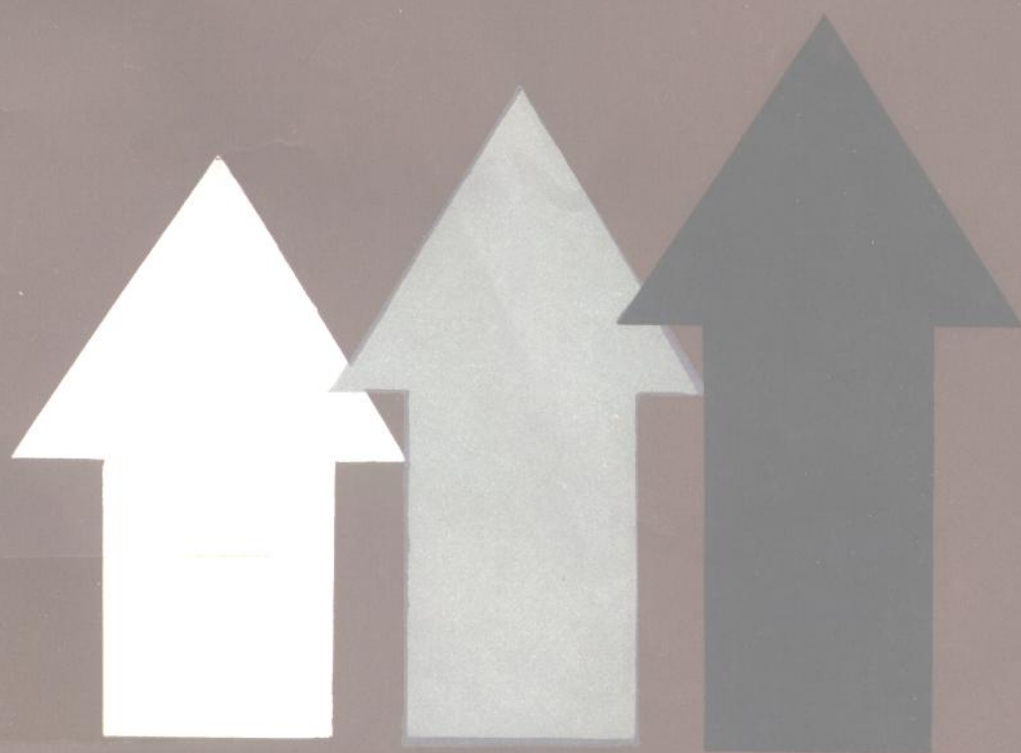


油藏工程方法研究

大庆油田开发论文集之一

油藏工程 方法研究

袁庆峰 主编



石油工业出版社

2-53

001

石油工业出版社

石油工业出版社

071251

TE32-53/001

大庆油田开发论文集之一

油藏工程方法研究

袁庆峰 主编



200417824



石油工业出版社

内 容 提 要

大庆油田勘探和开发三十年来,广大科技人员结合本油田的实际,在油藏工程方法的研究工作中,做了大量的工作。本书是大庆油田开发论文集中的第一本,主要收集了大庆油田八十年代以来在油藏工程方法研究方面的优秀论文24篇。涉及油田开发分析、制定油田开发规划和进行油田开发调整等方面的内容。这些方法不但在进行油田开发分析和制定油田开发规划方面起到了重要作用,而且在“六五”和“七五”期间应用这些方法解决油田开发指标预测,准确率达到95%以上,确保了大庆油田长远规划制定的可靠性。

本论文集可供广大石油工作者,特别是从事油田开发方面的科技人员参考,也可作为石油院校广大师生的参考资料,

DP44/24
30



大庆油田开发论文集之一

油 藏 工 程 方 法 研 究

袁庆峰 主编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京地质出版社印刷厂排版

北京顺义燕华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11 1/4 印张 279 千字 印 1—2,000

1991 年 3 月北京第 1 版 1991 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0495-X/TE·474

定价: 3.00 元

出版说明

为纪念大庆石油会战，特将大庆油田八十年代以来油田开采方面科研方法和科研成果的90篇优秀论文汇编成《大庆油田开发论文集》一书。依其内容分为三册，第一册《油藏工程方法研究》，包括24篇，着重油田开发分析、开发规划的制定和开发调整等内容；第二册《油层物理方法研究》，包括25篇，主要是开发过程中储层、油、气性质及变化的实验室研究；第三册《提高采收率方法研究》，包括41篇，介绍了提高波及效率和驱油效率的研究成果。

本论文集基本反映了近年来大庆油田科研水平，为满足广大油田开发科技人员的需要，今后还将陆续出版有关该领域的优秀科研成果。

前 言

油藏工程方法是油田开发分析和油田动态预测的主要工具,是油藏工程师必备的基础知识和进一步深入研究的重要课题。一般油藏工程方法来源于严谨的理论推导或带有普遍性经验的总结。这些方法以油藏工程原理为基础,以矿场试验结果为依据,因此具有较强的科学性和适用性。当然,有些方法是根据不同地区和不同类型油田的开采特点,对适用性的方法加以各种假设和限制条件,进行某些必要的修正,使之适合于本油田油藏工程研究的需要。大庆油田也不例外,三十年来,在油田开发设计、油田开发分析和油田动态预测等方面,除应用与油田特点相适应的现有的油藏工程方法外,还一直重视油藏工程方法的研究工作。试图研制出适合本油田特点,而且理论正确、方法简便、准确可靠的油藏工程方法,以便提高大庆油田油藏工程研究的水平,使大庆油田开发沿着正确的轨道前进,从而实现大庆油田的长期高产稳产,获得较高的最终采收率 and 经济效益的奋斗目标。为此,广大科技人员结合油田的实际,做了大量的工作。

本论文集主要收集了大庆油田八十年代以来在油藏工程方法研究方面的主要成果。它的内容主要围绕着大庆油田注水开发过程中进行油田开发分析、制定油田开发规划和进行油田开发调整等方面的问题所采用的油藏工程方法。没有涉及试井和数值模拟等方面的油藏工程方法。这些油藏工程方法在制定油田开发规划、解决油田开发指标预测等方面起到了重要作用。在“六五”和“七五”规划中,应用这些方法进行了五年开发指标预测,经过实施证明,准确度在95%以上。确保了大庆油田长远开发规划制定的可靠性。

出版本论文集的目的,一是为同行们应用油藏工程方法提供借鉴;二是便于了解大庆油田对这一工作的研究历程,以便今后将这一研究工作推向新的高度。

参加本书工作的有孙桂荣、林玉君、刘青年、李瑞龙等。张维丰完成了书中全部图幅的绘制工作。

袁庆峰

1989.10

目 录

水驱孔隙性砂岩油田产量递减预测方法·····	袁庆峰 梁慧文 任玉林 (1)
油田产量递减规律的研究·····	王俊魁 (10)
大庆油田开发规划经济数学模型的研究·····	
·····	赵永胜 梁慧文 李泽农 韩志刚 邓自立 郭一新 顾梦柯 (20)
驱替特征曲线影响因素的分析·····	杨玉哲 李淑君 (32)
含水分级统计预测稳产趋势的方法·····	彭鹏商 (38)
油田产量递减类型的判别与预测·····	王俊魁 (47)
影响开发效果的地质因素·····	袁庆峰 董富林 (54)
高含水期井网加密调整问题的研究·····	田宝成 张宝胜 (64)
油井自喷能力的矿场分析方法·····	王俊魁 (69)
大庆油田转变开采方式的分析·····	彭鹏商 李抗美 (75)
水驱孔隙性砂岩油田稳产预测方法·····	袁庆峰 梁慧文 (85)
大庆油田高含水期层系调整的几个问题·····	赵守元 杨玉哲 纪德纯 (88)
递减曲线的多功能预测模型·····	赵永胜 黄秀祯 (96)
关于非均质油层吸水能力影响因素的研究·····	宋 永 (101)
递推算法在油田动态参数估计中的有效性·····	赵永胜 黄伏生 (108)
油田开发中的几个基本经验公式·····	王俊魁 (113)
油田动态体系的特点及自适应预测实践·····	赵永胜 (121)
油井流入动态曲线及其应用·····	王俊魁 (126)
油田开发规划优选模型研究·····	李泽农 黄秀祯 张大夫 陈德泉 何健秋 (133)
油田动态预测的一种新模型·····	黄伏生 赵永胜 刘青年 (140)
大庆油田高含水期注采及压力系统优化方法·····	彭鹏商 张宝胜 (148)
应用灰色系统理论预测油田套管损坏趋势·····	刘青年 孙桂荣 (156)
用递推残差辨识预测模式预测油田产量及综合含水率·····	刘青年 孙东方 (161)
油田注水动态整体预测的数学模型·····	刘青年 赵永胜 黄伏生 (167)

水驱孔隙性砂岩油田产量递减预测方法

袁庆峰 梁慧文 任玉林

摘要 本文从水驱孔隙性砂岩油田开发的基本理论出发,在分析大庆油田实际资料的基础上,采用数理统计方法,找出采油指数、井底流压、含水上升率随含水率变化的数学表达式。通过其相互关系的研究,给出在油田稳产期内,预测产油量自然递减的经验方法。经实际资料检验,此方法预测产量的相对误差最大不超过10%。

一、引言

在油田开发过程中,预测油田产量递减趋势是油田开发分析和油田动态预测的主要内容之一,是制定油田开发规划、设计油田开发调整方案的主要依据。因此,研究油田产量递减规律,进行油田产量递减趋势预测是国内外^[1,2]油田开发的一项重要工作。

对于水驱孔隙性砂岩油田,在稳产期内不采取重大综合调整措施的情况下,油田自然递减规律的研究和油田产量递减趋势的预测方法还很少见。因而我们从水驱孔隙性砂岩油田开发的基本理论出发,从大庆油田的实际情况入手,初步总结了一套在油田稳产期内预测油田产量自然递减的经验方法。本文着重介绍其理论依据、预测方法、计算实例和对方法准确性的估计。

二、注水开发油田产量递减的理论与实践依据

在油田注水开发过程中,随着注水量和采油量的增加,油层内含油饱和度逐渐减少,含水饱和度逐渐增加。这一客观变化过程,将使油井开采具有四项基本规律,即油井采油指数随含水上升而下降,井底流压随含水上升而增加,井周围油层内的流动阻力随含水饱和度的增加而减小及水油比随油层含水饱和度的增加而增加。

1. 油井开采的基本规律

(1) 采油指数的变化

均质单油层油水两相径向流,在不考虑重力和毛管力时,油井产量的计算公式在无水期为:

$$q = \frac{1.84 \times 10^{-3} k_o h \Delta p_1}{\mu \ln \frac{R_x}{R_c}}$$

油井见水以后的产量计算公式为:

$$q_s = \frac{1.84 \times 10^{-3} k_s h \Delta p_2}{\mu \ln \frac{R_k}{R_c}}$$

可以看出, 单位生产压差下的产量变化即采油指数的变化, 和油相渗透率的变化是一致的, 即

$$\epsilon_o/\epsilon_s = k_o/k_s.$$

式中 q_o, q_s ——油井无水期和含水为某一定值时的产油量, m^3/d ;

k_o, k_s ——油井无水期和含水为某一定值时的油相渗透率, μm^2 ;

$\Delta p_1, \Delta p_2$ ——油井无水期和某一含水期时的生产压差, MPa ;

μ ——原油地下粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

R_k, R_c ——油井的泄油半径和油井半径, m ;

ϵ_o, ϵ_s ——油井无水期和含水期的采油指数, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 。

油井见水后, 随含水率的增加, 油相渗透率逐渐减小, 采油指数逐渐减小, 若保持生产压差不变, 产油量将自然递减。

(2) 井底流压随含水的变化

油井出水前, 无水原油在井筒中垂直向上流动, 忽略惯性力和游离气的影响时, 其井底流压由液柱重量、摩擦损失和井口剩余压力三部分组成。

$$\text{即} \quad p_c = p_o + \frac{H\gamma_o}{10} + p_{T1}$$

油井见水后, 由于井筒内流动液体相对密度的增加, 流压要上升, 其关系式可写成

$$p_c(f) = p_o + \frac{H\gamma_{ow}}{10} + p_{T2}$$

上两式相减, 即含水后井底流压的增值, 在井口压力不变时可写成

$$p_c(f) - p_c = \frac{H(\gamma_{ow} - \gamma_o)}{100} + (p_{T2} - p_{T1})$$

式中 p_c, p_o ——井底流压和油管压力, MPa ;

H ——油井深度, m ;

γ_o ——无水原油在井筒中流动时的平均相对密度;

p_{T1} ——井筒中的摩擦损失, MPa ;

$p_c(f)$ ——油井出水后含水率为 f 时的井底流压, MPa ;

γ_{ow} ——油井出水后油井含水为 f 时井筒内运动流体混合物的平均相对密度;

p_{T2} ——含水时井筒中的摩擦损失, MPa ;

γ_w ——井筒中含水率为 f 时水的相对密度;

f ——含水率, %。

假设油井出水前后, 流速变化不大, 则可认为 $p_{T2} - p_{T1}$ 近似为零, 那么见水前后井底流压的变化为:

$$p_c(f) - p_c = \frac{H(\gamma_{ow} - \gamma_o)}{10} = \frac{Hf(\gamma_w - \gamma_o)}{10}$$

上式表明, 同一口油井见水以后流压的变化, 只是含水率的函数, 它随着含水率的增加而近似成直线变化。

(3) 井周围油层内流动阻力的变化

油井出水前, 井周围地区为单相流动区, 其流体流度为:

$$\lambda = \frac{k}{\mu_o}$$

油井出水后,井周围地区为油水两相流动区,其流体流量为:

$$\lambda_{(s)} = \frac{k_o(s)}{\mu_o} + \frac{k_w(s)}{\mu_w}$$

油井见水前后,油井周围地层内渗流阻力之比为:

$$\frac{\lambda_o}{\lambda_{(s)}} = \frac{\frac{k_o}{\mu_o}}{\frac{k_o(s)}{\mu_o} + \frac{k_w(s)}{\mu_w}}$$

式中 $\lambda_o, \lambda_{(s)}$ ——井周围地层内不含水和含水饱和度为s时的流量, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$;

μ_o, μ_w ——原油和水的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

$k_o(s), k_w(s)$ ——水淹区内含水饱和度为S时油相和水相渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

实验资料表明,上述油水混合物的相对流动性,当含水饱和度大于0.3~0.4以后,随着含水饱和度的增大而增大,也就是渗流阻力随之减小,因而,油井见水后,采液指数逐渐增加,而采油指数则由于油相渗流阻力的加大而逐渐减小。

(4) 水油比随油层内含水饱和度的变化

油井见水后,水油比随油层内含水饱和度的增加而增加,

$$\text{即} \quad \frac{q_w}{q_{ow}} = \frac{k_w \mu_o B_o}{k_o \mu_w B_w} = M e^{ms}$$

式中 q_{ow}, q_w ——稳定流情况下油水产量, m^3/d ;

B_o, B_w ——地层油和地层水的体积系数;

M, m ——与油层和流体物性有关的参数。

在不考虑重力和毛管力的情况下,油井的含水比是随含水饱和度的增加而增加的,可以写成:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{k_o \mu_o}{k_w \mu_o}}$$

以上四项规律共同作用的结果,造成注水开发过程中,油井见水后,随水油比的不断增加,采油指数和生产压差不断下降。这就是油井或油田随含水比增加,产油量递减的根本原因。

2. 计算油田产量递减的经验关系式

在认识油田开发理论的基础上,我们从实践出发,可以找出计算油田产量递减的主要开发参数的一套经验关系式。利用这些关系式,就能较好地预测油田未来的开发指标。

(1) 采油指数和综合含水率的关系

油井见水后,采油指数随油层中流体含水饱和度的增加而减少,含水率也是含水饱和度的函数。理论上虽然如此,但在实际油田开发过程中,由于层间、平面关系的调整、压裂、酸化、抽油等工艺措施的作用,采油指数的变化可以在一定时间阶段内得到一定范围的控制或改变。如采油指数可保持一段时间不降或短期上升,大庆油田的开发实践正是如此。因而,在生产实践中要找出油井今后的采油指数随含水率的变化规律还是很困难的。

但根据大庆油田数千口见水井,按不同含水级别(含水每增加10%,作为一级,共分十级)统计采油指数和含水的关系发现,含水大于40%~50%的油井,在直角坐标系中,采油

指数是随含水的增加而降低的。它的下降规律可用如下近似数学表达式来描述:

$$\epsilon = C + Df + Ef^2$$

式中 ϵ ——某一含水率时油井的采油指数, $\text{m}^3/(\text{MPa}\cdot\text{d})$;

C, E, D ——经验系数。

实际资料表明, 一个油田或开发区块的平均采油指数, 也是随着含水上升而下降的, 其下降规律可按含水分级统计值的递减幅度来导出。因此, 也可以用上述公式来表示, 只是系数不同而已。当然对于不同的油田, 可以统计出适合自己油田情况的关系式来。

(2) 累积产油量和累积产水量的关系

水驱开发的油田, 当油田含水足够大时, 其累积产油量和累积产水量, 在单对数坐标系中可以出现明显的直线段, 数学表达式为:

$$\lg \Sigma Q_w = B_1 \Sigma Q_o + A_1$$

如果把累积采油量和累积采水量同除以油田储量, 则上式变成表示采油程度和采水程度的关系式:

$$\lg R_w = \frac{1}{B_2} R_o + A_2$$

根据上式所导出的采出程度与含水率之间的关系为:

$$R_o = \frac{B_2}{2.3} \ln \frac{B_2 f}{2.3(1-f)} - A_2 B_2$$

式中 $\Sigma Q_o, \Sigma Q_w$ ——累积产油量, 万t, 累积产水量, 万 m^3 ;

B_1, A_1 ——直线的斜率和截距;

R_w, R_o ——采水和采油程度;

B_2, A_2 ——单对数坐标系中直线段斜率的倒数和截距。

进而可导出油田的含水上升率 (即每采出1%地质储量, 含水率增加值) 随含水率的变化关系式:

$$\frac{df}{dR_o} = \frac{2.3}{B_2} f(1-f)$$

上式表明, 当一个油田或区块的 B_2 值确定以后, 其含水上升率只取决于含水率值。在相同含水率时, 其含水上升率只取决于 B_2 值。因此, 只要实际作出油田的驱替特征曲线就可算出油田含水上升率和含水率的定量关系。

(3) 井底流压和油井含水率的关系

根据大庆油田大量的统计资料证明, 在含水80%阶段内, 井底流压随油井含水的变化关系为一直线, 在这一阶段含水每上升1%, 流压将自然上升0.03~0.04MPa, 其关系式为:

$$p_c(f) = p_{c0} + (0.3 \sim 0.4) f$$

式中 p_{c0} ——不含水时的流压值。

总之, 各油田可以通过大量生产实践资料的统计得出采油指数、流压、含水上升率的变化规律, 做为我们进行产油量递减预测的实践依据, 以这些参数相互的经验关系为基础, 即可导出一套既符合油田生产实际, 又切实可行的预测方法。

三、油田产量递减预测方法

通常油田产量递减幅度以所谓的递减系数表示。它的定义是在单位时间内产量递减的百分数，可以由下式表示。

$$a = -\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt}$$

式中 a —— 递减系数；

Q —— 产油量；

$\frac{dQ}{dt}$ —— 单位时间的产量变化率。

根据这一定义，油田或区块的年产量递减系数为：

$$a_i = \frac{Q_{i-1} - Q_i}{Q_{i-1}}$$

式中 a_i —— 第 i 年的年产量递减系数；

Q_i —— 第 i 年的年产量；

Q_{i-1} —— 第 i 年前一年的年产量。

而一个油田或区块的年产量又可近似表示成该油田或区块的采油指数和生产压差的关系，即

$$Q = \epsilon_i \Delta p_i$$

因此，油田或区块的年产量递减系数可变成与采油指数和生产压差的关系：

$$a = \frac{\epsilon_{i-1} \Delta p_{i-1} - \epsilon_i \Delta p_i}{\epsilon_{i-1} \Delta p_{i-1}} = 1 - \frac{\epsilon_i \Delta p_i}{\epsilon_{i-1} \Delta p_{i-1}}$$

式中 ϵ_i —— 第 i 年的平均采油指数；

Δp_i —— 第 i 年的平均生产压差；

ϵ_{i-1} ， Δp_{i-1} —— 第 i 年前一年的平均采油指数和生产压差。

如在生产过程中，保持生产压差不变，也就是不采取放大生产压差的措施时，产油量的年递减系数等于采油指数的递减幅度，即

$$a = 1 - \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i-1}}$$

于是，只要找出油田或区块年平均采油指数和生产压差随时间（也就是随含水）的变化规律，就可以计算产油量的年递减系数，预测油田年产量递减幅度了。

由上节已知平均采油指数和井底流压是油田含水率的函数。要求年产油量的变化，就必须根据采油速度和含水上升率预测年含水上升值。由于采油速度正是所要求的值，是个未知数，所以含水率也是个未知数。这样，为了预测产油量年递减趋势，就必须在前一年各个参数的基础上，假设一个采油速度，进行试算，直到假设的速度与实际测算的速度相等时，则用此速度导出的各项参数及产量即是所预测的值。具体计算方法如下。

已知某油田第 $i-1$ 年的平均生产压差为 Δp_{i-1} ，采油速度为 v_{i-1} ，平均含水率为 f_{i-1} ，年末含水率为 f_{i-1}' 。首先利用第 $i-1$ 年末的含水率值，近似等于第 $i-1$ 年和第 i 年年中含水率

的平均值, 求出含水上升率值。

$$\frac{df}{dR_0} = \frac{2.3}{B_2} f_{i-1}' (1 - f_{i-1}')$$

假设第二年以 v_i 速度生产 ($v_i = v_{i-1} - \Delta v$), 则含水率的年增值为:

$$\Delta f = v_i \frac{df}{dR_0}$$

因此, 第 i 年年末的含水率为:

$$f_i' = f_{i-1}' + \Delta f$$

第 i 年的平均含水率为:

$$f_i = \frac{f_i' + f_{i-1}'}{2}$$

平均采油指数为:

$$\epsilon_i = C + Df_i + Ef_i^2$$

流动压力增加值为:

$$\Delta p_{ci} = (0.3 \sim 0.4) (f_i - f_{i-1})$$

假定地层压力平均提高了 Δp_{ki} , 则生产压差为:

$$\Delta p_i = p_{ki-1} + \Delta p_{ki} - p_{ci-1} - \Delta p_{ci}$$

式中 p_{ki-1} , p_{ci-1} —— 第 $i-1$ 年的地层压力和流动压力。

$$\text{年产油量} \quad Q_i = 0.0365 \epsilon_i \Delta p_i N$$

$$\text{年采油速度} \quad v = Q_i / V$$

式中 N —— 油田或区块井数;

v —— 年采油速度;

V —— 油田地质储量;

v_i —— 假设采油速度。

若算出 $v = v_i$, 即假设的采油速度 ($v_i = v_{i-1} - \Delta v$) 和计算结果吻合, 就是第二年预测的采油速度。

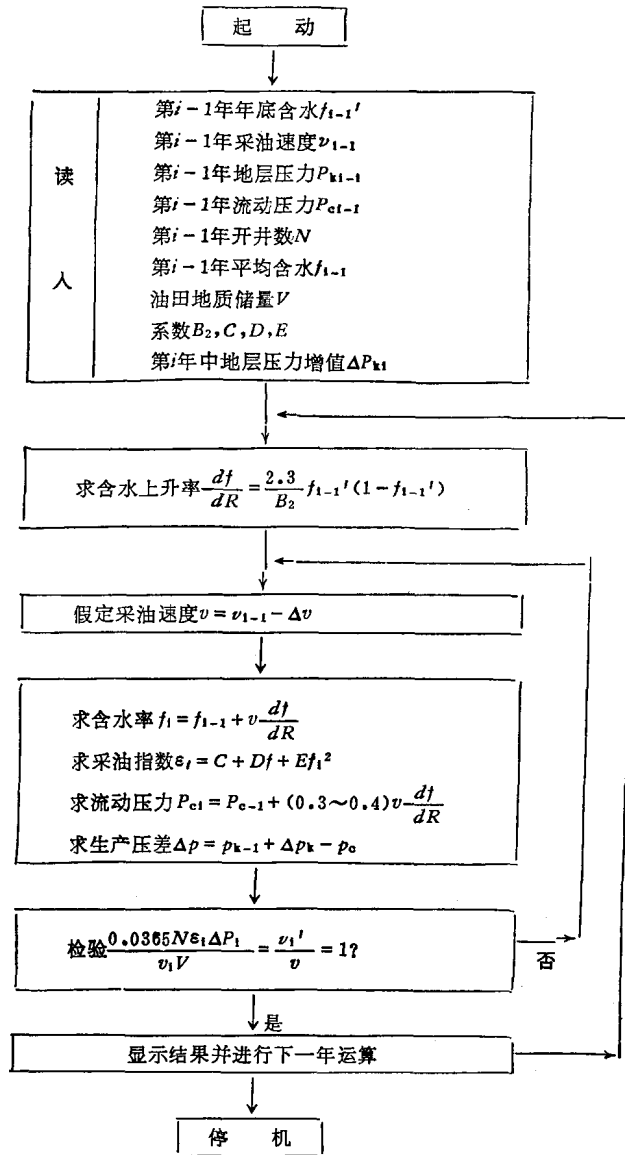
若 $v \neq v_i$, 即假设的采油速度和计算结果不吻合, 必须再一次假设采油速度 v , 重新计算, 往复循环, 直到计算出的速度等于假设速度为止。

应用这种方法进行每个油田或区块的产量递减预测时, 需要已知以下九项参数。

- 1) 预测油田或区块的驱替特征曲线直线段的斜率值;
- 2) 经过回归得到的预测油田或区块含水率与采油指数关系曲线的数学表达式;
- 3) 前一年末油田或区块实际开井数;
- 4) 前一年的实际年产油量;
- 5) 前一年的平均地层压力值;
- 6) 前一年的平均流动压力值;
- 7) 预测地区的地质储量;
- 8) 前一年末的综合含水率;
- 9) 逐年地层压力的增加值。

这种方法虽然简单, 但用手工运算还是比较繁琐的, 如果每次假设的速度改变值 Δv 为 0.01, 则一个油田或区块做一次预测需要 10~20 次反复计算。因此, 当进行较大范围的计算时, 最好借助计算机或小型计算器。为了方便读者, 我们将这种迭代计算的程序设计框图介绍于下:

程序设计框图



四、计算实例及对方法准确性的估计

1. 计算实例

如某油田，已知驱替特征曲线直线段表达式为： $\lg R_w = \frac{1}{22} R + 1.08$ 、其斜率的倒数 $B_2 = 22.0$ 。

按含水率分级统计的采油指数与含水率的关系曲线表达式为：

$$\epsilon_{ci} = 1.1560 + 4.8886 f_i - 6.0772 f_i^2$$

由含水率分级统计值的递减幅度导出的实际油田采油指数和含水率的关系曲线表达式

为

$$\epsilon_i = 1.742 + 1.372f_i - 3.133f_i^2$$

地质储量 $V = 59113$ 万 t, 1980 年末含水率 $f_{i-1}' = 64.6\%$, 开井数 $N = 991$ 口, 年产油量 $Q_{i-1} = 1028$ 万 t, 年末地层压力 $p_{ki-1}' = 11.45$ MPa, 年末流动压力 $p_{ci-1}' = 9.29$ MPa, 年采油速度 $v_{i-1} = \frac{1028}{59113} \times 100 = 1.74$, 要求预测 1981 年产量及各项开发指标。

计算如下:

年含水上升率为:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dR} &= \frac{2.3}{B_2} f_{i-1}' (1 - f_{i-1}') \times 100 \\ &= \frac{2.3}{22.0} \times 0.646 (1 - 0.646) \times 100 \\ &= 2.39 \end{aligned}$$

假设 1981 年采油速度为 $v = 1.72\%$ ($\Delta v_i = 0.02\%$)

$$\text{年中含水率 } f_i = v \times \frac{1}{2} \frac{df}{dR} + f_{i-1}'$$

$$= 1.72 \times \frac{1}{2} \times 2.39 + 64.6 = 66.7$$

$$\begin{aligned} \text{年平均采油指数 } \epsilon_i &= 1.742 + 1.372f_i - 3.133f_i^2 \\ &= 1.742 + 1.372 \times 0.667 - 3.133 \times 0.667^2 \\ &= 12.63 \text{ t/d} \cdot \text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{流动压力增值 } \Delta p_{ci} &= 0.4(f_i - f_{i-1}') \\ &= 0.4(66.7 - 64.67) \\ &= 0.084 \text{ MPa} \end{aligned}$$

假设油田由于注水使地层压力从 1980 年年中到 1981 年年中提高 0.2 MPa。但因给定的地层压力、流动压力均为 1980 年年末压力值, 故地层压力只提高 0.1 MPa, 则生产压差为:

$$\begin{aligned} \Delta p_i &= p_{ki-1}' + \Delta p_{ki} - p_{ci-1}' - \Delta p_{ci} \\ &= 11.45 + 0.1 - 9.29 - 0.084 \\ &= 2.176 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{年产油量 } Q_i = 0.0365 N \epsilon_i \Delta p_i = 0.0365 \times 991 \times 12.63 \times 2.176 = 994.1 \text{ 万 t}$$

$$\text{年采油速度 } v_i' = \frac{994.1}{59113} \times 100 = 1.68$$

由于 $\frac{v_i'}{v_i} = \frac{1.68}{1.72} \neq 1$, 说明 v_i 假设大了, 与计算所得的采油速度 v_i' 不相符合。再重新假

设 $v_i = 1.7$, 按上述步骤再进行运算得: 平均含水率 $f_i = 66.6\%$, 采油指数 $\epsilon_i = 12.66 \text{ t/d} \cdot \text{MPa}$, 流动压力增值 $\Delta p_{ci} = 0.08 \text{ MPa}$, 生产压差 $\Delta p_i = 2.18 \text{ MPa}$, 年采油量 $Q_i = 998$ 万 t, 采油速度 $v_i' = 1.7$, 则 $\frac{v_i'}{v_i} = 1$ 。说明此结果的年产油量即为该油田老井预计的 1981 年产量, 计算所得的其它各项参数值相应为 1981 年预测的开发指标。

2. 对方法准确性的估计

我们按上述方法计算了大庆油田几个主要开发区 1976 年到 1980 年的开发指标, 及厚油层

开发试验区和小井距注水开发全过程试验区501井萨Ⅱ₇₋₈层含水50~80%阶段的开发指标,与其相应的实际开发指标进行对比,计算结果如下。

1) 大庆油田几个主要开发区1976~1980年产油量拟合结果是:1976年误差为3.5%,1977年误差为4.6%,1978年误差为5.5%,1979年误差为1.9%,1980年误差为1.4%。从结果看,误差基本在10%以内,能够满足现场进行年产油量预测的要求;

2) 小井距注水开发全过程试验区含水50%~80%阶段的拟合结果(表1)。

表1 小井距实际产量、含水率与测算结果对比表

项 目	时 间	1970年 12月26日	28日	31日	1971年 1月2日	4日	10日	13日	16日
产 量 (t)	计算值	42	39	34	31	29	23	21	19
	实际值	32	38	35	32	28	27	24	24
含水率 (%)	计算值	51.3	55.7	61.4	64.8	67.7	74.7	77.3	79.6
	实际值	61.3	56.0	61.0	61.2	67.2	71.7	77.1	78.8

从计算结果看,产油量和含水率拟合都较好,一般误差在15%以内。但在1971年1月9日以后由于换油嘴及计量等问题,产量拟合误差较大;

3) 厚油层试验区含水50%~80%阶段的拟合结果(表2)。

表2 厚油层实际产量、含水率与测算结果对比表

项 目	时 间	1975年10月	12月	1976年2月	4月	5月	6月	7月	8月
产 量 (t)	计算值	1.75	1.32	1.04	1.07	0.95	0.9	0.79	0.78
	实际值	1.73	1.18	0.85	1.14	1.14	0.84	0.73	0.7
含水率 (%)	计算值	55.5	64.5	69.3	73.2	75.6	77.7	79.4	81.0
	实际值	57.2	66.2	64.3	76.5	78.9	80.0	77.9	80.0

这个试验区的计算结果和实际结果对比符合程度也比较好。除1976年3月~5月放油嘴阶段产量误差较大外,其余时间的相对误差都不超过10%。

从大庆油田几个主要开发区及小井距和厚油层试验区拟合结果来看,只要参数值选择的合理,且满足预测方法要求的条件,误差范围都可在10%以内。因此,本方法用来预测水驱孔隙性砂岩油田开发指标,是有理论和实践基础的。

由于本方法是经验预测方法,所以必须是在进行预测的油田或区块综合含水率足够高,开发数据足够多时才能使用。因为只有这时,才能通过资料的综合分析,形成明显的统计规律,寻找出符合油田或区块的计算参数,得出合乎实际的基础曲线,使预测结果准确度高。

参 考 文 献

- [1] Иванова, М. М., «Динамика Добычи нефтяных Залежей», Москва «Недра», 1976.
- [2] Arps, J. J. et al, A Statistical Study of Recovery Efficiency.

油田产量递减规律的研究

王俊魁

摘要 本文从Arps, J.J.的产量递减率微分方程出发,严格推导了产量递减的三种基本规律,即指数递减、调和递减和双曲线递减。从理论上证明了产生调和递减的条件以及影响初始递减率的因素,并用图版法简便地确定了计算公式中的常数项,使本方法更便于在矿场中推广应用。文中还用大量的实际资料检验了应用产量递减曲线预测油田开发动态指标的准确性,并对油田已出现综合递减的区块进行了预测。

一、产量递减规律的数学分析

在油田开发过程中,随着地下可采储量的减少,产量总是要下降的,油田高产稳产期结束后,产量将以一定的规律开始递减,通常用递减率表示产量的递减速度。所谓递减率,是指在单位时间内产量递减的百分数。根据矿场实际资料的统计分析,可以把递减率表示成下述的形式:

$$D = -\frac{dq}{qdt} = Kq^n \quad (1)$$

式中 D ——产量递减率,小数;

q ——产量或采油速度;

n ——递减指数 ($0 \leq n \leq 1$);

K ——比例常数。

式中负号表示:随开发时间的增长,产量是下降的。

现在由(1)式出发,来分析产量递减的基本规律。

1. 产量随时间的变化关系

将(1)式分离变量,并代入边界条件

$$-\int_{q_i}^{q_t} q^{-(n+1)} dq = K \int_0^t dt$$

对上式两端进行积分则得

$$\frac{1}{n} \left[\left(\frac{q_i}{q_t} \right)^n - 1 \right] = K q_i^n t \quad (2)$$

由(1)式知 $K q_i^n = D_i$

将上式代入(2)式得

$$\frac{1}{n} \left[\left(\frac{q_i}{q_t} \right)^n - 1 \right] = D_i t \quad (3)$$

式中 q_i ——递减初始产量;

q_t ——递减后 t 时刻产量;

D_i ——初始递减率。

当递减指数 $n=0$ 时, 由(1)式得

$$-\int_{q_i}^{q_t} d(\ln q) = K \int_0^t dt$$

两端进行积分后得

$$\ln\left(\frac{q_i}{q_t}\right) = Kt$$

由(1)式知: 当递减指数 $n=0$ 时, $K=D_i$

将 K 代入上式得

$$\ln\left(\frac{q_i}{q_t}\right) = D_i t \quad (4)$$

当递减指数 $n=1$ 时, 由(1)式有

$$-\int_{q_i}^{q_t} \frac{dq}{q^2} = K \int_0^t dt$$

两端积分后得

$$\frac{q_i}{q_t} - 1 = Kq_i t$$

由(1)式, 当 $n=1$ 时, $Kq_i = D_i$

将其代入上式得

$$\frac{q_i}{q_t} - 1 = D_i t \quad (5)$$

解(3)、(4)、(5)式, 分别得到

$$q_t = q_i (1 + nD_i t)^{-\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$q_t = q_i e^{-D_i t} \quad (7)$$

$$q_t = q_i (1 + D_i t)^{-1} \quad (8)$$

(6)、(7)、(8)式为产量随时间的变化关系式, 从数学中双曲线函数、指数函数与调和函数的定义出发, 分别称为双曲线递减、指数递减和调和递减。

应用上述公式可预测递减后任一时刻的产量或采油速度。

2. 累积产量(或采出程度)随时间的变化关系

产量递减后, 在时间 t 内的累积产量为

$$Q_t = \int_0^t q_t dt \quad (9)$$

将(6)式代入(9)式得

$$Q_t = \int_0^t q_i (1 + nD_i t)^{-\frac{1}{n}} dt$$

积分上式得