

A New Method to Determine Remaining Oil Saturation in Reservoir by Time-lapse Production Logging Data

SONG Hong-Wei^{1,2}

1.Hubei Cooperative innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Hubei Wuhan, China

2.School of geophysics and oil resources, Yangtze University, Hubei Wuhan, China

Email: shw98wj@yangtzeu.edu.cn

Abstract

Evaluate oil saturation in reservoir for water flooding oilfields is the key of increasing oilfield development effectiveness and taping the potential. Production logging data is the physical response of oil well production in steady state and the reflection of oil and water distribution characteristics of producing interval in the process of oilfield development. So the research of the theory and method that remaining oil saturation of producing interval is estimated from production logging data has import scientific and practical meaning. In view of the characteristics of oil water two phase distribution in water drive reservoir, in combination with pore volume model of reservoir and material balance equation a method for determining remaining oil saturation of producing interval is proposed by using the time-lapse production logging data. The practical application shows the result is consistent with that of neutron lifetime log evaluation. Field examples analyses demonstrate that the method has some advantages over conventional well logging methods, which include larger scope of investigation and better practicality. The method is more applicable to performance monitoring of remaining oil distribution in productive interval of water drive pool.

Keywords

time-lapse logging; remaining oil saturation; mass volume conservation; production logging

Subject Areas Earth & Environment

生产测井时间推移测井资料确定生产层剩余油饱和度

宋红伟^{1,2}

1.非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

2.长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉

Email: shw98wj@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2017年6月6日; 发布日期: 2017年6月7日

摘要

水驱开发油田饱和度评价是油田挖潜、提高油田开发效果的关键。油田开发过程中, 生产测井资料是稳定状态下油井生产动态的物理响应, 也是生产层油水分布特征的反映。因此, 利用充分生产测井综合评价油藏剩余油饱和度具有十分重要的实用意义。针对水驱油藏油水两相分布的特点, 论述了以储层的孔隙体积模型为基础, 利用物质平衡方程建立了水驱油藏含水饱和度动态变化模型, 并在此基础上提出了一种生利用产测井时间推移测井资料求取生产层剩余油饱和度的新方法。对现场一口生产井历次生产测井资料进行了处理, 该方法计算的生产层的剩余油饱和度随时间变化的关系与该井历次中子寿命测井解释结果具有良好的一致性, 符合油藏开发变化特征, 结果表明, 该方法具有结果代表范围大、实用性强等特点, 更适用于确定水驱油藏产层剩余油分布及对其进行动态监测。

关键词

时间推移测井，剩余油饱和度，物质平衡，生产测井

0 引言

生产测井资料是注水开发油田进行开发方案设计、油田动态计算及水淹层剩余油饱和度评价中不可缺少的数据，它可以反映生产井在测井时刻生产层油水实时的产出情况及产层的动态信息。生产井的剩余油饱和度评价对于油田开发是至关重要的，是油田开发后期面临的复杂问题，为了解决这类问题，充分利用注水开发油层动态生产测井资料探讨新的剩余油饱和度评价方法具有十分重要的意义。

本文提出的用生产测井时间推移测井资料确定产层剩余油饱和度的方法突破了生产测井资料只反映井筒流体特征和生产层流体产出情况的局限，扩大了生产测井资料的应用范围，对注水开发油田开发过程中方案调整和采取合理的措施有重要作用。

1 水驱油藏剩余油饱和度的变化

实际的水驱油藏中，由于岩层结构、微观非均质性、油水性质上的差异（如油水粘度不同）以及毛细管现象和岩石润湿性的影响，储层的孔隙体积模型可用图 1 表示。

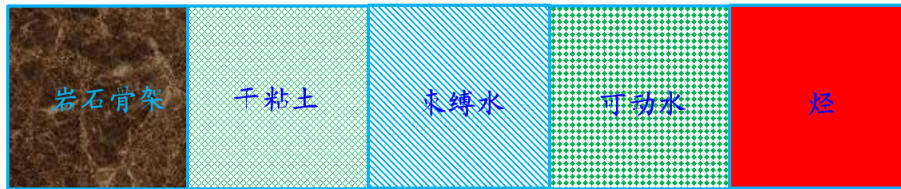


图 1 储层孔隙体积模型示意图

流体的饱和度应包括可动流体饱和度、束缚水饱和度和残余油饱和度；可动流体饱和度由可动油饱和度和可动水饱和度组成。在注水开发过程中，油、水两相的分布必然发生变化^[1]。油田开发最直接的结果是储层中油量减少，而水量增加，储层中的流体饱和度遵循下式：

$$S_{wi} + S_{or} + S_{wm} + S_{om} = 1 \quad (1)$$

式中， S_{wi} 为岩石润湿相束缚水饱和度，小数 f； S_{or} 为岩石残余的非润湿相流体饱和度，小数 f； S_{wm} 为可动部分润湿相流体饱和度，小数 f； S_{om} 为可动部分非润湿相流体饱和度，小数 f^[2]。

对式 (1) 微分得：

$$dS_{wi} + dS_{or} + dS_{wm} + dS_{om} = 0 \quad (2)$$

如果认为油田开发过程中储层原始状态的改变对束缚水、残余油饱和度的影响不大，即认为它们不随油田整个开发过程状态而改变，那么式 (2) 变为：

$$dS_{wm} = - dS_{om} \quad (3)$$

此式说明，产层中含油量的减少量等于产层中含水量的增加量。

根据体积模型，储层的含水饱和度为

$$S_w = S_{wi} + \frac{V_{wm}}{V_\phi} \quad (4)$$

式中， V_{wm} 为可动水体积， V_ϕ 为有效孔隙体积。

油藏的原始地层压力，在开发过程中会随着开采时间的推移和石油的不断采出而逐渐下降，压力下降使油藏中驱油能量减小，采出的油量也随之减少，直到达到某一极限。水驱油田注入水的压力高于产层的地层压力，

因此，注入产层的水会把孔隙中的一部分油驱替出来而占据该孔隙空间，从而使产层的含油饱和度降低、含水饱和度升高。随着注水的不断进行，产层的含油饱和度不断降低、含水饱和度不断升高，经过一段时间后，产层就成了一种只含残余油而主要含注入水的水层^[3]。

2 生产测井资料确定产层剩余油饱和度

在生产井中进行生产测井可以描述油藏动态和确定油田存在的问题。油藏动态研究包括确定油井中各产层产出的流体特性及其各相流体的产出量，油水的产出量反映了油藏油水的变化特征^[4]，因此可以利用生产测井资料确定产层各相流体的产出量，进而联合以上的物质平衡方程可以确定产层的剩余油饱和度。

在实际的水驱油藏中，由于岩层结构、微观非均质性、油水性质上的差异（如油水粘度不同）以及毛细管现象和岩石润湿性的影响，当水渗入油区后将出现一个油水两相的混合流动区域，即两相渗流区，这时，认为自供水边缘到井排之间岩层中存在三个区——纯水渗流区、油水两相渗流区和纯油渗流区。当油井见水后，如果该井产量仅由一个油层供给时，则该油层中就只有纯水渗流区和两相渗流区了^[6]。根据物质平衡原理，两相区中渗入水量的增加和被驱油量的减小就决定了其含水饱和度变化的基本状况^[7]。

根据物质平衡原理，有效孔隙体积中渗入水量的增加和被驱油量的减小以及束缚水饱和度决定了其含水饱和度和 S_w 的大小，方程(4)式可表示为

$$S_w = Q_{w.inj}(F_w - 1) + Q_o + S_{wi} \quad (5)$$

式中， $Q_{w.inj} = \frac{(Q_{w.prod} + Q_{o.prod})|_{t=0}^{t=t}}{V_\phi}$ ， $Q_o = \frac{Q_{o.prod}|_{t=0}^{t=t}}{V_\phi}$ ，其中，t 表示时间， $Q_{w.prod}$ ， $Q_{o.prod}$ 分别为累积水、油的

产出体积； V_ϕ 为有效孔隙体积，定义为 $V_\phi = \frac{Q_{o,swept}}{1 - S_{or} - S_{wi}}$ ； $Q_{o,swept}$ 为无水原油饱和体积， S_{or} ， S_{wi} 为残余

油度和束缚水饱和度； F_w 为产水率。

3 时间推移饱和度和预测

油、气藏的实际开发资料表明，按照一定层系和井网投入开发的油、气藏，由于含（产）水率的增长或是地层压力的下降，将会引起产量的递减。递减期是人们对油气藏施加各项措施并不能改变产量递减的趋势。递减期的长短，主要取决于油气藏开发的最终经济指标的要求。该阶段的产量随时间的变化，可以利用不同的递减规律进行预测，它的产量将按照一定的规律随时间而连续递减。根据 Arps 的理论研究，递减类型可分为指数递减、调和递减和双曲线递减三种，相关关系式如下：

$$\frac{Q}{Q_i} = \left(\frac{D}{D_i} \right)^n \quad (6)$$

式中 Q 为递减到 t 时刻的产量； Q_i 为开始递减时的产油量；D 为递减率， $D = -\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} = -\frac{d \ln Q}{dt}$ ，t 为从开

始递减瞬间算起的开发时间；n 为递减指数，当 $n=\infty$ 时为指数衰减，当 $n=1$ 为调和衰减，当 $1 < n < \infty$ 为双曲线递减^[7]。

根据油、气藏或油、气井递减阶段的生产测井时间推移产出剖面解释数据，可以利用上述的三种递减类型的线性关系式进行判断，以确定到底属于哪一种递减类型。根据产量的变化，适时地对递减类型做出判断，建立新的相关经验公式，进行新的产量衰减预测。根据递减阶段取得的产量、开发时间以及累积产量数据，利用

这些判断方法，通过线性回归法求得递减公式的系数，建立产量与开发时间的相关经验公式。利用这些相关经验公式，预测未来的产量、累积产量随时间的变化数据，结合物质平衡方程（5）式可以用来确定油藏的含水饱和度和。

4 现场应用实例

西部某油田自上而下钻遇的地层有第四系、第三系、白垩系、侏罗系、三叠系及古生界的石炭系和奥陶系，地层埋深达 6000m 以上。其中侏罗系、三叠系是该区的主要含油层系。L16 井是上世纪 90 年代初钻的一口生产井，主力生产层位于 T1 油组。完井时束缚水饱和度 $S_{wi}=35.55\%$ 、残余油饱和度 $S_{or}=20.6\%$ ，原始含油饱和度为 62.8%，1992 年 5 月投产，2008 年到 2011 年共进行了 6 次生产测井，T1 油组只有一个生产层段，即射孔井段为 4745-4762m，历次生产测井产出剖面解释成果资料都已具备，见表 3。

表 1 L16 井时间推移生产测井资料解释成果表

测井日期	油产量 m ³ /d	水产量 m ³ /d	产水率
2008.08.03	28.84	208.28	0.8783738
2009.07.21	18.48	140.48	0.8837443
2009.11.12	17.9	139.32	0.8861468
2010.11.04	16.06	146.58	0.9012543
2011.05.25	11.13	130.94	0.9216583
2011.11.04	4.38	142.18	0.9701146

利用油藏产量递减曲线分析法对历年生产测井数据进行处理，得递减产量与累积产量的关系，如图 2 所示，该油藏属于指数递减类型。

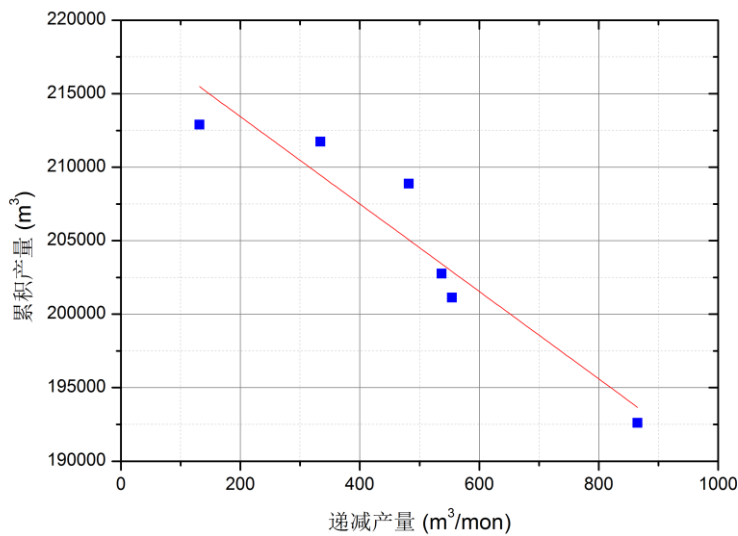


图 2 递减产量与累积产量的关系

拟合关系式为

$$\sum_0^t Q_o = -29.7301Q + 219386.805 \quad (7)$$

相关系数的平方 $R^2=0.86877$ 。

根据含水饱和度公式计算得到历次生产测井时含水饱和度如表 2 所示，时间推移生产测井资料计算饱和和为图 3 所示。

表 2 L16 井时间推移生产测井资料计算饱和度处理成果表

测井日期	油产量 m ³ /d	水产量 m ³ /d	产水率	含水饱和度
2008.08.03	28.84	208.28	0.8783738	0.7404746
2009.07.21	18.48	140.48	0.8837443	0.7574992
2009.11.12	17.9	139.32	0.8861468	0.7607714
2010.11.04	16.06	146.58	0.9012543	0.7729893
2011.05.25	11.13	130.94	0.9216583	0.7786957
2011.11.04	4.38	142.18	0.9701146	0.7810207

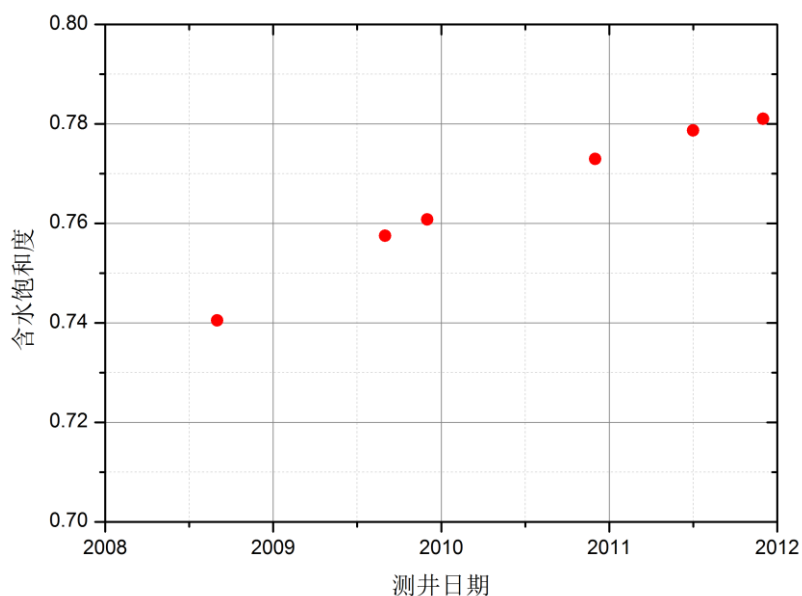


图 3 L16 井时间推移测井资料计算含水饱和度图

利用产量指数递减曲线分析法对历年生产测井数据进行回归拟合，得到递减产量随时间的半对数递减的直线预测关系见图 4、指数关系见图 5，回归公式为

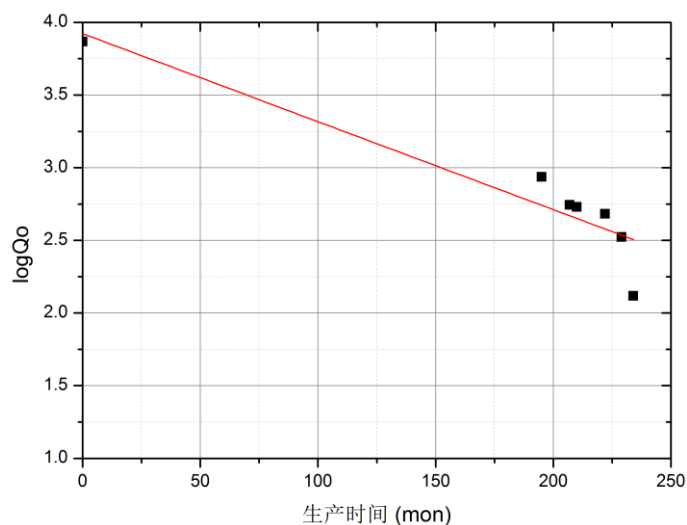


图 4 L16 井递减产量随时间的半对数递减直线图

$$\log Q_o = 3.9224 - 0.00605t \tag{8}$$

相关系数的平方 $R^2=0.85098$ 。

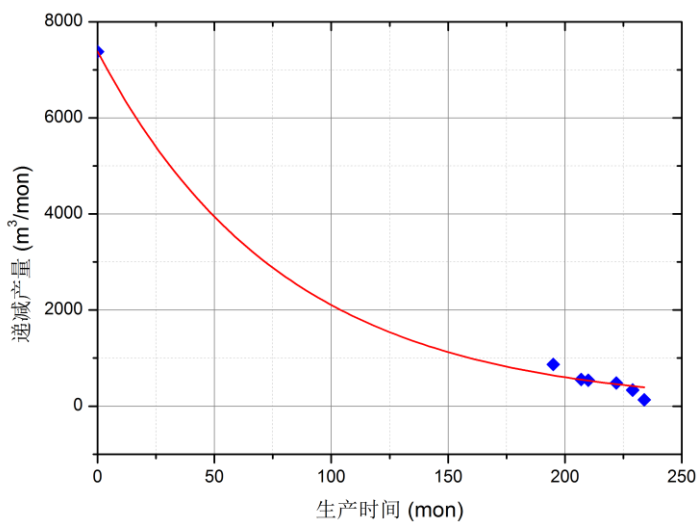


图 5 L16 井递减产量随时间的指数递减关系图

$$Q_o = 7382.6365e^{-0.0154t} \tag{9}$$

相关系数的平方 $R^2=0.9963$ 。

根据方程式 (9) 预测该生产层段含水饱和度和生产时间的关系如图 6 所示。

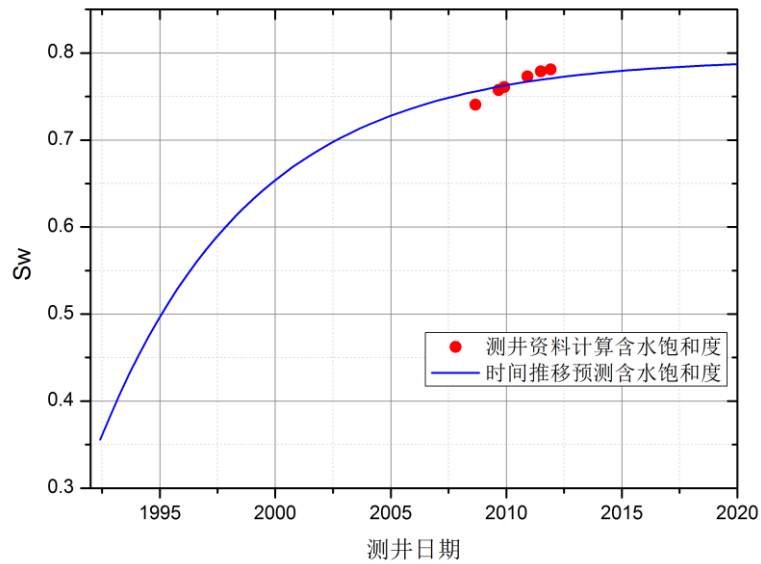


图 6 L16 井含水饱和度时间预测图

由此可以分析得到，利用油藏产量递减曲线分析法预测储层油产量和产层含水饱和度随时间变化的关系与生产测井数据是一致的。图 7 对比分析了该井历次中子寿命测井含水饱和度数据，从分析结果看，生产测井时间推移测井预测的饱和度与中子寿命测井确定的含水饱和度趋于一致。

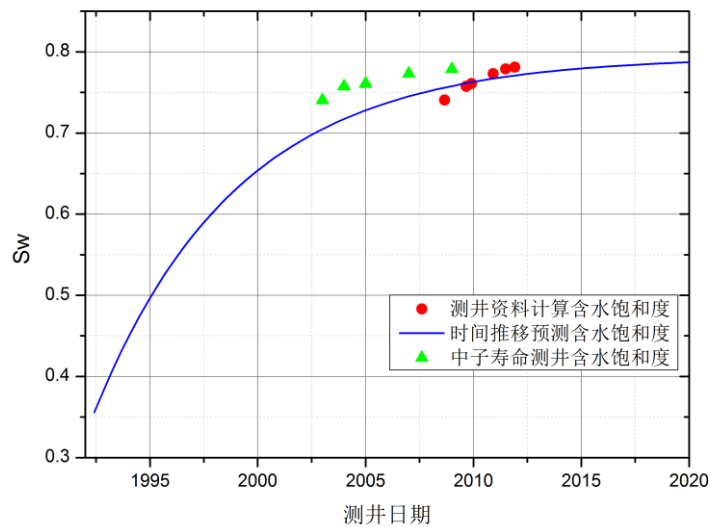


图 7 L16 井含水饱和度时间预测图

5 结论

(1) 本文给出了一种利用生产测井时间推移测井资料计算及预测后续生产时间生产层含水饱和度的新方法, 为动态评价生产井油藏剩余油饱和度动态变化规律提供了一条新途径, 扩展了生产测井资料在动态油藏描述方面的应用范围, 提高了生产测井资料的应用率。

(2) 本文以生产测井为基础, 结合水驱油藏物质平衡原理确定产层剩余油饱和度的方法是可行的, 利用不同开采时间的生产井产出层段生产测井产出剖面资料计算出剩余油饱和度, 能够了解和掌握油藏动态特征, 该方法特别是对单井剩余油评级及随生产时间变化预测具有积极意义。

参考文献(References)

- [1] 赵培华. 油田开发水淹层测井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003:21-22.
- [2] 周渤然, 林纯增, 田中原. 注水过程中岩石物理性质的实验研究[C]. 水驱油田开发测井'96 国际学术研讨会论文集, 1996: 21-22.
- [3] 吴世旗, 钟兴水, 李少泉. 套管井储层剩余油饱和度测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999:143-145.
- [4] Orlando Diego Cortez, Patrick W.M. Corbett. Time lapse Production Logging and the concept of Flowing Units [J]. SPE Europec/EAGE Annual Conference, 13-16 June, 2005, Madrid, Spain.
- [5] 汪中浩. 一种确定油水相对渗透率曲线的新方法[J]. 江汉石油学院学报, 1998,3: 37-39.
- [6] Amir Frooqnia, Carlos Torres-Verd , Kamy Sepehrnoori, Rohollah A-Pour, and Saeedeh Mohebbinia. ESTIMATION OF NEAR-WELLBORE RELATIVE PERMEABILITY FROM SIMULATION AND INVERSION OF TIME-LAPSE[J]. MULTIPHASE PRODUCTION LOGS SPWLA 54th Annual Logging Symposium, June 22-26, 2013.
- [7] 杨通佑, 范尚炯, 陈千元, 吴奇之. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社.1990:132-146.

基金项目

湖北省教育厅科学技术研究项目(D20141302), 中国石油天然气集团公司工程技术重大专项(2013E-3809)。