

文章编号: 0253-2697(2012)03-0472-05

基于分形维数的钻头优选指数标度法及其应用

闫铁¹ 张杨¹ 李玮¹ 阎玉良² 侯圣¹ 杜树明¹

(1. 东北石油大学石油工程学院 黑龙江大庆 163318; 2. 大庆钻探工程公司钻井二公司 黑龙江大庆 163413)

摘要:应用指数标度法的基本理论,建立了钻头优选的层次结构模型。指数标度中的相邻重要度比率采用新的方法来确定,其中准则层的相邻重要度比率按照一般的经济问题选取,钻头方案层的相邻重要度比率应用岩屑分形维数进行确定。改进后的选取方法有效地增强了模型的定量评价功能,同时保留了该模型的灵活性。该模型的使用不受区域限制,准则选取灵活,准则资料易于获取。经现场应用验证,该模型能够定量评价牙轮钻头方案的综合性能的优劣,优选结果准确。

关键词:钻头优选;分形维数;指数标度;相邻重要度比率;定量评价

中图分类号:TE222

文献标识码:A

An index-scaling procedure for bit optimization based on the fractal dimension and its application

YAN Tie¹ ZHANG Yang¹ LI Wei¹ YAN Yuliang² HOU Sheng¹ DU Shuming¹

(1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. No. 2 Drilling Company, Daqing Drilling & Exploration Engineering Company, Daqing 163413, China)

Abstract: A hierarchy structure model for bit optimization was established based on the essential theory of the index scaling procedure. Adjacent importance ratios in the index scaling procedure were determined with a new approach. For instance, the adjacent importance ratio of the criterion layer was selected according to general economic problems, and that of the bit schematic layer was defined according to the fractal dimension of cuttings. The improved selection approach can effectively enhance the quantitative evaluation function of the model. In addition, the flexibility of this bit optimization model is retained as well. This model can be used to optimize cone bits in any regions, and it also has advantages to select criteria elastically and gain criterion data easily. A successful in-situ application of this model demonstrates that the model can quantitatively and accurately evaluate the overall performance of cone bits.

Key words: bit optimization; fractal dimension; index scale; adjacent importance ratio; quantitative evaluation

随着人们对油气资源需求的逐年增加,全球钻井数量逐年增长,中深井、深井比例逐渐加大,据统计仅2008年中国陆上就完成深井、超深井455口,平均井深为5 656 m,平均钻井周期约为149天,单井钻头平均用量为32.93只^[1]。因此,如何提高钻井速度、最大限度减少非钻进时间显得尤为重要,而合理选择钻头类型使钻头和地层实现最佳配合是提高钻井速度及钻井质量的主要技术途径之一^[2-3]。目前钻头选型方法很多,其中应用广泛且效果明显的方法主要有基于岩石可钻性的比能法、单位进尺成本法、灰关联聚类法和属性层次分析法^[4-5]。其中比能法和单位进尺成本法主要是针对钻头的单项性能指标进行评价,灰关联聚类法和属性层次分析法是利用模糊分析法(如灰关联分析法和属性测度法)与层次分析法相结合的方法对钻头的综合性

能进行定性排序,定量评价功能较弱。为此,笔者引入指数标度法^[6]进行钻头优选,同时应用岩屑分形维数与分层思想相结合的方式确定指数标度法中的相邻重要度比率,将地层破碎参数与评价方法有效结合,以进一步增强钻头优选指数标度法的定量评价功能。

1 指数标度法的基本理论

指数标度法是系统工程中层次评价理论的基本方法,它是通过各层之间的相邻重要度系数和权重系数将目标层、准则层以及方案层联系起来。其基本原理和步骤为:①建立各层次的结构模型;②选择合适的相邻重要度比率,构建判断矩阵;③进行权重计算,根据其权重大小确定优选方案^[6]。

对于一个具体的决策问题,首先应将各个因素划

基金项目:国家重大科技专项(2010ZX05021-002)和国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB226703)资助。

第一作者:闫铁,男,1957年2月生,2001年获哈尔滨工业大学博士学位,现为东北石油大学教授、博士生导师,主要从事油气井工程力学等方面的教学和研究工作。E-mail: yant@nepu.edu.cn

通讯作者:张杨,男,1985年7月生,2005年获大庆石油学院理学学士学位,现为东北石油大学油气井工程专业在读硕士研究生,主要从事油气井工程力学的研究。E-mail: zhangyang053@163.com

分成有序的几个层次,一般可以划分为目标层、准则层及方案层,从而建立层次结构模型(图1),模型中上一层次因素支配下一层次中的各个因素。

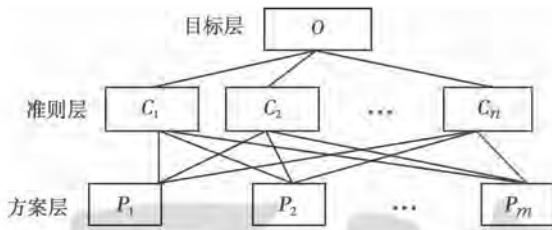


图1 层次分析的结构模型

Fig.1 Hierarchy structure model

然后,使用基于韦伯-费希纳定律的指数标度^[6]构建各个层次的判断矩阵。其构建方法是:①在上一层次具体因素的支配下,将决策者关于下一层次中两个

因素的重要程度差别的主观判断等距分成9级,并使用“相同重要”、“稍重要”、“明显重要”等语言进行描述(表1),每个主观判断对应唯一的重要度差值 $\gamma(\gamma = -8, -7, \dots, 8; \gamma$ 取整数)。②考虑具体的系统背景,选择合适的相邻重要度比率 e ,用 e^γ 表示被判断的两个因素对支配因素的影响之比,并作为判断矩阵的元素,各个因素经过成对比较即可建立针对支配因素的判断矩阵。该标度系统的核心作用是将人对事物的主观差值判断转换为客观比率判断,保证优选的准确性,同时使用该标度建立的判断矩阵具有完全一致性^[6],可取消矩阵的一致性检验步骤。

再后,使用最大特征值法计算方案层对目标层的合成权重向量^[6],并根据合成权重向量中各个方案所对应的权重大小评价出方案的优劣。对应权重值越大的方案,其综合指标越优秀。

表1 重要度差值的指数标度转换

Table 1 Index scale conversion of the importance D-value

主观判断	绝对弱	很弱	弱	稍弱	相同重要	稍重要	重要	明显重要	绝对重要
重要度差值 γ	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8
判断矩阵元素值 e^γ	e^{-8}	e^{-6}	e^{-4}	e^{-2}	1	e^2	e^4	e^6	e^8

注:介于“稍弱”与“相同重要”之间的重要度差值为-1,判断矩阵元素值为 e^{-1} ;其余同理。

2 基于分形维数的钻头优选指数标度分析模型

2.1 钻头优选的层次结构模型

根据指数标度法的基本原理,结合实际钻井情况,将钻头优选的层次结构模型分为目标层、准则层和方案层3层。目标层即为优选出最佳钻头型号。准则层是优选模型的关键,准则层因素的选取决定着钻头优选的结果,因此应该考虑选取对钻井效果有显著影响且比较容易获得的相关参数。根据钻井实际情况,选取机械进尺、钻头磨损、平均机械钻速、单位进尺钻头成本及破碎比功5项指标作为准则层的优选因素,这5项因素能够反映钻头的使用寿命、使用效果、经济性能等主要技术指标,涵盖了优质快速钻井对钻头综合性能的基本要求。其中钻头磨损主要考虑钻头牙齿的正常磨损,不包括如牙齿折断、牙齿脱落等磨损方式。方案层由多个待优选的钻头方案构成。钻头优选的层次结构模型按照层次分析结构模型的形式进行建立,该模型的层次结构中每个因素均对下一层次中的因素具有支配作用。

对于准则层中的前4项准则数据可以直接由钻井数据或简单计算获得,破碎比功表达式为^[7]

$$A = K \frac{(4-D)pn\phi_h}{x_1^{4-D}} \frac{f_u f_v}{1-f_2 h} \quad (1)$$

式中: A 为破碎比功, kJ/m^3 ; ϕ_h 为钻头直径, m ; p 为钻压, kN ; n 为钻头转速, r/min ; h 为钻头牙齿磨损量, m ; x_1 为岩屑中最大粒度岩屑的尺寸, m ; f_2 为牙齿磨损系数; f_u 为实际钻井条件下水力净化系数; f_v 为压差影响系数; D 为岩屑分形维数; K 为比例系数。

2.2 考虑分形维数的相邻重要度比率

为保证模型的灵活性及优选结果的准确,指数标度法中的相邻重要度比率采用分层确定的方式。用于构建准则层的判断矩阵的相邻重要度比率用 b 表示,用于构建方案层的判断矩阵的相邻重要度比率用 a 表示。 b 值应参照各项因素对经济目标的贡献程度来确定,根据一般经济问题的确定方法^[8], b 值取1.316。

对于钻头优选中的 a 值确定,应该考虑地层岩石本身的特征、破碎条件和破碎规律等。大量的研究表明^[9-10],岩石的微观结构单元、孔隙及裂缝发育、成岩过程都体现了分形特征,即岩石承载着固有的分形信息,并且岩石破碎前后的分形信息具有统计自相似特征。岩石微观结构的分形特征直接影响着钻头磨损、钻头机械进尺、平均机械钻速等指标。根据已有的研究成果^[11-13]可知,岩屑分形维数(D)与岩石破碎能耗、岩石可钻性(K_d)有着良好的函数关系,说明 D 对钻头破碎能耗、岩石可钻性可以起到良好的评价作用。即通过钻头与岩石间的线性或非线性相互作用,岩石将

其分形信息传递到岩石破碎能耗、机械钻速、磨损等指标中(这种线性或非线性作用就是映射),同时各个准则之间也相互影响、相互制约。因此,岩石分形信息与各个优选准则具有的分形信息具有自仿射或自相似特征,而分形维数是岩石分形信息的载体。

在上述研究基础上,同时考虑到钻头破岩过程是一个统计自相似的过程,岩石经钻头破岩的最初作用到形成返排到地面上的具有一定分数维的岩屑,经历了两个极端状态的跳跃,则将 D 确定为最高级别重要度与最低级别重要度的比值。分形维数既代表了地层岩石的结构特性,又代表了地层的破碎特性,并且可以通过对钻进过程中上返岩屑的分析直接获得。选取 $a = \sqrt[D]{D}$ 作为方案层的判断矩阵的相邻重要度比率(本文使用的9级重要度共跨越8个重要度间距)。

分形维数 D 与岩石可钻性 K_d 具有良好的线性函数关系^[12,15],可以通过相关计算得到。

2.3 计算方法与步骤

首先,对准则层中的优选因素 c_i 与 c_j ($i, j = 1, 2, \dots, 5$) 的重要度差别进行主观判断,用 c_0 表示 c_i 的重要度与 c_j 的重要度差值,通过表1获得主观判断对应的 c_0 值。准则层的相邻重要度比率 $b = 1.316$,用 b^{c_0} 表示因素 c_i 与 c_j 对目标层 O 的影响之比,准则层中各个因素经过成对比较建立判断矩阵 C :

$$C = \begin{pmatrix} b^{c_{11}} & b^{c_{12}} & \dots & b^{c_{15}} \\ b^{c_{21}} & b^{c_{22}} & \dots & b^{c_{25}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b^{c_{51}} & b^{c_{52}} & \dots & b^{c_{55}} \end{pmatrix}$$

同样,对于方案层中的钻头 p_g 与 p_k ($g, k = 1, 2,$

\dots, m),基于优选因素 c_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 条件下的重要度差值表示为 p_{gk}^i ,再根据该区块 D 的平均值确定相邻重要度比率 $a = \sqrt[D]{D}$,用 $a^{p_{gk}^i}$ 表示钻头 p_g 与 p_k 对优选因素 c_i 的影响之比。在优选因素 c_i 条件下,方案层中各个钻头经过成对比较建立判断矩阵 P_i ($i = 1, 2, \dots, 5$):

$$P_i = \begin{pmatrix} a^{p_{11}^i} & a^{p_{12}^i} & \dots & a^{p_{1m}^i} \\ a^{p_{21}^i} & a^{p_{22}^i} & \dots & a^{p_{2m}^i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a^{p_{m1}^i} & a^{p_{m2}^i} & \dots & a^{p_{mm}^i} \end{pmatrix}$$

之后,使用最大特征值法,分别计算判断矩阵 C 的权重向量 w_C 及 P_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 的权重向量 w_{P_i} 。方案层对目标层的合成权重为

$$w_{p-c} = w_C \times (w_{P_1}, w_{P_2}, \dots, w_{P_5})^T \quad (2)$$

最后,对 w_{p-c} 进行归一化记为 W_{p-c} ,根据 W_{p-c} 中权重值的大小评价出方案的优劣。对应权重值越大的方案,其综合指标越优秀。

3 现场应用及分析

为了验证所建立模型的准确性,现收集某油田区块 S1 井等 8 口井钻井施工中常用的 4 组牙轮钻头(HJT617GH, HJT637GH, HJT737GH, HF647GHMY)的现场实测数据,建立待优选钻头的信息数据库;使用中国石油天然气行业标准(SY/T5415—2003)中的牙轮钻头切削齿的磨损等级公式计算该区块钻头磨损等级。表2为 S1 井的相关数据。

依据现场数据资料,计算整理出待优选钻头的各项优选因素均值(表3)。

表2 S1井数据

Table 2 Data of S1 Well

钻头型号	钻井层段/m	机械进尺/ m	机械钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)	磨损 等级	钻头直 径/mm	钻压/ kN	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	单只钻头 成本/万元	岩石可钻 性均值	岩屑分 形维数
HJT617GH	3754.00~3917.58	163.58	2.19	Y ₆	215.9	200	2.19	6.7	7.67	2.15
HJT617GH	3917.58~4046.97	129.39	2.43	Y ₂	215.9	180	2.43	6.7	8.09	2.24
HJT617GH	4046.97~4079.58	32.61	2.56	Y ₃	215.9	180	2.56	6.7	9.08	2.35
HJT637GH	4079.58~4199.00	119.42	1.83	Y ₂	215.9	160	1.83	5.9	8.27	2.27
HJT637GH	4199.00~4316.33	117.33	1.74	Y ₆	215.9	180	1.74	5.9	7.72	2.16
HJT637GH	4316.33~4510.00	71.64	1.55	Y ₃	215.9	150	1.55	5.9	8.36	2.28

表3 待优选钻头的优选因素数据

Table 3 Criterion data of bits

钻头型号	机械 进尺/m	磨损 等级	平均机械钻 速/($m \cdot h^{-1}$)	单位进尺钻头 成本/($元 \cdot m^{-1}$)	破碎比功/ ($kJ \cdot m^{-3}$)
HJT637GH	100.42	Y ₂	2.020	672.69	1371.53
HJT737GH	103.48	Y ₃	1.926	772.39	1284.37
HJT617GH	115.68	Y ₅	2.165	714.83	1366.24
HF647GHMY	93.99	Y ₄	1.797	779.97	1596.30

该区块火成岩岩屑的平均分形维数 $D = 2.29$,依据上述理论取得 $a = 1.11$, $b = 1.316$ 。对钻头来讲,机械进尺、平均机械钻速越大越好,磨损等级、单位进尺钻头成本、破碎比功越小越好。在目标因素的支配下,依次确定准则层中5项因素的重要度为5,0,3,7,2。然后,分别确定5项优选因素支配下, HJT637GH、HJT737GH、HJT617GH及 HF647GHMY 四组钻头的重要度(表4)。

表 4 待优选钻头的重要度数据
Table 4 Importance data of bits

钻头型号	重要度				
	机械进尺	磨损等级	平均机械钻速	单位进尺钻头成本	破碎比功
HJT637GH	3	6	6	7	5
HJT737GH	5	5	5	1	8
HJT617GH	8	3	8	5	6
HF647GHMY	0	4	0	0	0

在计算各因素间的重要度差值基础上,再计算出上述 4 组钻头的优选权重向量为 $W_{p-c} = (0.5748, 0.4654, 0.5907, 0.3225)$, 钻头优选排序为: HJT617GH, HJT637GH, HJT737GH, HF647GHMY。从决策结果来看, HJT617GH 钻头的综合指标比 HJT637GH 优秀 1.03 倍, 比 HJT737GH 优秀 1.27 倍, 比 HF647GHMY 优秀 1.83 倍。

笔者采用分层与分形维数相结合的新方法选取各层次的相邻重要度比率。当 $a = 1.11$ 但 b 值的选择存在偏差时, 钻头优选权重的变化情况见图 2。指数标度法中的相邻重要度比率的传统确定方法是不区分各层次的差异统一选择的, 当相邻重要度比率的选择存在偏差时, 钻头优选权重的变化情况见图 3。

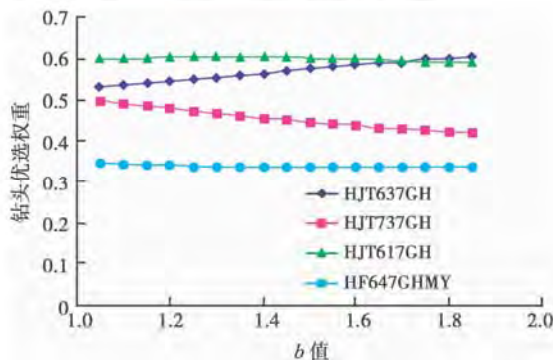


图 2 b 值扰动对钻头优选权重的影响

Fig. 2 Relationship between b -values and bit weight

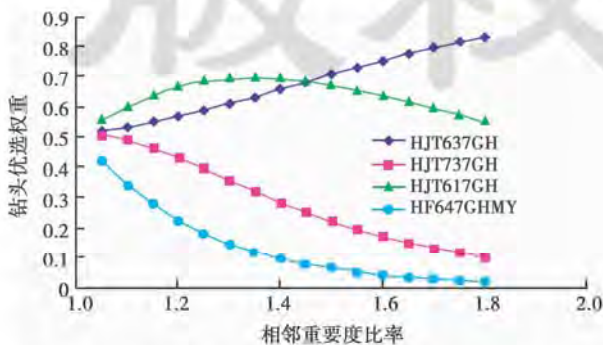


图 3 传统方法中相邻重要度比率扰动对钻头权重的影响

Fig. 3 Relationship between adjacent importance ratio and bit weight in traditional method

对比图 2 及图 3 中曲线的变化趋势可以看出, 相邻重要度比率的传统确定方法无法保证模型决策结果的准确性及稳定性, 相邻重要度比率的微小扰动会导致钻头优选权重的较大变化。笔者采用的相邻重要度比率的新确定方法显著提高了模型决策结果的稳定性, 同时保留了模型调整的灵活性, 4 组钻头的优选权重没有由于 b 的扰动发生重大偏差, 只有当 b 扰动巨大时才会使排序发生细微变化, 这种变化是有实际意义的。表 3 中的数据显示, 与其他 3 组钻头相比, HJT617GH 钻头的抗磨损能力最弱, 其余各项指标百分比差异在 $-6.31\% \sim 23.1\%$ 之间, 优秀倍数为 $0.937 \sim 1.231$ 。结合上述分析可以看出, 新的钻头优选模型能够定量评价钻头的综合性能, 优选结果稳定。

4 结 论

(1) 应用指数标度层次分析法建立了钻头优选层次结构模型, 有效地保证了矩阵的一致性, 简化了钻头优选的计算过程。

(2) 提出了应用分层思想及分形维数相结合的方法选取相邻重要度比率, 有效地保证了钻头优选层次结构模型决策结果的准确性, 增强了该模型的定量评价功能及灵活性。模型可以根据实际需要, 对优选准则及钻头方案进行增加或删除, 准则资料易于获得。

(3) 分形维数是决定该模型决策结果是否准确的关键因素之一。现有钻头中牙轮钻头的破岩岩屑的分形维数可以准确计算, 因此该优选模型能够准确决策牙轮钻头的优选问题。

参 考 文 献

[1] 苏义脑, 周煜辉, 黄洪春. 高歌奋进 为油开道——中国石油钻井工程技术回顾、现状与展望[J]. 石油科技论坛, 2009, 28(5): 9-16.
Su Yinao, Zhou Yuhui, Huang Hongchun. Past, present and prospects of petroleum drilling engineering technology in China [J]. Oil Forum, 2009, 28(5): 9-16.

[2] 闫铁, 刘春天, 毕雪亮, 等. 人工神经网络在大庆深井钻头优选中的应用[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 102-106.
Yan Tie, Liu Chuntian, Bi Xueliang, et al. Application of artificial neural network on optimizing bit type in Daqing deep wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 102-106.

[3] 潘起峰, 高德利, 孙书贞, 等. PDC 钻头选型新方法[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 123-126.
Pan Qifeng, Gao Deli, Sun Shuzhen, et al. A new method for PDC bit selection [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 123-126.

[4] 张辉, 高德利. 钻头选型方法综述[J]. 石油钻采工艺, 2005,

- 27(4):1-5.
Zhang Hui, Gao Deli. Review on drill bit selection methods[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(4):1-5.
- [5] 田富林. 钻头选型方法研究与应用[D]. 成都:西南石油学院, 2003.
Tian Fulin. Research and application of the bit optimization methods[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2003.
- [6] 舒康, 梁镇韩. AHP 中的指数标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1990, 10(1):6-8.
Shu Kang, Liang Zhenhan. The index scale method in AHP[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 1990, 10(1):6-8.
- [7] 闫铁, 李玮, 毕雪亮, 等. 一种基于破碎比功的岩石破碎效率评价新方法[J]. 石油学报, 2009, 30(2):291-294.
Yan Tie, Li Wei, Bi Xueliang, et al. A new evaluation method for rock-crushing efficiency based on crushing work ratio[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2):291-294.
- [8] 吕跃进, 张维. 指数标度在 AHP 标度系统中的重要作用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(5):452-456.
Lü Yuejin, Zhang Wei. Kernel function of index scale in AHP scale system[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(5):452-456.
- [9] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 1997:240-245.
Xie Heping. Introduction to fractal-rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1997:240-245.
- [10] 王城辉, 廖淑华. 分形与石油[M]. 北京:石油工业出版社, 1994:140-147, 233-236.
Wang Chenghui, Liao Shuhua. Fractal and oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994:140-147, 233-236.
- [11] Matsui T, Waza T, Kani K, et al. Laboratory simulation of planetesimal collision [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(B13):10968-10982.
- [12] 李玮, 张凤民, 闫铁, 等. 油气钻井中上返岩屑的分形分析[J]. 钻采工艺, 2008, 31(5):142-144.
Li Wei, Zhang Fengmin, Yan Tie, et al. Fractal analysis on upward debris in oil and gas drilling well[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5):142-144.
- [13] Nagahama H. Fracturing in the solid earth[J]. The Science Reports of the Tohoku University; Second Series, Geology, 1991, 61(2):103-126.
- [14] Ochiai M, Ozao R, Yamazaki Y, et al. Self-similarity law of particle size distribution and energy law in size reduction of solids[J]. Physica A, 1992, 191(2):295-300.
- [15] 李士斌, 闫铁, 李玮, 等. 地层岩石可钻性的分形表示方法[J]. 石油学报, 2006, 27(1):124-127.
Li Shibin, Yan Tie, Li Wei, et al. Fractal representation of rock drillability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1):124-127.

(收稿日期 2011-11-11 改回日期 2012-02-07 责任编辑 王 秀)

《石油学报》2012 年第 4 期部分文章预告(II)

油页岩的地球物理识别和评价方法	张佳佳等
基于砂岩油藏地震数据流体替换研究	李景叶
海外油气勘探资产技术经济评价思路与方法	王 青等
二类油层不同注采类型井组聚驱最佳调整时机	李宜强等
多孔介质中流动泡沫结构图像的实时采集与定量描述	侯 健等
稠油碱驱中液滴流提高采收率机理	裴海华等
胶质降解和生物乳化在稠油降黏中的作用	齐义彬等
海上疏松砂岩适度出砂井防砂方式优选	邓金根等
气井连续携液机理	王志彬等
相态变化对气藏流体结垢的影响	李 丽等
预弯曲连续油管及其疲劳寿命预测	李子丰等
钻柱结构影响声波传输特性的理论	管志川等
钻井堵漏和封堵的特种凝胶的抗冲稀性能	王平全等
三组分混合物超音速凝结机理	蒋文明等
垂直钻井工具测斜仪的精确校正理论与实验	邵 佩等
内衬管修复旧管道安装拉力的理论与数值模拟	白 勇等
盐岩全过程蠕变试验及模型参数辨识	张华宾等