

石油钻探取心工程风险的量化分析

程远方¹, 吴玲妍¹, 崔青², 许俊良², 董丙响¹

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580
2. 中石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017

摘要 取心工程存在很大的风险性和不确定性,做好风险分析和预测可以有效规避风险。结合取心工程特性对影响取心工程的风险因素和风险事件进行有效地识别、分析,建立了风险评估指标体系和风险评估的数学模型。利用蒙特卡洛模拟与层次分析法(AHP)相结合的方法对取心风险进行分析计算,综合考虑了多种不确定性风险因素进行组合抽样,列出了蒙特卡洛模拟的计算流程,得到具有可靠度的量化的风险概率分布。同时,根据模拟结果可以得到各指标的不同风险指数,量化了每个风险因素对工程风险的贡献,对计算结果进行了概率统计分析,找出敏感性较大的风险因素或事件。该风险分析方法对各个不确定性参数进行了全面抽样,涵盖了风险发生的各种可能性组合,输入参数的不确定性得以传递并在计算结果中得到反映,避免了信息的丢失,提高了计算结果的准确度。同时,针对不同组合的风险值计算出了其出现概率的大小,更有利于之后的风险管理,提高取心作业的成功率和岩心收获率。通过实例分析,该方法具有较好的评价效果,预测结果合理可靠,预测取心工程风险是可行的、合理的。

关键词 石油钻探;取心工程;风险分析;蒙特卡洛模拟;随机数

中图分类号 TE28

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.008

Quantitative Analysis of Oil Coring Project Risk

CHENG Yuanfang¹, WU Lingyan¹, CUI Qing², XU Junliang², DONG Bingxiang¹

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China
2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Sinopec, Dongying 257017, Shandong Province, China

Abstract Risk prediction and analysis is essential for risk control because of the uncertainty of coring project. Combined with the characteristics of coring project, the risk factors and events were recognized and analyzed effectively; the risk assessment system and mathematic model were established. Using Monte Carlo simulation method as well as AHP, the risk of coring project could be analyzed and calculated. With the consideration of various uncertainly risk factors, combination sampling method was applied to get a quantized risk probability distribution. Meanwhile, according to the simulation results, the risk index of each factor was available which quantized its corresponding contribution to the risk of the project. Then, the risk factors or events with high index could be found based on the analysis of probability, which is helpful in risk management of coring project and promoted the success ratio and recovered the rate of coring. This risk analysis method covered a variety of possibilities and delivered the uncertainties of parameters; its counting process reduced the loss of information, then the result is more accurate. Meanwhile, the sensitivity analysis could be carried on the base of data samples for deeper insight. On one hand, this study established a new evaluation methodology and supplied decision basis for the risk analysis and management of hydrate coring project; on the other hand, it made the foundational research work for subsequent more perfect hydrate coring project evaluation. Research showed that this method can achieve a good evaluation effectiveness and its prediction results are reasonable and practicable.

Keywords oil drilling; coring project; risk analysis; Monte Carlo simulation; random number

0 引言

岩心是石油勘探、开发过程中取得的第一手资料,对岩

心分析与研究才能为制订合理的开发方案、准确计算储量及采取增产措施提供依据。因此,做好风险分析,提高石油钻探

收稿日期:2013-03-06;修回日期:2013-04-25

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05026-004-08);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1086)

作者简介:程远方,教授,研究方向为岩石力学与风险评估,电子信箱:yfcheng@126.com

取心工程的成功率和岩心收获率是极其重要的。目前,国内外对钻井项目风险管理已发表了很多研究文献^[1,2],蒙特卡洛模拟方法也得到广泛应用^[3],而对于取心工程的风险研究相对较少。本文针对取心工程作业的特殊性,对影响取心工程的风险因素进行有效地识别、分析^[4,5],构建了层次分明的取心工程风险评估指标体系。采用蒙特卡洛模拟方法对取心工程风险进行模拟计算,得到具有不确定性概率分布形式的量化统计样本,方便对风险作进一步的分析,为制订合理的施工计划和采取风险规避措施提供依据。

1 取心工程风险评价指标体系建立

根据取心工程的特点^[6]并结合历史取心作业情况,分析得出取心工程的风险主要来源于地质风险、自然环境风险、工程技术风险、施工风险和管理风险5个方面。对这5类风险因素细化分析,建立取心工程风险的评价指标体系(图1)。

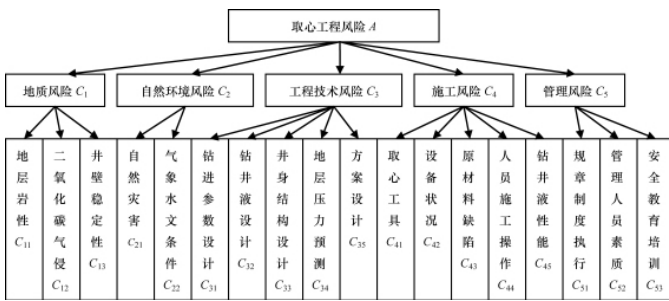


图1 取心工程风险评价体系的层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of risk evaluation system in coring project

1.1 地质风险

取心作业的对象是地层,因此取心成功与否与地层类别、岩性及地层压力等地质因素有很大关系。此外由于地质条件的复杂性,工程施工造成的异常工程地质条件突变,也会对工程带来极大的危害性。

1.2 自然环境风险

自然风险是指由于不可抗的自然力或物理现象导致的风险,是客观存在的。恶劣的自然条件、气候环境以及现场条件等,是普遍存在的一种风险因素,同时水文、气象状况与变化均对取心工程作业有重大影响。

1.3 工程技术风险

技术风险是指由于科学技术发展所带来的某些不利因素而导致的风险。例如水合物取心技术现阶段尚不成熟,其工程技术风险在总风险中的不确定性尤为突出,主要集中在勘察、设计、施工和新技术的应用及成熟度4个主要环节。

1.4 施工风险

机械设备风险也是取心工程风险的一个重要因素,其中取心工具的设计及实用性、设备的稳定性等都是影响取心作业的风险因素。

1.5 管理风险

管理风险主要指在取心工程整个过程中,因管理及制度上的缺陷而造成的风险,其本质上是人的风险。在项目实施过程中,施工人员的素质、规章制度的执行、安全教育、专业培训同样是影响取心工程成功与否的潜在风险。

2 基于蒙特卡洛模拟方法的取心工程风险量化分析

2.1 风险模型指标及风险分析

在取心工程风险管理中,风险可表示为某种或某些不利事件或风险事件发生的概率及其对工程造成的不利后果的函数,即 $R=F(P,C)$ 。式中, R 为取心工程总风险; P 为不利事件发生可能性; C 为不利事件发生后对取心工程的影响后果。本文做出如下的判断:单个风险因素的风险 $R_j=P_j \cdot C_j$ 。其中, i 为中间层第 i 个风险; j 为第 i 个中间层风险对应的第 j 个风险因素或风险事件; R_{ij} 为第 i 个中间层风险下的第 j 个风险因素的风险值; P_{ij} 为第 i 个中间层风险下的第 j 个风险事件发生的可能性大小; C_{ij} 为第 i 个中间层风险下的第 j 个风险事件发生的后果严重度。

C_{ij} 的取值根据专家经验采用层次分析法(AHP)^[7,8]计算。AHP在国内应用已较为成熟,计算过程在此不做赘述。以中间层地质风险为例,专家打分的后果严重度的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/6 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 6 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

采用几何平均法计算矩阵并通过一致性检验,得到地质风险中各因素的后果严重度的权重向量为

$$(C_{11}, C_{12}, C_{13})=(0.09534, 0.24986, 0.65481)$$

同理,得到其他风险因素或事件的后果严重度计算结果为

$$\begin{aligned} & \text{因素层权重 } (C_{21}, C_{22})=(0.875, 0.125); (C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, \\ & C_{35})=(0.49444, 0.1439, 0.07206, 0.03977, 0.24983); (C_{41}, C_{42}, C_{43}, \\ & C_{44}, C_{45})=(0.49321, 0.03286, 0.26369, 0.14176, 0.06848); (C_{51}, C_{52}, \\ & C_{53})=(0.49321, 0.03286, 0.26369); \text{中间层权重 } (C_1, C_2, C_3, C_4, \\ & C_5)=(0.2907, 0.45363, 0.14836, 0.07633, 0.03098)。 \end{aligned}$$

风险发生可能性 P_j 的确定可通过大量历史数据的收集拟合,得到其概率分布形式和分布参数,以随机概率分布的形式输入计算系统。目前,最常用的风险概率分布为正态分布,三角分布和贝塔(Beta)分布。

对每层的风险因素按其分布规律进行随机数抽样模拟计算,得到中间层各风险和总风险的样本值组合。对模拟抽样计算得到的大量样本进行分析,得到下列风险评估指标:

$$\text{风险值期望值 } E(R)=\sum_{i=1}^n R^{(i)}/n$$

式中, n 为模拟次数; $R^{(i)}$ 为风险总值的第 i 个样本值。

$$\text{风险值标准差 } \sigma(R)=\sqrt{\sum_{i=1}^n (R^{(i)}-E(R))^2/n}$$

风险值变异系数 $CV(R) = \frac{\sigma(R)}{E(R)}$

2.2 蒙特卡洛模拟方法

蒙特卡洛模拟在工程项目的风险分析中具有广泛的应用^[9-11],它是以一定的工程风险计算模型为基础,通过计算机模拟其中的不确定性变量,得到模拟实验的计算结果,以此作为目标的近似解^[12,13]。

用蒙特卡洛模拟方法计算取心工程风险的步骤为:

第 1 步,建立取心工程风险分析的数学模型,确定需要输入的随机变量。对于取心工程风险有如下关系式。中间层各风险: $R_i = \sum_{j=1}^{n'} P_{ij} C_{ij}$, 式中 n' 为该次计算的模拟次数; 风险总值: $R = \sum_{i=1}^5 R C_i$ 。

第 2 步,分析各取心风险因素的特征,根据历史资料或专家经验,确定各随机变量的分布类型和统计参数。

第 3 步,确定满足精度要求时的最小模拟次数 N ,即每次模拟次数设定只有大于 N 时才能达到一定的精度要求。

第 4 步,按照给定的参数分布规律,在计算机上产生符合其分布特征的随机数序列,代入风险计算的数学模型中进行模拟计算。在此过程中各输入参数的不确定性得以传递,最后体现在计算结果中,如图 2 所示。每次抽样都是对各随机变量的随机组合,模拟多次后得到一系列的风险值样本。

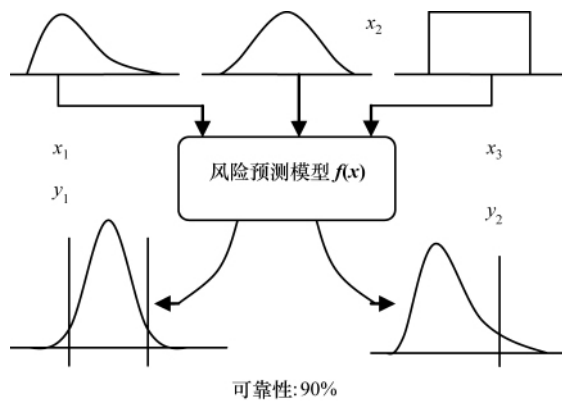


图 2 蒙特卡洛模拟中不确定性传递
Fig. 2 Uncertainty propagation in Monte Carlo simulation

第 5 步,通过足够次数的模拟计算(本文模拟 1000 次),得到 1000 组不同风险值概率分布的样本,由于模拟的数量大,其实验数据会具有一定的规律性。对模拟计算得到的样本进行统计分析,求出取心工程风险评估需要的各指标值。

2.3 随机数和随机数发生器

利用蒙特卡洛方法计算取心工程风险时需要产生大量的随机数进行迭代计算,才能保证其模拟结果的准确性和精确度。三角分布因其直观性强和可操作性好的特点,可以轻易解决取心工程数据资料欠缺的问题;正态分布是风险分析

中最常用的一种分布类型,工程中很多不确定事物的分布类型都符合或者是近似于正态分布;Beta 分布可以有多种不同的分布形态,因此工程中经常利用 Beta 分布逼近多种类型的分布形式。下面对取心工程风险计算中最常用的这 3 种随机数发生器^[14,15]的实现方法进行描述。

2.3.1 三角分布随机数发生器

对于底限为 a ,众数为 c ,上限为 b 的连续型三角分布的随机数 X 的产生方法为:

(1) 当 $a \leq X \leq c$ 时,有

$$X = b + \sqrt{(1-r_i)(b-c)(b-a)}$$

式中, r_i 为计算机产生的 $[0, 1]$ 之间均匀分布随机数。

(2) 当 $c \leq X \leq b$ 时,有

$$X = b - \sqrt{(1-r_i)(b-c)(b-a)}$$

2.3.2 正态分布随机数发生器

$$X_1 = \sqrt{-2\ln(1-\xi_1)} \cos 2\pi\xi_2$$

$$X_2 = \sqrt{-2\ln(1-\xi_1)} \sin 2\pi\xi_2$$

式中, ξ_1, ξ_2 为两个服从 $(0, 1)$ 均匀分布的相互独立的随机数。

对于一般的正态分布函数 $F(x)$ 的随机数发生器,可以将其化为标准正态分布函数 $N(x)$ 计算,一般正态分布的分布函数与标准正态分布的分布函数有如下转换关系

$$F(x) = N\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

式中, μ 为正态分布均值; σ 为正态分布标准差。

2.3.3 Beta 分布随机数发生器

由于 Beta 分布的概率密度函数极其复杂,它的随机数产生一般采用舍选法进行求取。计算步骤为:

- (1) 使用 3 点估计法估算其分布区间 m, n 和最大值对应点 h 的值;
- (2) 计算概率密度函数 $f(x)$ 的最大值 $f(h)$;
- (3) 产生两个在 $(0, 1)$ 区间上相互独立的且符合均匀分布的随机数 RN_1, RN_2 ;
- (4) 将上面求取的 m, n 和产生的随机数 RN_1 代入函数 $f[m+(n-m)RN_1]$ 中,计算其值;
- (5) 判断 $f[m+(n-m)RN_1]/f(h)$ 与 RN_2 的大小关系,如果 $f[m+(n-m)RN_1]/f(h) \geq RN_2$ 成立,那么取 $x = m+(n-m)RN_1$ 。

x 就是要求的服从 Beta 分布的随机数。计算过程中如果第 5 步判断不成立,那么继续循环步骤(3)~(5),直到结果成立。

2.4 模拟次数确定

模拟次数计算公式为

$$n = \lambda_\alpha^2 \sigma^2 / \varepsilon^2$$

式中, λ_α 为给定置信度 α 下的正态差,由给定的 α 经查 $\Phi\left(\frac{\alpha+1}{2}\right)$ 确定; n 为模拟次数; σ 为随机变量的标准差; ε 为给定的允许误差。实际计算时并不知道总体的方差 σ^2 ,因此模拟次数的确定方法为:先给定初始模拟次数 n_0 ,并进行 n_0 次

模拟,根据初始模拟的结果计算样本方差 S^2 ,之后再以样本方差 S^2 代替总体方差 σ^2 ,计算出模拟误差 ε_0 ,如果 $\varepsilon_0 \leq \varepsilon$,则说明此时计算精度已经满足精度要求,即可以停止模拟计算并输出结果;反之,则需要增大模拟次数到 n_1 ,并继续模拟 n_1 次后再进行以上判断。如此循环,直到达到所要求的计算精度,就确定出了相应的模拟次数。

3 计算结果与分析

以国内某次取心工程为例,取心工程各风险因素权重计算结果已在上文中列出。由于取心资料较少、历史数据不足,本次计算各风险发生可能性采用三角分布。以地质风险计算为例,地层岩性、二氧化碳气侵、井壁稳定性 3 个风险因素发生的可能性分布如图 3 所示。

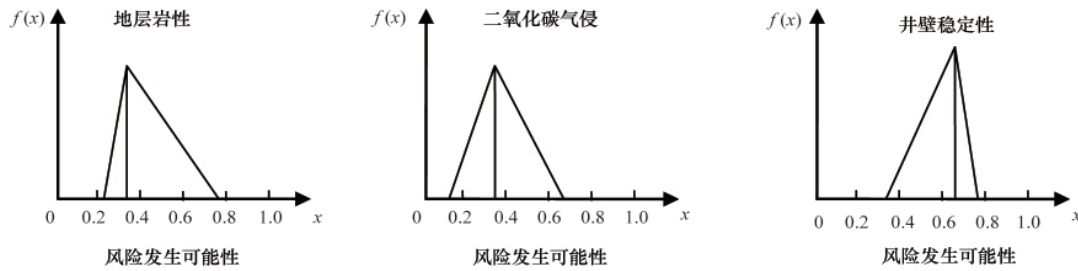


图 3 地质风险因素层各风险发生可能性分布
Fig. 3 Probability distribution of factor layer in geologic risk

采用 2.3 节中的三角分布随机数抽样方法,在保证误差的情况下对地质风险进行抽样计算,得到地质风险值的大量样本 $R_1^{(1)}, R_1^{(2)}, \dots, R_1^{(n)}$,计算公式如下。

先计算中间层风险

$$R_i^{(\xi)} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij}^{(\xi)} C_{ij}^{(\xi)}$$

式中, $\xi=1, 2, \dots, n$, 为第 ξ 个样本值; n_i 为中间层第 i 个风险包含的风险因素或事件的个数; $R_i^{(\xi)}$ 为中间层第 i 个风险的第 ξ 次抽样的风险值; $P_{ij}^{(\xi)}$ 为中间层第 i 个风险下面第 j 个风险事件发生可能性的第 ξ 次抽样值; $C_{ij}^{(\xi)}$ 为中间层第 i 个风险下面第 j 个风险事件发生后后果严重度的第 ξ 次抽样值。

风险总值计算

$$R^{(\xi)} = \sum_{i=1}^5 P_i^{(\xi)} C_i^{(\xi)}$$

式中, $R^{(\xi)}$ 为风险总值的第 ξ 次抽样计算的样本值; $P_i^{(\xi)}$ 为中间层第 i 个风险发生可能性的第 ξ 次抽样值; $C_i^{(\xi)}$ 为中间层第 i 个风险发生后后果严重度的第 ξ 次抽样值。

同理,可以计算得到中间层其他风险的样本值:自然环境风险样本 $R_2^{(1)}, R_2^{(2)}, \dots, R_2^{(n)}$; 工程技术风险样本 $R_3^{(1)}, R_3^{(2)}, \dots, R_3^{(n)}$; 施工风险样本 $R_4^{(1)}, R_4^{(2)}, \dots, R_4^{(n)}$; 管理风险样本 $R_5^{(1)}, R_5^{(2)}, \dots, R_5^{(n)}$ 。对这些样本进行统计分析得到各风险的风险指标,以及取心工程总风险值的各分布指标,列于表 1 中。

表 1 1000 次模拟取心工程风险指标汇总
Table 1 Risk indicators of coring project for simulation 1000 times

各风险指标	地质风险	自然环境风险	工程技术风险	施工风险	管理风险	总风险
抽样次数	1000	1000	1000	1000	1000	1000
均值	0.3405	0.1621	0.2937	0.3075	0.1882	0.2457
标准差	0.0234	0.0076	0.0148	0.0132	0.0107	0.0068
中位数	0.3471	0.1652	0.2971	0.3056	0.1912	0.2471
最大值	0.4177	0.1799	0.3272	0.3525	0.2240	0.2689
最小值	0.2722	0.1408	0.2566	0.2692	0.1498	0.2250
变异系数	0.0686	0.0466	0.0503	0.0429	0.0568	0.0277

用蒙特卡洛模拟方法计算取心工程的风险,其计算结果包含了各种不确定性的概率分布形式。图 4 给出了此次取心风险含可靠度的计算结果分布,其结果不再是单一的值或者半定量的风险度。利用蒙特卡洛模拟运行 1000 次迭代计算后,可以了解到 1000 种不同的可能性结果,以及每个结果出

现的可能性。还可以得到一定置信度水平^[9]下的取心工程风险范围。例如当置信度取为 0.95 时,计算得到的风险值范围为 [0.2313, 0.2589], 而此范围内的风险值是可以接受的。同时,通过采取相应安全措施加强对可控风险因素的管理可降低风险值。

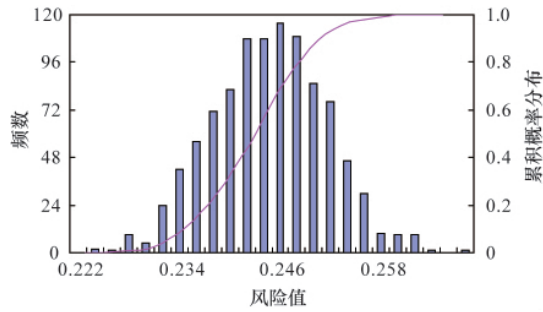


图4 1000次模拟计算得到的取心风险总值分布
 Fig. 4 Distribution of coring project risk for simulation 1000 times

通过对上述风险评估数据的分析可知,对于取心工程来说,井壁稳定性、取心作业时的气候状况、取心工具的性能以及现场工况等条件对取心工程的成功和岩心收获率的影响至关重要。因此,在取心工程进行中可以针对这些可能存在的风险做好监测预防工作。例如选择气候条件良好的时期进行取心作业;选择作业性能好且适合的取心工具,比如水合物取心作业时选用保温保压性能高的取心工具;多方面了解地质特性,做好地层压力预测,设计合理的钻井液性能,维持好钻进过程中的井壁稳定性,对于可能存在二氧化碳气侵的地层要提前做好预防和应对措施等。通过有针对性的对这些因素进行修正,从而达到提高取心作业成功率和岩心收获率的目的。

4 结论

(1) 取心工程具有很大的风险性和不确定性,做好风险预测、分析及管理是规避风险、提高取心工程作业成功率的必要手段。

(2) 中国现阶段取心工程的历史资料不足,参考依据太少,特别是水合物取心各风险因素的不确定性更是明显,因此基于蒙特卡洛模拟的具有可靠性的量化工程风险分析更具有实际应用效果。

(3) 利用蒙特卡洛模拟对取心工程进行风险分析,其计算结果不再是简单的一个数值,而是生成一组概率分布样本,便于之后从概率统计的意义对风险进行分析。

(4) 蒙特卡洛模拟过程中对各个不确定性参数进行了全面抽样和组合,涵盖了风险发生的各种可能性组合,计算结果全面,避免了信息的丢失,提高了计算结果的准确度。同时又针对不同组合的风险值计算出了其出现概率的大小,更有利于之后的风险管理。

(5) 蒙特卡洛方法的计算结果给出了不同工程条件下的风险总值分布,分析出重要影响因素,及时对工程做出有利调整,进而避免由于依据不足、方法不当等导致的决策失误。

参考文献 (References)

[1] 赵俊平, 马俐. 海外石油钻井工程项目风险的综合评价 [J]. 能源技术与管理, 2010(3): 142-144.

- Zhao Junping, Ma Li. Energy Technology and Management, 2010 (3): 142-144.
- [2] 连志龙, 赵庆, 霍宗强, 等. 井下风险管理系统设计及应用 [J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 25-28.
 Lian Zhilong, Zhao Qing, Huo Zongqiang. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 25-28.
- [3] 段玉波, 刘建辉, 李凉. 基于蒙特卡罗模拟法在变电站风险评估中的研究 [J]. 科学技术与工程, 2007, 17(22): 5890-5892.
 Duan Yubo, Liu Jianhui, Li Liang. Science Technology and Engineering, 2007, 17(22): 5890-5892.
- [4] 张甫仁. 燃气火灾爆炸事故危险源辨识及危险性模拟分析 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 151-154.
 Zhang Furen. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 151-154.
- [5] Khatlan A, Jafari A, Milani A A. An integrated system for risk assessment of drilling operations in oil and gas wells [C]// Proceedings of Production and Operations Symposium. 106714-MS, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [6] 王智锋, 许俊良. 深海天然气水合物钻探取心的难点与对策 [J]. 石油钻采工艺, 2009, 4(31): 24-26.
 Wang Zhifeng, Xu Junliang. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 4(31): 24-26.
- [7] Shao M, Shi H. A developed AHP method applied to the comparison of port projects' plane layout alternatives [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. I-10-505, Mountain View, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010.
- [8] Han S H, Park W S. Hazard risk analysis of submerged floating tunnels with fuzzy AHP [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. I-12-614, Mountain View, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.
- [9] Williamson H S, Sawaryn S J, Morrison J W. Monte Carlo techniques applied to well forecasting: Some pitfalls [J]. SPE Drilling & Completion, 2006, 21(3): 216-227.
- [10] Akbari M, Ravari R R, Amani M. New methodology for AFE estimate and risk assessment: Reducing drilling risk in an Iranian Onshore field [C]// Proceedings of Digital Energy Conference and Exhibition. 107546-MS, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [11] 高建伟. 基于蒙特卡罗仿真的研究型项目风险量化分析技术 [J]. 科技导报, 2012, 30(13): 31-35.
 Gao Jianwei. Science & Technology Review, 2012, 30(13): 31-35.
- [12] 詹姆斯 R 埃文斯, 戴维 L 奥尔森. 模拟与风险分析 [M]. 洪锡熙, 译. 上海: 上海人民出版社, 2001.
 Evans J R, Allson D L. Simulation and risk analysis [M]. Hong Xixi, tran. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2001.
- [13] Robert C P. Monte Carlo statistical methods [M]. New York: Springer, 2005.
- [14] 杨振海, 程维虎. 非均匀随机数产生 [J]. 数理统计与管理, 2006, 25(6): 750-756.
 Yang Zhenhai, Cheng Weihu. Application of Statistics and Management, 2006, 25(6): 750-756.
- [15] 张杰, 杨振海. 变化区域舍选法在贝塔分布随机数中的应用 [J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(3): 359-363.
 Zhang Jie, Yang Zhenhai. Journal of Beijing University of Technology, 2003, 29(3): 359-363.
- [16] Zhang X Q, Abourizk S M. Determining a reasonable concession period for private sector provision of public works and services [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(5): 622-631.

(责任编辑 侯澄芝)