[\int_{-\infty}^{Q} f(S) \,\mathrm{d}S \right] \mathrm{d}Q. \quad (11)$$

需要指出的是,钻井液当量循环密度 Q 和地层 孔隙压力 S,各自都包含有随机变量参数,

$$Q = Q(x_{Q1}, x_{Q2}, \cdots, x_{Qn}), \qquad (12)$$

$$S = S(x_{S1}, x_{S2}, \cdots, x_{Sn}).$$
(13)

式中,x_{Qi}为钻井液当量循环密度有关的变量,如钻 井液静态密度、环空压耗、井筒温度和压力等;x_{si}为 地层孔隙压力的变量,如上覆岩层压力梯度、伊顿指 数、声波测井和正常压实趋势线等。计算时需要将 各个参数的随机分布考虑进去。由此,钻井液功能 的可靠度和失效概率可以表示为

$$R = P(Z > 0) = \int_0^\infty f(Z) \, \mathrm{d}Z = \int_0^\infty \int_0^\infty f_\mathrm{R}(Z + S) f_\mathrm{S}(S) \, \mathrm{d}S \mathrm{d}Z, \tag{14}$$

 $F = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^{0} f(Z) dZ = \int_{-\infty}^{0} \int_{-Z}^{\infty} f_{R}(Z + S) f_{S}(S) dS dZ.$ (15)

由式(14)和(15)可知,只要确立了钻井液当量 循环密度和地层孔隙压力的概率分布参数,就可以 得到钻井风险发生概率。假设钻井液当量循环密度 随机变量 Q 与地层孔隙压力 S 随机变量均满足正 态分布,二者的概率密度函数分别为

$$f_{Q}(Q) = \frac{1}{\sigma_{Q}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_{Q}}{\sigma_{Q}}\right)^{2}\right], -\infty <\sigma_{Q} < +\infty ,$$
(16)

$$f_{\rm s}(S) = \frac{1}{\sigma_{\rm s}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}}\right)^2\right], \ -\infty <\sigma_{\rm s} < +\infty. \ (17)$$

式中, u_q 、 u_s 、 σ_q 和 σ_s 分别为钻井液当量循环密度 Q和地层孔隙压力S的均值和标准差。

由概率分析与统计原理可知,在钻井液当量循 环密度随机变量 Q 与地层孔隙压力 S 均为正态分 布时,干涉随机变量 Z=Q-S 也为正态分布,其概率 密度函数为

$$f(Z) = \frac{1}{\sigma_{\rm Z} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - \mu_{\rm Z}}{\sigma_{\rm Z}}\right)^2\right], -\infty < \sigma_{\rm Z} < +\infty.$$
(18)

其中

$$\mu_{\rm Z} = \mu_{\rm S} - \mu_{\rm Q}, \ \sigma_{\rm Z} = \sqrt{\sigma_{\rm S}^2 + \sigma_{\rm Q}^2}.$$

当 *Q>S* 或 *Q-S>0* 时钻井安全,故可靠度 *R* 表达式为

$$R = P(Z > 0) = \int_0^\infty f(Z) \, \mathrm{d}Z =$$
$$\int_0^\infty \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right]. \tag{19}$$

钻井工程风险发生的概率与可靠度是互逆概率,即钻井工程风险概率 *F* 为

$$F = 1 - R = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right].$$
(20)

4 实例计算结果分析

N1 并是 Madura BD 气田内一口高温高压井,选 取该区块内与 N1 并具有相似构造的 4 口已钻井 BD-1、BD-2、CD-1 和 XX-1 井,收集这 4 口井的测 井资料,得到 4 口井钻井地质力学参数的测井解释 结果。根据地层压力不确定性分析方法得到了井深 1 800 m 处的地层孔隙压力及地层破裂压力概率分 布,并通过概率分布函数估计判定二者均满足正态 分布,结果如图 4 所示。

基于建立的 ECD 不确定性分析方法,得到井深 1800 m 处 ECD 的概率分布,并通过概率分布函数 估计得到 ECD 的正态分布拟合函数,ECD 的概率分 布如图 5 所示。

查阅该井的钻井日报可知:在井深1800 m 处 实际钻井过程中发生了井涌风险未发生井漏风险。 根据建立的方法,定量计算该井深位置上的钻井工 程风险发生概率,并与实际情况进行对比。

在井深 1 800 m 位置上, 地层孔隙压力概率分 布特征参数为 $u_s = 1.69 \ \sigma_s = 0.015$; ECD 概率分布 特征参数为 $u_q = 1.85 \ \sigma_q = 0.041$ 。地层孔隙压力的 分布区间为[1.65,1.75], ECD 的分布区间为[1.7, 2.0], 二者发生干涉说, 明可能有井涌风险发生, 结 果如图 6 所示。根据推导建立的风险定量计算模 型, 通过编程计算得到钻井工程风险发生概率为 0.75。实际钻井过程中,该位置发生了井涌风险,风 险评价结果与实际相符。



图4 地层孔隙压力和破裂压力概率分布

Fig. 4 Probability distribution of formation pore pressure and fracture pressure





在井深1800 m 位置上,地层破裂压力的分布 区间为[2.2,2.8],ECD 的分布区间为[1.7,2.0], 二者未发生干涉,说明没有发生风险,如图7所示。 实际钻井过程中未发生井漏风险,风险评价结果与 实际相符。



5 结束语

将不确定性分析方法、蒙特卡洛随机模拟方法、 广义应力与强度干涉理论结合起来用于钻井工程风 险定量计算。通过分析地层压力和钻井液循环当量 密度的不确定性,得到了地层压力和钻井液循环当量 重度的概率分布;在此基础上,基于广义应力与强 度干涉理论,将广义应力定义为致险因子,即钻井液 循环当量密度;将广义强度定义为安全因子,即地层 压力;将功能函数定义为井下复杂与事故的风险函 数;最终推导建立了钻井工程风险概率计算公式。 现场实例表明运用构建的模型及方法可以预测得到 钻井过程中危险井段发生风险的概率,预测结果与 实际钻井风险相互吻合,验证了方法的可靠性。

参考文献:

[1] 蒋希文.钻井事故与复杂问题[M].2版.北京:石油工 业出版社,2006:72-80.

- [2] 陈庭根,管志川.钻井工程理论与技术[M].东营:石 油大学出版社,2000;51-54.
- [3] OTTESEN S, ZHENG R H, MCCANN R C. Borehole stability assessment using quantitative risk analysis [R]. SPE 52864, 1999.
- [4] MOOS D, PESKA P, FINKBEINER T, et al. Comprehensive wellbore stability analysis utilizing quantitative risk assessment [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2003,38(3):97-109.
- [5] UDEBUNA J. Improved well design with risk and uncertainty analysis [D]. Stavanger: University of Stavanger Norway, 2015.
- [6] 魏凯,管志川,马金山,等.钻井地质参数的不确定性 表征及分析方法[J].中国石油大学学报(自然科学 版),2015,39(5):89-93.

WEI Kai, GUAN Zhichuan, MA Jinshan, et al. Assessment method for uncertainty of geological parameters in well drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):89-93.

- [7] 何沙,王志明. 基于层次分析法的高含硫气井钻井风 险评价研究[J]. 钻采工艺,2010,33(2):28-37.
 HE Sha, WANG Zhiming. High sour gaswell risk assessment based on analytic hierarchy process [J]. Drilling & Production Technology,2010,33(2):28-37.
- [8] 管志川,胜亚楠,许玉强,等.基于 PSO 优化 BP 神经网 络的钻井动态风险评估方法[J].中国安全生产科学 技术,2017,13(8):5-11.

GUAN Zhichuan, SHENG Yanan, XU Yuqiang, et al. Dynamic risk assessment method of drilling based on PSO optimized BP neural network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017,13(8):5-11.

 [9] 袁智,汪海阁,王海强,等.基于事故树分析的钻井井 漏事故危险评价研究[J].中国安全科学学报,2010, 20(3):107-112.

YUAN Zhi, WANG Haige, WANG Haiqiang, et al. Application of fault tree analysis to risk assement of lost circulation hazards in drilling [J]. China Safe Science Journal, 2010,20(3):107-112.

- [10] KHAKZAD J, NIMA F, AMYOTTE P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: a bayesian approach [J]. International Journal of Project Management, 2013,31(2):449-458.
- [11] 管志川,魏凯,傅盛林,等. 基于区间分析的钻井工程
 风险评价方法[J]. 石油钻探技术,2013,41(4):15-18.

GUAN Zhichuan, WEI Kai, FU Shenglin, et al. Risk evaluation method for drilling engineering based on interval analysis [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4):15-18.

- [12] 胜亚楠,管志川,赵廷峰.含可信度的地层压力求取 方法研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(2):37-42.
 SHEGN Yanan, GUAN Zhichuan, ZHAO Tingfeng.
 Study on method of determining the formation pressure with credibility [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(2):37-42.
- [13] SUBRAMANI R, AZAR J. Experimental study on friction pressure drop for non-Newtonian drilling fluids in pipe and annular flow [J]. Journal of Physics and Chemistry, 2000,13(5):52-59.
- [14] 彭齐,樊洪海,周号博. 同流变模式钻井液环空层流 压耗通用算法[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6): 752-756.
 PENG Qi, FAN Honghai, ZHOU Haobo. General meth-

od of calculating annular laminar pressure drop of drilling fluids with different rheological models [J]. Petroleum Exploration & Development, 2013,40(6):752-756.

- [15] 王鄂川,樊洪海,党杨斌.环空附加当量循环密度的 计算方法[J]. 断块油气田,2014,21(5):671-674.
 WANG Echuan, FAN Honghai, DANG Yangbin. Calculation method of additional equivalent circulating density [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(5): 671-674.
- [16] 张金波,鄢捷年.高温高压钻井液密度预测新模型的 建立[J].钻井液与完井液,2006,23(5):1-3.
 ZHANG Jinbo, YAN Jienian. The construction of a new model predicting HTHP mud density [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(5):1-3.
- [17] 郭建华,李黔,高自力.高温高压井 ECD 计算[J]. 天 然气工业,2006,26(8):72-74.
 TUO Jianhua, LI Qian, GAO Zili. ECD computation for HTHP wells [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(8): 72-74.
- [18] 赵胜英,鄢捷年,王利国.高温高压条件下钻井液当量静态密度预测模型[J].石油钻探技术,2009,37
 (3):48-52.

ZHAO Shengying, YAN Jienian, WANG Liguo. Prediction model of ECD density at HTHP [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(3):48-52.

- [19] MOSTAFAV V, AADNOY B S, HARELAND G. Model based uncertainty assessment of wellbore stability analyses and downhole pressure estimations [J]. Journal of American Rock Mechanics, 2011, 33(8):46-59.
- [20] SUNDARARAJA C, WITT F J. Probabilistic structural mechanics handbook [M]. Berlin: Springer, 1995:80-92.

(编辑 李志芬)