

文章编号:0253-9985(2005)03-0384-04

## 制作含水率与采出程度关系理论曲线 常犯错误及解决办法

凡哲元<sup>1,2</sup>,袁向春<sup>2</sup>,廖荣凤<sup>2</sup>,束青林<sup>3</sup>

(1.中国科学院力学研究所,北京100080; 2.中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;

3.胜利油田有限公司孤岛采油厂,山东东营257061)

**摘要:**制作含水率与采出程度关系理论曲线常采用相渗曲线法和流管法两种方法。在采用相渗曲线法制作理论曲线时,采用统计回归分析相对渗透率与含水率的关系,导致在低含水饱和度时期含水率偏高,在高含水饱和度时期含水率偏低的问题。解决的方法是直接使用实验数据点计算。将体积波及系数取常数往往会得出“中低含水期开发效果较差,高含水期开发效果较好”的通用结论,解决的方法是分析体积波及系数与井网系统、流度比、渗透率变异系数的关系,建立统计关系式。

**关键词:**体积波及系数;流管法;开发效果评价;油田开发

**中图分类号:**TE319 **文献标识码:**A

### Common problems and solutions in plotting theoretical curves of water-cut vs. recovery percent of reserves

Fan Zheyuan<sup>1,2</sup>, Yuan Xiangchun<sup>2</sup>, Liao Rongfeng<sup>2</sup>, Shu Qinglin<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing; 2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing; 3. Gudao Oil Production Plant of Shengli Oilfield Co. Ltd., Dongying, Shandong)

**Abstract:** Relative permeability curve method and stream-tube method are commonly used to plot theoretical curves of water-cut vs. recovery percent of reserves. When the former method is used to plot the theoretical curves, the relationship between relative permeability and water cut is often analyzed through statistical and regression analyses, resulting in water cut tends to be high in low water saturation stage, and tends to be low in high water saturation stage. This problem can be solved by directly using experimental data to calculate. If a constant value is assigned to volumetric sweep efficiency, a universal conclusion is often obtained, i. e. development effects are relatively poor in medium-low water cut stage, and are relatively good in high water cut stage. This problem can be solved by establishing statistical relational expression through analyzing the relationship between volumetric sweep efficiency, mobility ratio in a pattern system and permeability variation coefficient.

**Key words:** volumetric sweep efficiency; stream-tube method; evaluation of development effect; oilfield development

油田含水率与采出程度关系曲线直接反映油田不同开发阶段的含水率上升规律和开发状况,可以反映开发过程中实施开发调整后的效果和最终开发效果。实际曲线与理论曲线对比,可以评

价油田各开发阶段的开发效果,反映油田发挥其应有开发潜力的程度。含水率与采出程度关系理论曲线是开发效果评价的关键曲线,因此正确制作理论曲线非常重要。

**基金项目:**中国石化天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目(970211)

**第一作者简介:**凡哲元,男,39岁,高级工程师(博士生),油藏工程

**收稿日期:**2004-11-05

### 1 基本方法

制作理论曲线一般有两种方法,一种是相渗曲线法,另一种是流管法。相渗曲线法原理、公式简单,是油藏工程师们容易掌握、经常使用的一种方法;流管法原理、公式复杂,考虑了储层的非均质性,多数油藏工程师了解这种方法,但由于受到软件条件的限制,真正使用并不是很普及。

#### 1.1 相渗曲线法

根据相对渗透率曲线数据,建立  $\frac{K_{ro}}{K_{rw}} - S_w$  的关系式为

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = ae^{-bS_w} \quad (1)$$

式中  $K_{ro}$  为油相相对渗透率,小数;  $K_{rw}$  为水相相对渗透率,小数;  $S_w$  为含水饱和度,%;  $a$  和  $b$  为常数。

一般,  $\frac{K_{ro}}{K_{rw}} - S_w$  在半对数坐标上具有很好的线性关系,利用数据点回归可以求出表达式中的系数  $a$  和  $b$ ,再代入分流量公式(2) - 可以求出不同含水饱和度下的含水率,即

$$f = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}}{K_{rw}} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_o}} \quad (2)$$

式中  $f$  为含水率,小数;  $\mu_w$  为地面水粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $\mu_o$  为地面原油粘度,  $mPa \cdot s$ 。

计算不同含水饱和度下的采出程度采用的公式为

$$E_R = E_D E_V = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} E_V \quad (3)$$

式中  $E_R$  为采出程度,小数;  $E_D$  为驱油效率,小数;  $E_V$  为体积波及系数,小数;  $S_{wi}$  为束缚水饱和度,小数。

#### 1.2 流管法

流管法<sup>[1]</sup>的基本思路是地层中流体的流动由多束流管叠加而成。通过互不窜流的流管描述渗透率的非均质性以及水驱油的非活塞性。

应用该方法首先要研究储层渗透率的分布规律。绘制研究区渗透率分布曲线,拟合  $\Gamma(x)$  和  $\Gamma(x^2)$  两种类型的标准对数正态分布图版,并查出相应的自由度  $\gamma$ 。  $\Gamma(x^2)$  型描述的渗透率分布比  $\Gamma(x)$  型更均匀。自由度越大越均匀,含水上升越

慢。自由度取值一般为 0~6。

其次,根据单流管计算开发指标公式,并考虑储层非均质性,叠加成多流管计算开发指标公式。

无因次累积产液量为

$$U = \frac{1}{K_0} \int_0^\infty \bar{u}(t) K f(K) dK \quad (4)$$

无因次累积产油量为

$$U_o = \frac{1}{K_0} \int_0^\infty \bar{u}_o(t) K f(K) dK \quad (5)$$

油田阶段平均含水率为

$$\bar{f}_w = \frac{d(U - U_o)}{dU} \quad (6)$$

式中  $U$  为无因次累产液量;  $U_o$  为无因次累积产油量;  $\bar{u}(t)$  为单流管无因次累积产液量;  $\bar{u}_o(t)$  为单流管无因次累积产油量;  $\bar{K}$  为平均渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $K$  为空气渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $f(K)$  为渗透率分布函数。

相应阶段的采出程度为

$$E_R = U_o E_V \quad (7)$$

### 2 常犯的错误及解决办法

#### 2.1 错误之一及解决办法

在统计  $\frac{K_{ro}}{K_{rw}} - S_w$  的直线关系时,直线两端常常各有 3~4 个点偏离直线段(图 1)<sup>[2~3]</sup>,采用回归值计算含水率易出现在低含水率饱和度时期含水率偏高,在高含水饱和度时期含水率偏低问题。这一问题在低含水饱和度时显得更为突出,在含水率与采出程度关系曲线上表现为:曲线不经过坐标原点,在采出程度为零时就存在较高的含水率(图 2)。

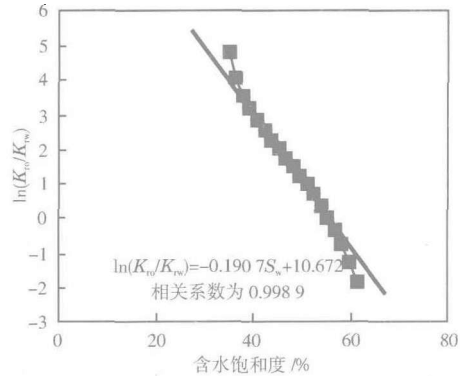


图 1 某油田油水相对渗透率比值与含水饱和度曲线  
Fig.1 Oil-water permeability ratio vs. water saturation in an oilfield

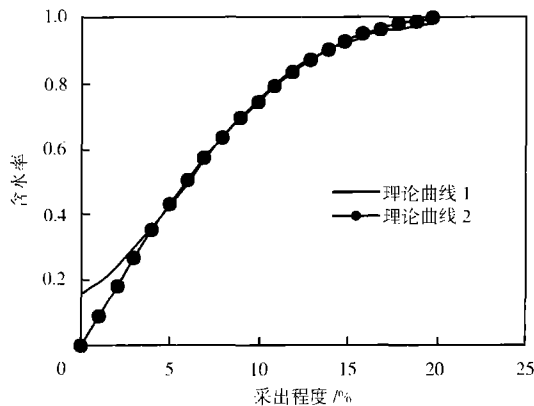


图2 某油田含水率与采出程度关系理论曲线

Fig.2 Theoretical curve of water cut vs. recovery percent of reserves in an oilfield

图2为某油田理论曲线,曲线1为数据回归后采用统计值代入公式所计算的理论曲线,曲线2为采用相渗曲线实验数据所作的理论曲线,曲线1不太符合实际。

解决办法:解决这一问题的办法很简单,不采用统计回归系数计算,直接用相渗曲线实验数据点计算。

## 2.2 错误之二及解决办法

两种方法都要确定体积波及系数,最大体积波及系数的确定一般可以采用实验所得出的图版和统计所得出的经验公式两种方法。不同类型油藏最大体积波及系数会有不同的取值,而且在整个开发全过程中,体积波及系数也应像驱油效率一样随含水率、含水饱和度的变化而变化,随含水率上升而逐渐增大。在制作理论曲线时,绝大多数研究人员只考虑驱油效率的变化而忽视了体积波及系数的变化。体积波及系数取常数,相应地增加了一定含水率时的采出程度,也就降低了含水率的上升速度。也就是说,体积波及系数取常数所作的理论曲线会使含水率偏低,含水率越低时,低的越多。这也就是我们在进行油田开发效果评价时,往往得出“中低含水期开发效果较差,含水上升快,高含水期开发效果变好,实际曲线逐渐靠近理论曲线”的通用结论的原因。

解决办法:解决这一问题的办法是确定不同油藏条件下体积波及系数随含水率的变化规律,然而这是比较困难的。

研究波及系数随含水率的变化规律主要采用

数值模拟和油层物理模型实验两种方法<sup>[4,5]</sup>。不同流度比和3种井网系统计算平面波及系数的关系式,以及不同流度比和不同渗透率变异系数下计算纵向波及系数的关系式是其比较系统的成果<sup>[2,6,7]</sup>。

图3为不同流度比下5点井网系统平面波及系数随含水率的关系,直线井网和交错井网系统平面波及系数随含水率的变化规律与其相似,在相对应的流度比和含水率下,交错井网系统的平面波及系数稍高,直线井网系统的平面波及系数稍低。

图4为不同流度比下渗透率变异系数为0.5时纵向波及系数与含水率的关系。渗透率变异系数为0.3和0.7时,纵向波及系数与含水率的关系与图4相似,只是在相对应的流度比和含水率下,渗透率变异系数为0.3时纵向波及系数稍高,渗透率变异系数为0.7时纵向波及系数稍低。

不同井网系统、不同渗透率变异系数、不同流度比与体积波及系数的统计关系式

$$E_V = ae^{bM+(c \ln M + d)f} \quad (8)$$

$$M = \frac{K_{rw}(\bar{S}_w)}{K_{roi}} \cdot \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (9)$$

式中  $a, b, c, d$  为常数(表1);  $M$  为流度比;  $K_{roi}$  为原始含油饱和度时的油相相对渗透率,小数;  $K_{rw}(\bar{S}_w)$  为两相区内平均含水饱和度下的水相相对渗透率,小数。

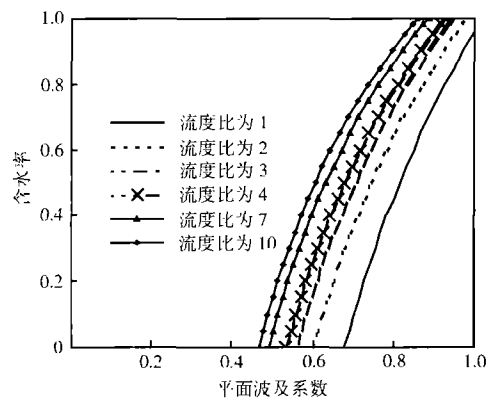


图3 五点井网系统不同流度比下含水率与平面波及系数的关系曲线

Fig.3 Areal sweep efficiency vs. water cut at various mobility ratios in five-spot pattern

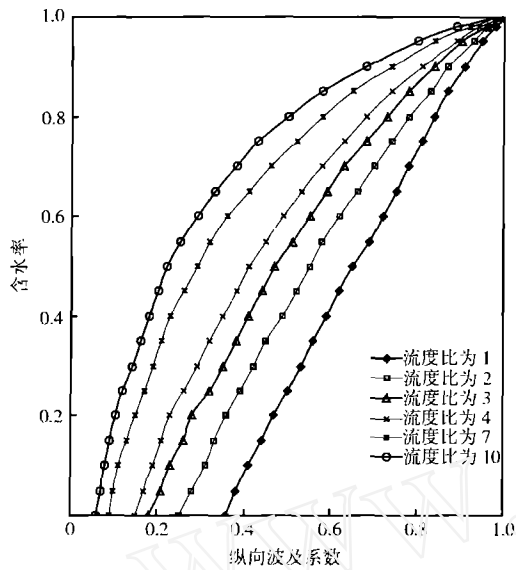


图4 渗透率变异系数为0.5时不同流度比下纵向波及系数与含水率的关系曲线

Fig.4 Vertical sweep efficiency vs. water cut at various mobility ratios and permeability variation coefficient of 0.5

表1 体积波及系数关系式中常数值

Table 1 Constants in relational expression of volumetric sweep efficiency

井网系统	常数	渗透率变异系数		
		0.3	0.5	0.7
直线系统	a	0.335 2	0.201 8	0.069 8
	b	-0.163 7	-0.243 7	-0.401 7
	c	0.529 3	0.862 5	0.098 3
	d	1.038 0	1.525 8	2.724 9
交错系统	a	0.470 8	0.283 3	0.096 5
	b	-0.158 0	-0.237 7	-0.389 9
	c	0.060 7	0.876 5	0.995 0
	d	0.666 1	1.153 8	2.354 4
五点系统	a	0.432 0	0.260 1	0.089 1
	b	-0.161 4	-0.241 1	-0.395 7
	c	0.527 6	0.842 4	0.969 4
	d	0.794 5	1.282 3	2.484 3

将式(8)代入式(3)和式(7),就可作出相渗曲线法和流管法的含水率与采出程度关系理论曲线。因考虑了波及系数的变化特征,理论曲线更科学、也更接近实际。

参 考 文 献

1 才汝成,李阳,孙焕泉,等. 油气藏工程方法与应用[M]. 山东

东营:石油大学出版社,2002. 152~154

Cai Rucheng, Li Yang, Sun Huanquan, et al. Method and application of oil and gas reservoir engineering [M]. Dongying, Shandong: Petroleum University Press, 2002. 152-154

2 秦同洛,李莹,陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京:石油工业出版社,1989. 250~266

Qin Tongluo, Li Dang, Chen Yuanqian. Practical reservoir engineering methods [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. 250-266

3 俞启泰,赵明,林志芳. 水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究[A]. 见:俞启泰,编. 俞启泰油田开发论文集[C]. 北京:石油工业出版社,1999. 81~87

Yu Qitai, Zhao Ming, Lin Zhifang. A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooding sandstone reservoirs in China [A]. In: Yu Qitai, ed. Yu Qitai oilfield development symposiums [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. 81-87

4 Fassihi M R. New correlations for calculation of vertical coverage and areal sweep efficiency [J]. SPE (Reservoir Engineering), 1986, 1 (6): 604-606

5 王志斌,袁庆峰,杨玉哲,喇,萨,杏油田高含水后期稳油控水的理论与实践[A]. 见:刘丁曾,任积文,翟国忠,编. 大庆油田勘探开发研究论文集[C]. 北京:石油工业出版社,1995. 197~204

Wang Zhubin, Yuan Qingfeng, Yang Yuzhe. Theories and practices of oil-stabilization and water-control during high water-cut stage in Lamadian, Saertu, Sa and Xing Shugang oilfields [A]. In: Liu Dingzeng, Ren Jiwen, Zhai Guozhong, eds. Symposiums on exploration & production research in Daqing oilfield [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. 197-204

6 颜捷先. 关于油田中高含水期稳产的几个问题[A]. 见:王秉海,沈绍华,颜捷先,编. 胜利油区开发与实践[C]. 山东东营:石油大学出版社,1993. 185~191

Yan Jiexian. Stable production issues during middle and high water-cut stages of oilfield [A]. In: Wang Binghai, Shen Juanhua, Yan Jiexian, eds. Development and practices in Shengli oilfield [C]. Dongying, Shandong: Petroleum University Press, 1993. 185-191

7 屈志坚. 孤东油田馆陶组 5<sup>2+3</sup>层小井距注水开发全过程现场试验研究的初步认识[A]. 见:王秉海,沈绍华,颜捷先,编. 胜利油区开发与实践 [C]. 山东东营:石油大学出版社,1993. 292~304

Qu Zhijian. Primary results of water flooding development between closely-spaced wells in whole course field test of 5<sup>2+3</sup> layers, Guantao Formation, Gudao oilfield [A]. In: Wang Binghai, Shen Juanhua, Yan Jiexian, eds. Development and practices in Shengli oilfield [C]. Dongying, Shandong: Petroleum University Press, 1993. 292-304

(编辑:高岩)