

[引著格式] 吴亚红, 田西山, 王黎, 等. 支持向量机在缝洞型碳酸盐岩油藏堵水决策的研究应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (3+4): 34~37.

# 支持向量机在缝洞型碳酸盐岩油藏堵水决策的研究应用

吴亚红, 田西山 (中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

王黎 (中石化中原石油工程有限公司井下特种作业公司, 河南 濮阳 457100)

李博媛 (中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

林鑫 (中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100103)

[摘要] 塔河油田是典型的缝洞型碳酸盐岩油藏, 储集体非均质性强, 油水界面不清楚, 出水量大, 堵水效果整体较差。现有堵水工艺堵水有效率仍较低, 需要进行技术集成。根据缝洞型碳酸盐岩油藏的储层特征, 建立堵水井生产概念模型, 从油藏地质因素、油藏开发状况和工程工艺三方面总结影响堵水效果的 11 个因素, 对影响堵水效果的各类因素采用均值和均方差的处理方法, 优选出影响堵水效果的主要因素。采用支持向量机方法建立塔河油田奥陶系油井堵水效果预测模型, 并对 8 口井进行实例预测, 符合率达到 87%。对于塔河油田有限的堵水样本, 利用支持向量机方法进行堵水决策具有较高的精度, 可以用来指导塔河油田的堵水选井选层工作。

[关键词] 缝洞型油藏; 碳酸盐岩油藏; 堵水; 支持向量机; 选井; 选层; 塔河油田

[中图分类号] TE358.3 [文献标志码] A [文章编号] 1000-9752 (2015) 03+04-0034-04

塔河油田位于塔里木盆地沙雅隆起阿克库勒凸起西南部斜坡, 以奥陶系碳酸盐岩储层为主力油层。近年来塔河油田开展了堵水选井选层方法的相关技术研究, 包括堵水地质模型综合分析法、权重选井分析法和神经网络分析法<sup>[1]</sup>, 逐步完善发展了井筒堵水工艺和深部堵水工艺, 堵水技术有了一定进展<sup>[2,3]</sup>。但是在实践中, 仍然碰到了现有堵水工艺堵水有效率较低、部分复杂井况高含水井尚不能有效治理等重重困难。问题主要在于尚无一套完善的堵水井层优选理论, 堵水实例偏少, 堵水工艺尚需进一步优化。

支持向量机 (support vector machine, SVM) 是 Vapnik 等人根据统计学理论提出的一种新的机器学习方法, 它基于结构风险最小化原理, 适用于模式识别、函数预测等领域<sup>[4,5]</sup>。利用优选出的影响堵水效果的主要因素, 使用支持向量机方法建立堵水效果预测模型, 并通过实例验证该方法的有效性。

## 1 堵水井生产概念模型的建立

缝洞型碳酸盐岩油藏油水关系复杂, 生产动态分析中含水上升的特征是储层类型和油水渗流特征的综合反映。含水上升类型可分为以下 4 类: 台阶上升型、暴性水淹型、反复波动型和缓慢上升型<sup>[1,6]</sup>。不同的含水上升类型对应着不同的地质特征、水体发育状况, 综合分析两者对含水上升的影响对堵水决策有重大意义, 以此来建立堵水的生产概念模型。

### 1.1 台阶式上升型

含水台阶式上升型油井对应的储层特征多为: 一是油井下部裂缝发育较弱, 上部裂缝受钻井影响较为发育, 且呈台阶式, 在不同深度有多个裂缝发育带且都有高角度缝连接; 二是不同缝宽的裂缝其启动

压差不同。水体渗流压差达到某种程度后即突破此裂缝，造成油井短时间内含水迅速上升。

### 1.2 暴性水淹型

含水暴性水淹型油井初期无水产油或低含水生产，生产一段时间后见水，见水后含水迅速上升，在极短的时间内含水率上升至很高的水平甚至全井产水。大型溶洞油水界面的抬升，使水迅速占领了近井地带的渗流裂缝带，严重干扰了油在裂缝中的渗流。

### 1.3 反复波动型

含水反复波动型油井对应的储层情况较为复杂，储层的孔、洞、缝均不发育，同时垂直裂缝较不发育。该类型井产层一般处于相对较高部位，与油水界面距离较远，水体能量有限。产层下部流体沿着裂缝向被不规则发育缝洞分隔的油体推进，油井增产措施的实施，裂缝在生产过程中的张开与闭合等，都会导致含水率忽高忽低的变化。

### 1.4 缓慢上升型

含水缓慢上升型油井的地质特征可总结为油井只有一套供液储集体，油井附近只有一套缝洞系统，在生产过程中不存在油水互相干扰的情况，属于含水正常上升。这种含水正常上升的油井除非产液剖面油水段间隔清晰，否则基本不存在堵水潜力。

## 2 堵水效果影响因素的选取

堵水措施效果是各种因素共同作用的结果，以往对堵水影响因素的分析一般为单因素分析，没有进行多因素综合考虑和对比。影响堵水措施效果的因素归结起来有 3 类：油藏地质因素、油藏开发状况和工程工艺。这三方面涵盖了几乎所有的堵水效果影响因素，其中大部分是非人为可控的，但有些是要调整改造的对象<sup>[1,7]</sup>。笔者选取了 11 个因素：地层真电阻率、冲洗带电阻率、电阻率差值、自然伽马、井径、声波时差、中子孔隙度、地层密度、产层厚度、施工排量和堵剂用量作为堵水效果的主要影响因素，分别对堵水井段各物性的均值、均方差值进行了计算，分析了堵水作业的效果。

## 3 堵水措施关键参数的分析

堵水措施作业是否有效应当从两个方面进行评判，一是从作业后含水率的下降和日产油的增加来评判作业的效果；二是从堵水有效期、含水未超过作业前的累计增油量来评判堵水作业的效果。依据油井堵水效果评价方法标准，结合油田堵水实际情况，对堵水效果的界定<sup>[8]</sup>：①堵水有效指的是进行堵水作业后油井综合含水率下降 15% 以上并且日产液水平无明显降低；②堵水无效指的是进行堵水作业后油井含水无明显降低，或有轻微下降但同时油井日产液能力也下降。对堵水有效期的界定是：①油井堵水作业后综合含水率降到作业前程度的生产时间；②堵水作业后综合含水率未下降到作业前程度，但日产液能力下降导致日产量下降至作业前程度的生产时间。

通过对塔河油田过去 32 井次的地质参数进行分类统计分析，分别采用均值和因素均方差代表油井产段的综合物性和物性差异度，采用相关分析方法，给出各指标间的相关程度。

如表 1 所示，对于累计增油量影响显著的因素为冲洗带电阻率、地层真电阻率、电阻率差、自然伽马、中子孔隙度、地层密度、产段厚度、施工排量、堵剂用量；冲洗带电阻率、电阻率差和地层密度在井段的差异度对增油量影响较为显著。

如表 2 所示，对于堵水有效期影响显著的因素为冲洗带电阻率、地层真电阻率、电阻率差、自然伽马、地层密度、产段厚度、施工排量、堵剂用量；冲洗带电阻率和地层密度在井段的差异度对堵水有效期影响较为显著。

表1 各影响因素与堵水累计增油量相关系数表

参数	影响因素均值		影响因素均方差	
	相关系数	显著性	相关系数	显著性
冲洗带电阻率	0.326	*	0.131	*
地层真电阻率	0.267	*	0.081	
电阻率差	-0.221	*	0.107	*
自然伽马	-0.147	*	-0.05	
井径	-0.01		0.052	
声波时差	-0.029		0.036	
中子孔隙度	-0.107	*	-0.05	
地层密度	-0.151	*	-0.138	*
产段厚度	0.168	*		
施工排量	-0.339	*		
堵剂用量	0.22	*		

表2 各影响因素与堵水有效期相关系数表

参数	影响因素均值		影响因素均方差	
	相关系数	显著性	相关系数	显著性
冲洗带电阻率	0.336	*	0.133	*
地层真电阻率	0.272	*	0.09	
电阻率差	-0.243	*	0.055	
自然伽马	-0.139	*	-0.089	
井径	-0.006		0.069	
声波时差	-0.004		0.068	
中子孔隙度	-0.088		-0.024	
地层密度	0.154	*	-0.114	*
产段厚度	0.13	*		
施工排量	-0.203	*		
堵剂用量	0.19	*		

### 4 支持向量机堵水效果预测模型的建立

在用支持向量机对堵水决策问题进行建模时，涉及到模型参数的优选问题，如核函数及其参数  $G$  的选取、错分惩罚参数  $C$  的选取等，到目前为止仍没有完善的理论方法<sup>[9~11]</sup>。通常流行的做法是采用交叉验证法<sup>[12,13]</sup>，该方法能对实际问题做出最好的反映。

在对模型数据进行量化方面，效果的定量化描述为堵水有效则取值为1，无效取值为-1，在实际预测中用符号函数判别即可预测堵水是否有效。求解模型的二次规划问题时采用了最常用的C-SVM算法。使用交叉验证法优选参数时，每次提取出5个样本来验证模型的泛化能力。经过反复试算，得到各项最优参数如表3所示。

表3 支持向量机模型优选参数表

样本维数	核函数	G	C	支持向量数	正确识别率/%
17×21	径向基	0.00049	512	17	81
17×21	径向基	0.0078	32	17	76
17×21	径向基	0.125	2	19	76
17×21	径向基	0.0021	182	17	18
17×21	径向基	0.0078	8	19	71

注：G为核函数（gamma）半径。

根据以上参数代入模型训练得到的支持向量，取  $G=0.00049$ ， $C=512$ ，支持向量数为17。

### 5 实例应用

为验证支持向量机模型的准确性，选取了8口塔河油田未参与建模的井进行堵水施工预测，对所建立的模型进行实例检验，预测效果如表4所示。

表4 堵水决策系统实例分析表

井号	层位	生产井段 /m	厚度 /m	层数	堵前		堵后		预测 结果	预测 效果
					日产油/m <sup>3</sup>	含水率/%	日产油/m <sup>3</sup>	含水率/%		
TK434	O <sub>1</sub>	5426.3~5477.5	34	4	1.6	95.1	23.3	50.2	推荐	符合
YH12121	O <sub>2yj</sub>	5917.5~5988	37	5	1.9	96.2	4.6	11.1	不推荐	不符合
S66	O <sub>1-2y</sub>	5496~5560	28.5	4	5.7	87.6	28.7	1.5	推荐	符合
TK315	O <sub>1-2y</sub>	5423.5~5496.13	26.13	2	1.1	98.2	0.2	99.4	不推荐	符合
TK254	O <sub>2yj</sub>	5561~5630	21	3	1.5	98.5	7.9	78.4	推荐	符合
TK227	O <sub>2yj</sub>	5585.0~5627.0	32.5	3	5.7	87.2	18.7	62.3	推荐	符合
TK217	O <sub>1y</sub>	5458.77~5514.73	8	2	0.6	98.9	12.1	70.5	推荐	符合
TH10217	O <sub>1-2y</sub>	5699.20~5749.54	26	3	0.9	98.8	72.1	0.9	推荐	符合

注：O<sub>1</sub>为下奥陶统；O<sub>2yj</sub>为中奥陶统一间房组；O<sub>1-2y</sub>为中下奥陶统鹰山组。

通过以上 8 口井的实例预测，只有 1 口井不符合实际堵水效果，其余 7 口井全部符合，符合率为 87%，达到了预期的要求。

## 6 结论

应用统计相关分析方法分别对各种影响堵水效果的因素进行分析，建立了 4 种堵水井生产概念模型，确定了不同的影响因素对堵水效果的影响程度。利用支持向量机方法在结构风险最小化准则的指导下，在塔河油田有限堵水样本基础上进行建模，形成了缝洞型碳酸盐岩油藏油井堵水决策模型。实例测试效果表明，在塔河油田堵水选井选层方面支持向量机方法具有较高的适用性。

### [参考文献]

- [1] 秦飞, 吴文明, 杨建清, 等. 塔河油田堵水选井选层因素分析及方法探讨 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2013, 35 (6): 121~126.
- [2] 王建云. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏堵水工艺技术浅谈 [J]. 新疆石油天然气, 2005, 1 (2): 73~79.
- [3] 李宗宇. 塔河奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28 (6): 856~862.
- [4] Vapnik V. The nature of Statistical learning theory [M]. New York: Springer, 1995: 10~45.
- [5] Vapnik V. Statistical learning theory [M]. New York: John Wiley&-Sons Inc, 1998.
- [6] 孟庆民, 孙辉, 刘太昂, 等. 碳酸盐岩油藏堵水工艺有效性预测研究 [J]. 计算机与应用化学, 2011, 28 (6): 754~756.
- [7] 荣元帅, 高艳霞, 李新. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏堵水效果地质影响因素 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32 (54): 940~945.
- [8] 谭承军, 朱伟, 马旭杰. 塔河碳酸盐岩洞缝型油藏堵水效果评价方法初探 [J]. 新疆地质, 2004, 22 (1): 99~102.
- [9] Chapelleo, Vapnikv, Basquesto, et al. Choosing multiple parameters for support vector machines [J]. Machine Learning, 2002, 46 (1): 131~159.
- [10] Duankb, Keerthiss, Pooan. Evaluation of simple performance measures for tuning SVM hyperparameters [J]. Neurocomputing, 2003, 51: 41~59.
- [11] 邱啸, 魏延, 吴瑕. 基于混合核函数的支持向量机 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学版), 2011, 25 (10): 66~70.
- [12] Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection [A]. Tom B C. Proc 14<sup>th</sup> Joint Int Conf Artificial Intelligence [C]. USA: IEEE, 1995, 1137~1145.
- [13] 牛晓太. 基于 KNN 算法和 10 折交叉验证法的支持向量选取算法 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2014, 48 (3): 335~338.

[编辑] 黄鹂