

基于区间分析的钻井工程风险评价方法

管志川¹, 魏 凯^{1,2}, 傅盛林¹, 赵廷峰¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油渤海钻探工程有限公司, 天津 300280)

摘 要:针对钻井基础信息参数存在不确定性的问题,以区间分析方法和可靠性理论为基础,通过分析钻井过程中井下故障发生的力学致险机理,建立了钻井工程风险的非概率可靠性评价方法。该方法只需根据先验信息确定出井下故障的风险评价函数和风险因素的上下界,即可进行风险系数计算。确定了几种常见井下故障的风险评价函数,根据区间变量运算法则推导出了风险系数表达式。以西部某区块的 W 井为例进行了验证分析,结果表明,该方法计算简便、实用,能够满足工程实际需要。

关键词:钻井工程 钻井参数 不确定性 区间数学 风险分析 风险系数

中图分类号:TE28⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)04-0015-04

Risk Evaluation Method for Drilling Engineering Based on Interval Analysis

Guan Zhichuan¹, Wei Kai^{1,2}, Fu Shenglin¹, Zhao Tingfeng¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300280, China)

Abstract: In view of the uncertainty in basic drilling parameters, through the analysis of mechanical risk mechanism of downhole accidents in drilling, non-probabilistic reliability evaluation method was established for drilling engineering risk based on interval analysis method and reliability theory. This method could calculate risk factor after risk evaluation function and the upper and lower bounds of risk factors were established according to prior information. Risk evaluation functions for several common downhole complexities were set up in the paper while the formulas of risk factors were derived from interval variable algorithm. Taking Well W in some western region as an example, the evaluation results indicated that the method, simple and practical, could satisfy the needs of engineering practice.

Key words: drilling engineering; drilling parameter; uncertainty; interval mathematics; risk analysis; risk factor

钻井工程地质环境复杂,基于地震或井筒资料的钻井地质参数解释结果会存在不同程度的误差,同时考虑安全因素,多数钻井工程设计参数推荐值通常位于一定区间内,因此钻井基础信息参数的描述具有很大的不确定性。目前,解决不确定性问题的常用方法有随机理论、模糊数学和区间分析方法^[1-5]。随机理论和模糊数学需要有足够的信息来描述参数的概率分布函数或隶属函数,在钻井工程实际中,往往无法得到足够信息来描述参数的概率密度函数或隶属函数,通常的做法是对钻井

收稿日期:2013-05-15;**改回日期:**2013-06-03。

作者简介:管志川(1959—),男,山东单县人,1982年毕业于华东石油学院钻井专业,1995年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事油气井力学、井下测控技术、深井超深井钻井和深水钻井等方面的研究工作。系本刊编委。

联系方式:(0532)86981764, guanzhch@upc.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层钻井设计平台与风险控制机制”(编号:2010CB226706)、“十二五”国家科技重大专项课题“西部山前复杂地层安全快速钻井技术”(编号:2011ZX05021-001)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”(编号:IRT1086)联合资助。

基础参数的概率分布函数或隶属函数进行理论假设,当假定的概率密度函数或隶属函数难以完全体现钻井参数真正的分布特征时,其很小的误差就有可能导致计算结果产生较大偏差。虽然很难得到钻井基础参数精确的概率分布,但是容易确定钻井基础信息参数的界限。笔者考虑钻井过程中井下故障的力学致险机理,针对钻井基础信息参数的区间不确定性问题,基于区间数学理论,建立了钻井工程风险的非概率可靠性评价方法,确定了相应工况条件下的井下故障类型及其发生的可能性^[6]。

1 区间数学基本理论

若不确定参数 P 属于区间变量,其上、下界分别为 p^u, p^l , 则区间变量属于区间 $[p^l, p^u]$, 即 $P \in P^I = [p^l, p^u]$ 。根据区间数学理论^[7], 区间变量有均值 p^c 和离差 p^r 两个基本参数。

$$p^c = \frac{p^u + p^l}{2} \quad (1)$$

$$p^r = \frac{p^u - p^l}{2} \quad (2)$$

区间 P^I 、区间变量 P 可以分别表示为 $P^I = p^c + p^r \Delta^I$ 和 $P = p^c + p^r \delta$ 。其中, $\Delta^I = [-1, 1]$ 为标准化区间, $\delta \in \Delta^I$ 称为标准化区间变量。

对于区间 $X^I = [x^l, x^u]$ 和 $Y^I = [y^l, y^u]$, 其区间四则运算为:

$$\begin{cases} X^I + Y^I = [x^l + y^l, x^u + y^u] \\ X^I - Y^I = [x^l - y^u, x^u - y^l] \\ X^I Y^I = [\min(x^l y^l, x^l y^u, x^u y^l, x^u y^u), \\ \quad \max(x^l y^l, x^l y^u, x^u y^l, x^u y^u)] \\ \frac{X^I}{Y^I} = [x^l, x^u] \left[\frac{1}{y^u}, \frac{1}{y^l} \right], 0 \notin [y^l, y^u] \end{cases} \quad (3)$$

2 钻井工程风险的非概率可靠性评价方法

概率可靠性理论中,一般利用功能函数分析系统的可靠度或失效概率^[8]。基于概率可靠性理论思想和区间数学理论,建立了钻井工程风险的非概率可靠性评价方法。

假定有 n 个井下故障风险因素 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 基于钻井过程中井下故障力学致险机理和广义应力-强度理论^[8], 将风险因素分为广义强度因

素 R 和广义应力因素 S , 同概率可靠性分析方法一样, 由井下故障的力学致险机理确定的风险评价函数为:

$$m_t = g_t(x_1, x_2, \dots, x_n) = R_t - S_t \quad (4)$$

式中: t 为井下故障类型; m 为风险函数; $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为风险因素; R 为广义强度; S 为广义应力。

超曲面 $g_t(X) = 0$ 将钻井工程风险因素空间分为风险域 $g_t(X) < 0$ 和安全域 $g_t(X) > 0$ 两部分。假设 n 个风险因素具有区间不确定性, 且通过先验信息分析确定了风险因素上下界, 则风险因素构成的区间向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^I &= (X_1^I, X_2^I, \dots, X_n^I)^T \\ &= ([x_1^l, x_1^u], [x_2^l, x_2^u], \dots, [x_n^l, x_n^u])^T \end{aligned} \quad (5)$$

通过区间数学理论可知, 当函数自变量为区间变量时, 若函数为连续函数, 函数值域也为区间变量^[9]。因钻井过程中井下故障风险因素为区间变量, 通过区间分析方法得到的风险评价函数值域亦为区间变量, 即 $m_t \in M_t^I = [m_t^l, m_t^u]$, 其区间特征参数为均值 m_t^c 和离差 m_t^r 。根据区间数学分析方法、可靠性理论以及非概率可靠性度量方法的研究^[7-9], 定义钻井工程的无风险可靠度为:

$$R_t = \frac{m_t^c}{m_t^r} = \frac{m_t^u + m_t^l}{m_t^u - m_t^l} \quad (6)$$

无风险可靠度值域为整个实数域, $R_t > 1$ 表示无 t 类型井下故障风险, 且数值越大钻井工程越安全; $R_t < 1$ 表示有 t 类型井下故障风险。

为实现科学化描述, 将无风险可靠度值域映射到区间 $[-1, 1]$, 并将其定义为钻井过程中井下故障的风险系数:

$$I_t = \frac{2}{\pi} \arctan(R_t - 1) \quad (7)$$

其中, $I_t \in (0, 1]$ 表示安全区域, 且越靠近 1 钻井工程越安全; $I_t \in [-1, 0]$ 表示风险区域, 且越靠近 -1 钻井工程越不安全。

钻井液密度、地层压力和钻井施工致险参数之间的关系是影响钻井工程井下故障的关键。通过钻井工程井下故障的力学致险机理研究^[10], 几种常见钻井过程中井下故障的风险评价函数为:

$$\begin{cases} m_k = \rho_d - p_p - S_b - \Delta \rho \\ m_c = \rho_d - p_c - S_b \\ m_l = p_t - S_g - S_c - \rho_d \\ m_{sk} = p_p + \frac{\Delta p}{0.0098h} - \rho_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: m_k, m_c, m_l 和 m_{sk} 分别为深度 h 处的溢流、井壁坍塌、井漏、压差卡钻风险评价函数; p_b, p_c 和 p_t 分别为地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力的当量密度, g/cm^3 ; S_b 为抽汲压力系数, g/cm^3 ; S_g 为激动压力系数, g/cm^3 ; $\Delta\rho$ 为钻井液密度附加值, g/cm^3 ; S_t 为地层破裂压力安全增值, g/cm^3 ; S_c 为循环压耗系数, g/cm^3 ; Δp 为压差卡钻允值, MPa ; h 为井深, m ; ρ_l 为钻井液密度, g/cm^3 。

3 钻井工程风险系数的计算方法

常见钻井过程中井下故障的力学致险机理研究表明, 风险评价函数是钻井液密度、地层压力和钻井施工致险参数的线性函数。若某种井下故障的风险评价函数的区间自变量构成的区间向量为 $\mathbf{X}^I = (x_1^I, x_2^I, \dots, x_n^I)^T$, 则其风险评价函数为:

$$m_t = g_t(\mathbf{X}^I) = \sum_{i=1}^n a_i x_i^I \quad (9)$$

通过区间数学理论运算法则, 可以得到井下故障风险评价函数的值域区间特征参数: 均值 m_t^c 和离差 m_t^r , 即:

$$m_t^c = \sum_{i=1}^n a_i x_i^c \quad (10)$$

$$m_t^r = \sum_{i=1}^n |a_i x_i^r| \quad (11)$$

则相应的井下故障的风险系数为:

$$I_t = \frac{2}{\pi} \arctan(R_t - 1) \\ = \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i x_i^c}{\sum_{i=1}^n |a_i x_i^r|} - 1 \right) \quad (12)$$

4 实例分析

西部某区块的 W 井为一口重点开发井, 井型为直井, 完钻井深 6 130 m。安全钻井液密度窗口是钻井工程设计的基础数据, 对钻井施工安全有重要影响。查阅井史资料发现, 由于钻井液密度不能满足地层孔隙压力、坍塌压力和破裂压力限制要求, W 井的四个开次中, 共发生 8 次压力致险井下故障(见表 1)。

井筒测井资料可连续反映地层变化规律和岩石的各种力学特性^[11], 考虑油气地质信息的区间不

表 1 W 井井下故障与评价结果对比

Table 1 Comparison of drilling complexities and evaluation results for Well W

井深/m	井下故障	风险系数
609	井漏	0.69
3 537	溢流	-0.69
3 868	井漏	-0.71
4 087	卡钻	-0.73
4 289	井漏	-0.79
4 639	井漏	-0.82
4 808	井漏	-0.24
5 758	卡钻	0.15

确定性, 基于测井解释原理方法, 由 W 井测井曲线(见图 1)计算得到该井地层孔隙压力、坍塌压力和破裂压力的区间分布剖面, 如图 2 所示。

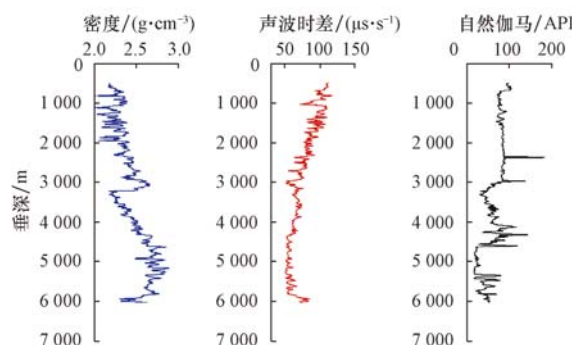


图 1 W 井测井资料

Fig. 1 Well logging of Well W

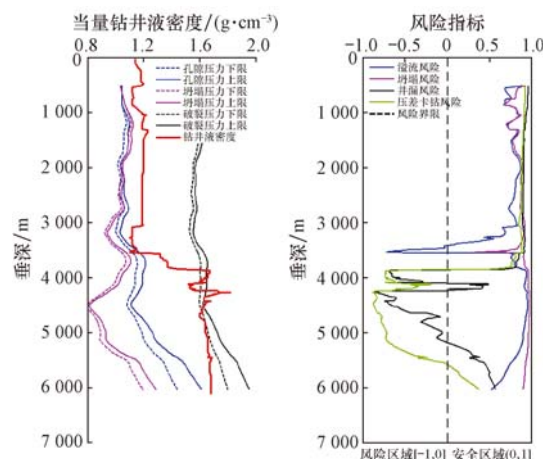


图 2 W 井地层压力区间分布剖面与风险系数曲线

Fig. 2 Formation pressure distribution profiles and risk factor curves of Well W

考虑地层压力区间不确定性、风险因素及其区间不确定性(见表 2)和压力致险机理, 利用上文给出的理论方法和程序对 W 井进行了钻井工程风险

表 2 设计系数区间

Table 2 Design coefficient interval

设计系数	$S_b/(g \cdot cm^{-3})$	$S_g/(g \cdot cm^{-3})$	$S_c/(g \cdot cm^{-3})$	$S_f/(g \cdot cm^{-3})$	$\Delta\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\Delta p/MPa$
上限	0.041 0	0.041 0	0.050 0	0.031 0	0.015 0	15(20)
下限	0.015 3	0.015 3	0.010 0	0.031 0	0.010 0	12(15)

分析,结果如图 2 所示。评价结果与现场钻井工程风险对比(见表 1)可以看出,井下故障发生层位对应的风险系数基本都小于 0,表明会有相应的风险,评价结果与工程实际基本相符。

5 结 论

1) 考虑钻井基础信息参数的区间不确定性,以区间数学方法和可靠性理论为基础,基于钻井过程中井下故障的力学致险机理,建立了钻井工程风险的非概率可靠性评价方法。该方法简便实用,分析时只需根据先验信息确定相应风险因素的最大值和最小值。实例验证表明,评价结果能够满足钻井工程风险评价需要。

2) 建立的非概率可靠性评价方法不需要考虑参数的概率分布函数或隶属函数,对描述参数的特征量要求比较低,在没有足够的信息数据和主观分布假设时,也能得到比较精确可靠的评价结果。

3) 钻井工程风险系数是描述钻井过程中是否发生井下故障的函数,其值域为区间 $[-1, 1]$ 。 $[-1, 0]$ 表示风险区域,且越靠近-1 钻井工程越不安全; $(0, 1]$ 表示安全区域,且越靠近 1 钻井工程越安全。

4) 钻井工程风险的力学致险机理和力学风险因素区间是评价相应风险的关键,因此,钻井过程中井下故障力学致险机理研究和钻井基础信息参数的不确定性区间分析,是进一步研究的方向。

参 考 文 献

References

- [1] 张建国,陈建军,马孝松,等. 不确定结构动力特征值区间分析的一种算法[J]. 应用力学学报,2006,23(1):96-100.
Zhang Jianguo, Chen Jianjun, Ma Xiaosong, et al. Method for dynamic eigenvalues interval analysis of uncertain structures[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1): 96-100.
- [2] Savoia M. Structural reliability analysis through fuzzy number approach, with application to stability[J]. Computers & Structures, 2002, 80(12): 1087-1102.
- [3] Langley R S. Unified approach to probabilistic and possibilistic analysis of uncertain systems[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(11): 1163-1172.
- [4] Rao S, Sawyer J P. Fuzzy finite element approach for analysis of imprecisely defined systems[J]. AIAA Journal, 1995, 33(12): 2364-2370.
- [5] Huang Hongzhong, Tong Xin, Zuo M J. Possibilist fault tree analysis of coherent systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(2): 141-148.
- [6] 魏凯,管志川,韦节宏,等. 基于神经网络和 Monte-Carlo 模拟的钻井工程风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 125-130.
Wei Kai, Guan Zhichuan, Wei Jiehong, et al. Drilling engineering risk evaluation method based on neural network and Monte-Carlo simulation[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(2): 125-130.
- [7] 祁力群. 区间分析[J]. 运筹学杂志, 1982, 1(1): 29-35.
Qi Liqun. Interval analysis[J]. Chinese Journal of Operations Research, 1982, 1(1): 29-35.
- [8] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003: 325-330.
Gong Jinxin. Reliability calculation methods of engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003: 325-330.
- [9] 郭书祥,吕震宙,冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠度模型[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 56-60.
Guo Shuxiang, Lü Zhenzhou, Feng Yuansheng. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 56-60.
- [10] 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: 251-254.
Chen Tinggen, Guan Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 251-254.
- [11] 中国石油学会石油测井学会. 测井资料的地质应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 157-166.
Petroleum Well Logging Commission. Well logging application in geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 157-166.

[编辑 令文学]