

# 海上油田多层合采井产量劈分方法

杨 明,马 栋,王 雨,周凤军,何 芬

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300450)

**摘要:**海上多层合采时井斜超过 70°的定向井受测试工艺限制无法进行产液剖面测试,给油气藏开发动态认识及后期挖潜带来不利影响。在分析突变理论原理的基础上,将油层厚度、孔隙度和含油饱和度划分为储量特征因素,将渗透率、原油黏度、地层压力和注入 PV 数划分为开发特征因素,并对其分别构建相应的突变模型。在求得各子系统产层目标值与相对突变面目标值的基础上,计算各层的产量劈分系数,得到基于突变理论的多层合采井产量劈分新方法。将该方法计算结果与传统方法及实际测试结果分别进行对比,相对误差在±8.0%以内,表明该方法劈分系数合理可靠。应用该方法对多层合采井进行了产量劈分,落实产层潜力,成功指导了调整井挖潜。

**关键词:**海上油藏;多层合采;突变理论;产量劈分

**中图分类号:**TE323 **文献标识码:**A

## Production splitting method for multi-layer production wells in offshore oilfields

YANG Ming, MA Dong, WANG Yu, ZHOU Fengjun, HE Fen

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Multi-layer production of directional wells is used in offshore layered reservoirs. Due to the limitation of testing technology, the directional wells with a well deviation angle over 70 degrees can not be tested for fluid production profile, which has adverse effects on the understanding of reservoir development performance and the improvement of oil recovery. Based on the analysis of catastrophe theory, the reservoir thickness, the porosity, and the oil saturation were considered as the reserve characteristic factors, and the permeability, the oil viscosity, the pressure, and the injection PV number were classified as the development characteristic factors. And then the corresponding catastrophe models were built respectively. Based on the obtained target values of the production layer and relative catastrophe surface of each subsystem, the production splitting coefficient of each layer was calculated. So it was established the new production splitting method for multi-layer production wells based on catastrophe theory. The results calculated by the new method were compared with those from the traditional method and actual test, with a relative error within  $\pm 8.0\%$ , indicating that the new method is reasonable and reliable, and can be applied in the multi-layer production splitting, to guide the potential tapping of the adjustment wells.

**Key words:** offshore reservoir; multi-layer production; catastrophe theory; production splitting

海上油田层状油藏多采用定向井合采的开发方式以追求最大的经济效益。对于多层油藏注水开发时,认识各层的注采状况,分析清楚各层的动用程度,才能为分层挖潜措施提供依据。由于海上油田受平台空间、测试工艺的制约,井斜超过70°的多层合采井无法进行产液剖面测试,使得分层储量动用情况及剩余油分布研究难度加大。传统的产量劈分方法主要有KH法<sup>[1-2]</sup>、数值模拟法<sup>[3]</sup>和数据分析法<sup>[4]</sup>等。KH法未考虑地层压力、流体黏度、注入状况对各层产量的影响,考虑因素不够全面;数值模拟

法需要基于历史拟合基础,计算过程繁琐;数据分析法针对于目标油田抽提出厚度与孔隙度两个因

收稿日期:2019-06-16;改回日期:2019-07-28。

**第一作者简介:**杨明(1987—),硕士,工程师,主要从事石油天然气开发研究。E-mail: yangming18@cnoc.com.cn。

**基金项目:**国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058-001);中海石油(中国)有限公司科技攻关项目“渤海‘双高’油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)。

素进行研究,适用性有待加强。

本文从影响多层合采井产量劈分的敏感性因素出发,通过引入由数学拓扑学发展而来的突变理论,建立了考虑储量特征和开发特征两大因素的多层油藏合采井的产量劈分新方法。经现场应用验证,该方法符合率较高,在缺乏产液剖面测试资料的情况下,仍可快速计算得到各层的产出状况,对分析小层剩余油及制订挖潜措施有指导作用。

## 1 突变理论原理与方法

突变理论是一门综合运用拓扑学、奇点理论和结构稳定性研究内部作用不确定系统突变现象的数学学科,也可进行具有相同影响因素的不同物质的排序优选<sup>[5]</sup>。突变理论通过对评判的总目标进行多层次分解,得到评判目标的多层次架构图,然后根据不同模型的归一化公式进行多次量化运算,得到最终的评价结果。突变理论采取定性分析与定量评价相结合,保证了评价过程的科学性和评价结果的合理性。

在石油天然气工程领域,已有学者应用突变理论进行了研究。孙文卿<sup>[6]</sup>、陈茂谦<sup>[7]</sup>等应用突变理论建立了煤层气储层评价模型对煤层气区块进行综合评价和筛选;戴勇<sup>[8]</sup>、郭德运<sup>[9]</sup>等在地震资料储层预测中应用突变理论建立地震信号突变模型指导储层预测;肖伟<sup>[10]</sup>等将突变理论用于完井方式的综合评价及优选;陈仁保<sup>[11]</sup>等应用突变理论对CO<sub>2</sub>混相驱油藏进行综合评价和筛选;顾岱鸿<sup>[12]</sup>、田冷<sup>[13]</sup>等利用突变理论建立了多层合采气井的产量劈分模型。

多层合采的油藏中每个产层的产量都具有相同影响因素,当产层各因素稳定时,各层的贡献产量比例稳定。每个因素的变化会影响产层在整井产量中的分配关系,进而形成新的产出状态的平衡,因此,多层合采井的产量分配过程符合突变理论的“稳定性”的特点,突变理论可用于计算各产层的产量劈分系数。

突变理论根据系统内部影响因素的个数分为折叠突变、尖点突变、燕尾突变、椭圆脐突变、双曲突变、蝴蝶突变及抛物突变等7种突变模型<sup>[14]</sup>。应用最广泛的突变类型包括尖点突变模型,适用于具有2个影响因素的系统;燕尾突变适用于具有3个影响因素的系统;蝴蝶突变模型适用于具有4个影响因素的系统。在应用突变理论进行产量劈分系数计算

时,可结合分析体系的结构和影响因素个数选用不同的突变模型。

## 2 计算方法及结果验证

### 2.1 系统分析体系的建立

把多层合采井各产层的产量劈分系数设为状态变量,为系统的目标值,将影响各层产量的储层有效厚度、孔隙度、含油饱和度、渗透率、地下原油黏度、地层压力(基准面)、注入PV数等七大因素设置为控制变量,构成系统的指标层。将储层有效厚度、孔隙度和含油饱和度划分为储量特征,渗透率、地下原油黏度、地层压力、注入PV数划分为开发特征,两大特征构成系统的准则层(见图1)。

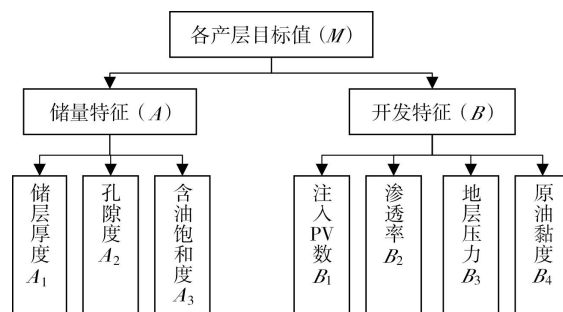


图1 系统分析体系

由各子系统控制变量个数确定相应突变模型,其中储量特征的3个影响因素构成燕尾突变模型,开发特征的4个影响因素构成蝴蝶突变模型,储量特征和开发特征又构成尖点突变模型。

### 2.2 计算过程

以BZ油田的一口实际定向采油井为例,其合采明化镇油组三个层位,各层的储量特征参数和开发特征参数见表1。

#### 2.2.1 基本假设条件

由于突变理论适用于对具有相同影响指标的不同系统进行评价,因此应用此方法计算产量劈分系数时,认为各层的产量贡献都由相同的地质和开发因素控制,不考虑层间窜流以及生产过程中地层压力下降引起的孔隙度和渗透率的变化。

#### 2.2.2 无量纲归一化处理

系统突变隶属函数值的计算需要对所有控制变量进行无量纲归一化处理,即将系统的影响因素值归一化到0~1之间,公式如下:

$$\xi_i = x_i / c_i \quad (1)$$

式中, $\xi_i$ 为无量纲归一化后的某因素的值;当影响因素对系统有利时, $x_i$ 为各层的影响因素值, $c_i$ 为

该影响因素的最大值;当影响因素对系统不利时, $x_i$  无量纲归一化后的值;下标*i*代表不同的影响因素  
为各层的影响因素值的倒数, $c_i$ 为该影响因素倒数的  $(A_1、A_2、A_3、B_1、B_2、B_3、B_4)$ 。对模型中各影响因素值进  
行归一化后结果见表1。

表 1 控制变量指标值统计

项目	层位	储量特征(A)			开发特征(B)			
		油层厚度 (A <sub>1</sub> )/m	孔隙度 (A <sub>2</sub> )/%	含油饱和度 (A <sub>3</sub> )/%	注入 PV 数 (B <sub>1</sub> )/ 小数	渗透率 (B <sub>2</sub> )/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	地层压力(基准面) (B <sub>3</sub> )/MPa	原油黏度 (B <sub>4</sub> )/(mPa·s)
原始值 ( $x_i$ )	Nm I -1	3.3	28.6	61.2	0.05	601.0	9.6	12.9
	Nm I -2	6.2	30.9	67.2	0.17	1886.0	10.0	12.7
	Nm I -3	3.7	25.2	51.9	0.09	158.4	11.4	12.5
$X_{mi}$	相对突变面	3.3	25.2	51.9	0.05	158.4	9.57	12.9
无量纲化 ( $\xi_i$ )	Nm I -1	0.53	0.93	0.91	0.31	0.32	0.84	0.97
	Nm I -2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	0.98
	Nm I -3	0.60	0.82	0.77	0.56	0.08	1.00	1.00
$\xi_{mi}$	相对突变面	0.53	0.82	0.77	0.31	0.08	0.84	0.97

2.2.3 选取相对突变面系统

突变理论在评价具有相同内部影响因素的不同系统时,人为筛选出一个内部影响因素的最不利组合,称为相对突变面系统。通过计算相对突变面系统和各个系统的目标值,计算结果中某一个系统目标值与相对突变面目标值差距越大,说明这个系统越有优势。

在表1的各个影响因素中,油层厚度、孔隙度、含油饱和度、注入PV数、渗透率和中深压力选取最小值作为相对突变面,原油黏度选取最大值作为相对突变面。

2.2.4 计算各层产量劈分系数

分别通过尖点突变模型、燕尾突变模型和蝴蝶突变模型的分歧点集方程归一公式<sup>[15]</sup>(式2~4),求出各层的每个影响参数对其所在的子系统的目标值的贡献值。

$$\delta_i=\sqrt{v},\delta_i=\sqrt[3]{v},\delta_i=\sqrt[4]{w} \tag{2}$$

$$\delta_u=\sqrt{u},\delta_v=\sqrt[3]{v},\delta_w=\sqrt[4]{w},\delta_t=\sqrt[5]{t} \tag{3}$$

式中, $u、v、w、t$ 分别为不同的突变模型对应的影响因素(或其突变面)的归一化值; $\delta_u、\delta_v、\delta_w、\delta_t$ 分别为不同突变模型对应的影响因素(或其突变面)的贡献值。

通过各子因素贡献值的加权平均分别计算出指标层对各产层系统的贡献值。

根据尖点突变归一公式(4)计算准则层(储量特征*A*和开发特征*B*)对各产层的贡献值 $\delta_A$ 和 $\delta_B$ ,加权平均后得到各产层的目标值*M<sub>i</sub>*。对于相对突变面系

统,也可计算出系统目标值*M'*。

$$\delta_u=\sqrt{u},\delta_v=\sqrt[3]{v} \tag{4}$$

在求得各产层目标值*M<sub>i</sub>*和相对突变面目标值*M'*的基础上,根据式(5)计算得到各层的产量劈分系数。

$$P_i=\frac{M_i-M'}{\sum_{i=1}^n(M_i-M')} \tag{5}$$

以表1中的相对突变面为例,储量特征子系统内部的储层厚度*A<sub>1</sub>*、孔隙度*A<sub>2</sub>*、含油饱和度*A<sub>3</sub>*三个因素构成燕尾突变模型。

根据公式(3)计算得到:

$$\delta_{mA_1}=\sqrt{\xi_{mA_1}}=\sqrt{0.53}=0.729\ 6 \tag{6}$$

$$\delta_{mA_2}=\sqrt[3]{\xi_{mA_2}}=\sqrt[3]{0.82}=0.934\ 3 \tag{7}$$

$$\delta_{mA_3}=\sqrt[4]{\xi_{mA_4}}=\sqrt[4]{0.77}=0.937\ 3 \tag{8}$$

因此

$$\delta_{mA}=(\delta_{mA_1}+\delta_{mA_2}+\delta_{mA_3})/3=0.867\ 1 \tag{9}$$

同理,注入PV数*B<sub>1</sub>*、渗透率*B<sub>2</sub>*、地层压力*B<sub>3</sub>*、原油黏度*B<sub>4</sub>*构成蝴蝶突变,利用公式(4)计算得到 $\delta_{mB}=0.737\ 3$ 。准则层的储量特征和开发特征构成尖点突变,利用公式(4)得到相对突变面产层系统的目标值*M'*。

$$M'=(\sqrt{\delta_{mA}}+\sqrt[3]{\delta_{mB}})/2=0.917\ 3 \tag{10}$$

同样方法求得该模型中各产层的系统目标值,见表2。该井的产量劈分系数即可通过公式(5)计算得到。

表2 各产层系统目标值

层位	Nm I -1	Nm I -2	Nm I -3	相对突变面
储量特征 A	0.893 7	1.000 0	0.881 4	0.867 1
开发特征 B	0.800 6	0.991 4	0.796 0	0.737 3
产层目标值 $M_i$	0.937 0	0.998 6	0.932 8	0.917 3
产量劈分系数 $P_i$	0.17	0.70	0.13	—

2.2.5 结果验证

为了验证本文方法正确性,应用传统的KH方法、数值模拟方法、实际产液剖面测试资料与突变方法的计算结果进行了对比,结果表明用突变理论求出的产量劈分系数更加接近数值模拟结果和实际测试资料,各层的产量劈分系数与实际测试资料相比相对误差在±8.0%以内,相比传统的KH方法,本文方法的劈分结果准确可靠(见图2)。

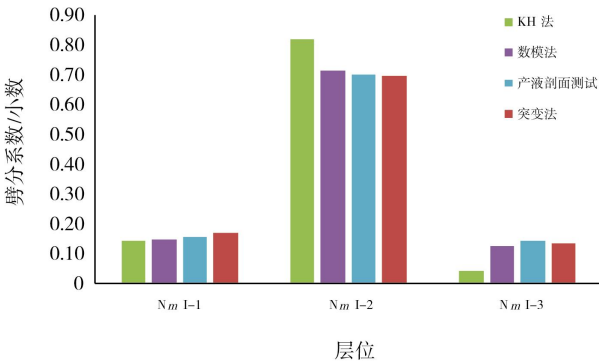


图2 产量劈分系数对比

2.3 现场应用

BZ油田某区块的2口多层合采井由于井斜较大,无法测试产液剖面,各层产出情况认识不清。为了落实各层储量潜力,根据本文劈分方法对该区块2口采油井进行了累产油量的劈分系数计算。其中P1井同时生产NmⅢ、NmⅣ和NmⅤ三个层位,目前累产油 $15.48\times10^4\text{ m}^3$ ,含水率11.6%;P2井同时生产NmⅤ和Ng两个层位,目前累产油 $2.44\times10^4\text{ m}^3$ ,含水3.5%;各层均为注水开发。根据各层注水井端的吸水剖面测试资料,分别计算得到了各层的注入PV数,相关计算参数见表3。

通过计算,P1井在NmⅤ层位的产量劈分系数为0.24,P2井在NmⅤ层位的产量劈分系数为0.79,可得P1井和P2井在NmⅤ层位累产油 $5.69\times10^4\text{ m}^3$ ,结合该层的分层静压测试资料,应用物质平衡法计算NmⅤ层位动态储量约 $131.12\times10^4\text{ m}^3$ (见表4),目前该层位静态探明原油地质储量仅 $50.91\times10^4\text{ m}^3$ ,存在明显的动静态矛盾。

结合上述研究成果,通过提出1口局部加密调整井P3加深评价NmⅤ层位,钻遇13.4 m厚油层,新增探明原油地质储量 $65.00\times10^4\text{ m}^3$ ,验证了本文产量劈分方法计算的结果,实现了该区块的滚动挖潜和产量接替。

表3 BZ油田某区块合采井产量劈分

井号	层位	参数							劈分系数 / 小数
		油层厚度 / m	孔隙度 / %	含油饱和度 / %	注入 PV 数 / 小数	渗透率 / $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	地层压力 (-1 450 m)/MPa	原油黏度 / (mPa·s)	
P1	NmⅢ	8.8	27.5	65.6	0.07	508.2	10.5	8.0	0.62
	NmⅣ	4.1	23.5	58.8	0.02	165.6	10.9	5.4	0.14
	NmⅤ	6.2	21.4	64.3	0.03	40.2	11.0	1.8	0.24
P2	NmⅤ	8.5	22.2	46.6	0.03	37.6	11.0	1.8	0.79
	Ng	4.9	22.3	59.8	0.01	49.3	10.5	1.3	0.21

表4 NmⅤ层位动态储量计算

层位	累产油 / $10^4\text{ m}^3$	累产水 / $10^4\text{ m}^3$	累注水 / $10^4\text{ m}^3$	原油体积系数 / 无因次	原油原始体积系数 / 无因次	综合压缩系数 / $10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$	地层压降 / MPa	动态储量 / $10^4\text{ m}^3$
NmⅤ	5.69	0.64	3.52	1.171	1.169	70.5	3.5	131.12

需要指出,本文应用突变法对多层合采井的产量劈分仅限于采油井中低含水期的产油量劈分,当采油井进入高含水期时,表明油藏中某层已发生了含水突破,造成该层无效水循环,层间矛盾增大,影

响各产层产量劈分的因素还有层间干扰系数、含水率差异等,指标层还需引入更多的开发因素进行计算,因此,对于高含水多层合采井的产量劈分还需进一步研究。

### 3 结论

(1)通过突变理论充分考虑影响各层产量贡献的储量因素和开发因素,建立了多层合采井产量劈分新模型,应用该模型求出了各层位的产量劈分系数,其较KH法更接近数值模拟结果和实际产液剖面测试结果,与实际测试结果相对误差在 $\pm 8.0\%$ 以内,其劈分结果更加准确可靠。

(2)根据新建立的多层合采井的产量劈分模型,对研究区内2口合采井进行了产量劈分系数的计算,得到各产层的累产油,结合物质平衡法计算了NmV产层的动态储量潜力。通过布置调整井进行挖潜,落实了储量潜力,新增探明原油地质储量 $65.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3)本方法与传统产量劈分方法相比,创新性地引入突变理论,更方便快捷地计算多层合采井各产层的产出情况,具有较高的精度,在缺少产液剖面测试资料的情况下,可有效指导多层合采井的产量劈分,为认识各层产出状况和指导下一步挖潜奠定了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 杨兆平,岳世俊,郑长龙,等.薄互层砂岩油藏多因素综合约束的产量劈分方法[J].岩性油气藏,2018,30(6):117-124.
- [2] 王振升,刘子藏,杜艳蕾,等.层状油气藏多层合采油气井产量劈分方法[J].天然气地球科学,2016,27(10):1878-1882.
- [3] 杨欢,喻高明,鄢宇杰,等.产量劈分模式数值模拟研究

[J].油气地球物理,2011,(6):22-23.

- [4] 罗刚,蒋志斌,徐后伟,等.基于数据挖掘的单层产量劈分方法[J].石油天然气学报,2014,36(10):148-151.
- [5] 凌复华.突变理论及应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- [6] 孙文卿,冉茂云,熊建龙,等.突变理论在煤层气储层评价中的应用——以准格尔盆地砂沟井田为例[J].天然气工业,2006,33(2):28-21.
- [7] 陈茂谦,师俊峰,金娟.突变评价法在煤层气评价和选区中的应用[J].石油钻探技术,2009,37(2):74-77.
- [8] 戴勇,李正文,吴大奎.突变论在地震资料储层预测中的应用[J].天然气工业,2006,26(6):47-49.
- [9] 郭德运,夏玲燕,柏冠军,等.基于突变理论的地震资料解释技术及应用[J].石油物探,2008,47(2):132-135.
- [10] 肖伟,吴晓东,韩国庆,等.用突变理论综合评价法优选完井方式[J].石油钻采工艺,2008,30(6):46-51.
- [11] 陈仁保,师俊峰,吴晗.突变论在CO<sub>2</sub>混相驱油藏综合评价中的应用[J].新疆石油地质,2008,29(3):344-346.
- [12] 顾岱鸿,崔国峰,刘广峰,等.多层合采气井产量劈分新方法[J].天然气地球科学,2016,27(7):1346-1351.
- [13] 田冷,申智强,刘柳,等.多层叠合致密砂岩气藏产量劈分方法研究[J].天然气勘探与开发,2016,39(3):41-44.
- [14] 凌复华.突变理论——历史、现状和展望[J].力学进展,1984,14(4):389-404.
- [15] MARTIN G. An introduction to catastrophe theory and its applications[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1978, 20(2):352-387.

(编辑 谢 葵)

(上接第 52 页) 等方式进行挖潜。

#### 参考文献:

- [1] 刘桂玲,王善强,朱昔君.真武特高含水油藏改善水驱开发效果的实践与认识[J].复杂油气藏,2012,5(2):59-62.
- [2] 徐怀明,吴磊,陈民锋,等.砾岩油藏沉积韵律特征研究及对开发的影响—以百口泉油田百 21 井区百口泉组油藏为例[J].油气地质与采收率,2006,13(1):20-26.
- [3] 陈存良,韩晓东,赵汉卿,等.低渗透油藏井间动态连通性研究[J].特种油气藏,2018,25(2):102-106.
- [4] 赵辉,康志江,张允,等.表征井间地层参数及油水动态的连通性计算方法[J].石油学报,2014,35(5):922-927.
- [5] 冯洪升,舒晓.静态储层表征中的连通性分析[J].石油化工应用,2014,33(3):64-71.
- [6] 卜范青,张宇焜,杨宝泉,等.深水复合浊积水道砂体连

通性精细表征技术及应用[J].断块油气田,2015,22(3):308-313.

- [7] 孙卫,王洪建,吴诗平,等.三间房组油藏沉积微相及其对注水开发效果影响研究[J].沉积学报,1999,17(3):443-448.
- [8] 龙玉梅,陈曼霏.马王庙油田储层微观特征及对开发效果的影响[J].东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(3):279-282.
- [9] 陶帅,郝永卯,周杰,等.透镜体低渗透岩性油藏合理井网井距研究[J].岩性油气藏,2018,30(5):116-123.
- [10] 陈辉.透镜体岩性油藏砂体剩余油影响因素[J].中国科技信息 2018(7):102-103.

(编辑 谢 葵)