

# Method to Determine Remaining Oil Saturation in Reservoir by Time-lapse Data of Production Logging

Hongwei Song<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: shw98wj@yangtzeu.edu.cn

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Evaluating oil saturation in reservoirs for water flooding oilfields was the key of increasing oilfield development effectiveness and taping the potential of remaining oil. Production logging data were 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 it was of great significance of evaluation of remaining oil saturation by using production logging data. In view of the characteristics of oil and water two-phase distribution in water drive reservoirs, in combination with pore volume model of reservoir and material balance equation, a new method for determining remaining oil saturation of producing interval is proposed by using the time-lapse data of production logging. The method is used for processing the production logging data from previous productions in an oil well. The results show that the processed result is well consistent with that of neutron lifetime log evaluation for previous productions. 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 for performance monitoring of remaining oil distribution in production interval of water drive pool.

## Keywords

Time-Lapse Logging, Remaining Oil Saturation, Material Balance, Production Logging

---

# 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<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>非常规油气湖北省协同创新中心(长江大学), 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉

作者简介: 宋红伟(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事生产测井的教学和科研工作。

Email: shw98wj@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2017年6月5日; 录用日期: 2017年12月12日; 发布日期: 2018年2月15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, 充分利用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, 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, 并在该基础上提出了一种利用生产测井时间推移测井资料求取生产井产层剩余油饱和度的新方法。利用该方法对现场一口生产井历次生产测井资料进行了处理, 计算的生产层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。上述结果表明该方法具有结果代表范围大、实用性强等特点, 适合于确定水驱油藏产层剩余油分布及其进行动态监测。

## 关键词

时间推移测井, 剩余油饱和度, 物质平衡, 生产测井

Copyright © 2018 by author, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 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至关重要, 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具有十分重要的意义。笔者提出利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的调整和合理措施的采取有重要作用。

## 2. 水驱油藏剩余油饱和度的变化

在实际水驱油藏中, 由于岩层结构、微观非均质性、油水性质上的差异(如油水黏度不同)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。



Figure 1. The schematic diagram of reservoir pore volume model

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、水量增加，储层中的流体饱和度遵循下式[2]：

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

式中： $S_{wi}$ 为岩石润湿相束缚水饱和度，1； $S_{or}$ 为岩石残余的非润湿相流体饱和度，1； $S_{wm}$ 为可动部分润湿相流体饱和度，1； $S_{om}$ 为可动部分非润湿相流体饱和度，1。

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而改变，则式(2)变为：

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

式(3)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：

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

其中，

$$V_\phi = \frac{Q_{o,swept}}{1 - S_{or} - S_{wi}}$$

式中： $S_w$ 为含水饱和度，1； $V_{wm}$ 为可动水体积， $m^3$ ； $V_\phi$ 为有效孔隙体积， $m^3$ ； $Q_{o,swept}$ 为无水原油饱和体积， $m^3$ 。

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且主要含注入水的水层[3]。

### 3. 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，进而联物质平衡方程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(如油水黏度不同)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。在上述情况下,认为自供水边缘到井排之间岩层中存在3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,则该油层中只有纯水渗流区和两相渗流区[5]。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决定了其含水饱和度变化的基本状况[6]。

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 $S_{wi}$ 决定了 $S_w$ 的大小:

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

其中,

$$Q_{w.inj} = \frac{(Q_{w.prod} + Q_{o.prod})|_{t=0}^{t-t}}{V_\phi}, \quad Q_o = \frac{Q_{o.prod}|_{t=0}^{t-t}}{V_\phi}$$

式中: $t$ 为生产时间,mon; $Q_{w.inj}$ 为油井控制范围内有效孔隙中注入水的相对体积,1; $Q_o$ 为油井控制范围内有效孔隙中产出油的相对体积,1; $Q_{w.prod}$ 、 $Q_{o.prod}$ 分别为累积水、累积油的产出体积, $m^3$ ; $F_w$ 为产水率,1。

#### 4. 时间推移饱和度预测

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。递减期是指对油气藏施加各项措施后并不能改变产量递减趋势的时期。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,该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3种,相关关系式为:

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

其中,

$$D = -\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt_e} = -\frac{d \ln Q}{dt_e}$$

式中: $Q$ 为递减到 $t$ 时刻的产量(即递减产量), $m^3/\text{mon}$ ; $Q_i$ 为开始递减时的产油量, $m^3/\text{mon}$ ; $D$ 为递减率,1; $D_i$ 为开始递减时的瞬时递减率,1; $t_e$ 为从开始递减瞬间算起的开发时间,mon; $n$ 为递减指数,1。

当 $n = \infty$ 时为指数衰减;当 $n = 1$ 时为调和衰减;当 $1 < n < \infty$ 时为双曲线递减[6]。

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3种递减类型的线性关系式进行判断,以确定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,利用上述判断方法,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;利用上述相关经验公式,预测未来的产量、累积产量随时间的变化数据,再结合式(5)确定油藏的含水饱和度。

#### 5. 现场应用实例

西部某油田自上而下钻遇的地层有第四系、新近系、古近系、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6000 m以上。其中侏罗系、三叠系是该区的主要含油层系。L16井是20世纪90年代初钻的一口生产井,主力生产层位于T1油组。该井1992年5月投产,2008~2011年供进行

了6次生产测井,T1油组只有一个生产层段(射孔井段为4745~4762 m),完井时  $S_{wi} = 35.55\%$ 、 $S_{or} = 20.6\%$ ,原始含油饱和度为62.8%,历次生产测井产出剖面解释成果如表1所示。

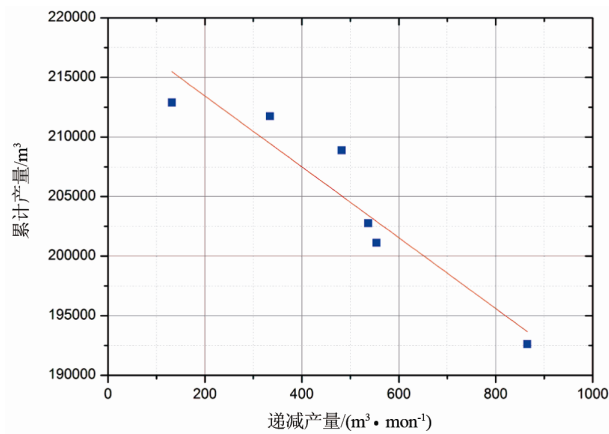
**Table 1.** The interpreting result of time-lapse production logging data in Well L16  
**表 1.** L16 井时间推移生产测井资料解释成果表

测井日期	产油量/( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	产水量/( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	$F_w/1$
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,得到递减产量  $Q$  与累计产量( $\sum_0^t Q_o$ )的关系(图2)。该油藏属于指数递减类型,拟合关系式为:

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

$$R^2 = 0.86877$$



**Figure 2.** The relationship between declined production and cumulative production  
**图 2.** 递减产量与累计产量的关系

根据时间推移生产测井资料计算得到历次生产测井时的  $S_w$ , 如表2所示。

**Table 2.** The result of saturation calculation using time-lapse production logging data in Well L16  
**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	产油量/( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	产水量/( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	$F_w/1$	$S_w/1$
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

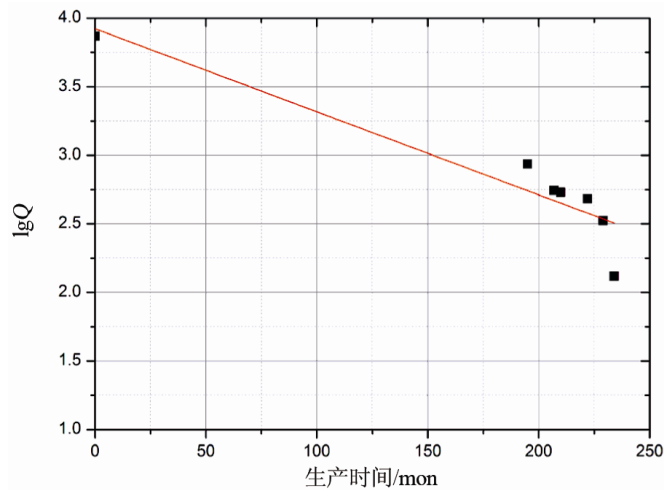
利用产量指数递减曲线分析法对历年生产测井数据进行回归拟合, 得到递减产量随生产时间的半对数递减的直线预测关系见图 3、指数关系见图 4, 回归公式分别为:

$$\lg Q = 3.9224 - 0.00605t \quad (8)$$

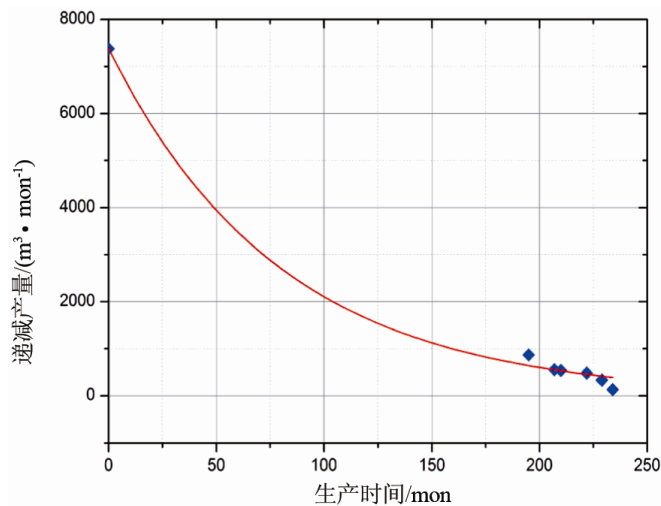
$$R^2 = 0.85098$$

$$Q = 7382.6365e^{-0.0154t} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9963$$

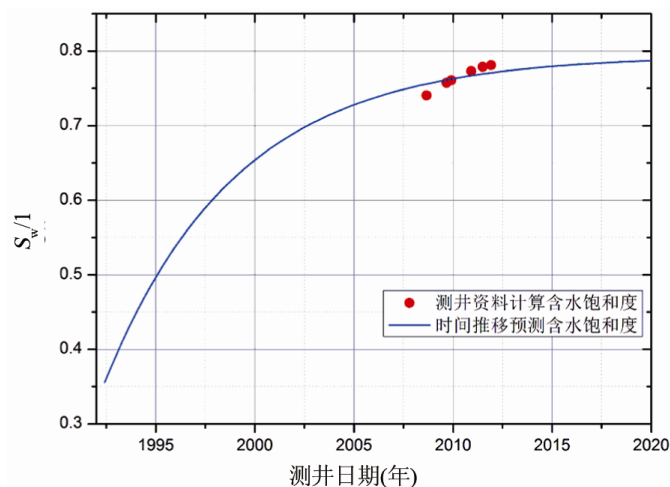


**Figure 3.** The semi-log rectilinear of declined production changing with production time in Well L16  
**图 3.** L16 井递减产量随生产时间的半对数递减直线图



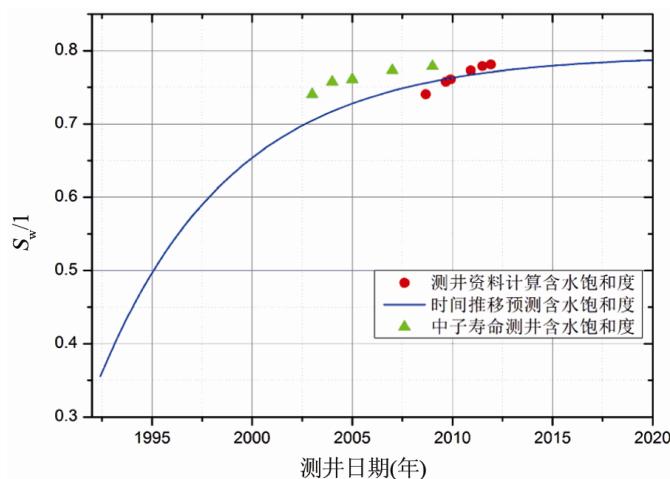
**Figure 4.** The relation of exponential decline as the declined production changing with production time in Well L16  
**图 4.** L16 井递减产量随生产时间的指数递减关系图

根据式(9)预测了 L16 井生产层段测井资料计算含水饱和度与生产测井时间推移测井资料预测含水饱和度对比图(图 5), 可以看出, 生产测井时间推移测井资料预测的含水饱和度随时间变化的关系与测井资料是一致的。图 6 对比分析了 L16 井历次中子寿命测井含水饱和度数据, 可以看出, 生产测井时间推移测井资料预测含水饱和度与中子寿命测井含水饱和度趋于一致。



**Figure 5.** The contrast between water saturations calculated by using logging data and time-lapse prediction water saturation of neutron lifetime logging in Well L16

**图 5.** L16 井测井资料计算含水饱和度与时间推移预测含水饱和度对比图



**Figure 6.** The contrast between water saturations predicted by using time-lapse logging data of production logging and neutron lifetime logging in Well L16

**图 6.** L16 井时间推移测井资料预测含水饱和度与中子寿命测井含水饱和度对比图

## 6. 结论

1) 笔者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) 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价及随生产时间变化预测具有积极意义。

## 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)。

## 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]//中国石油学会. 水驱油田开发测井 96 年国际学术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 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] Cortez, O.D. and Corbett, P.W.M. (2005) Time Lapse Production Logging and the Concept of Flowing Units. SPE Europec/EAGE Annual Conference, Madrid, 13-16 June 2005, SPE94436. <https://doi.org/10.2118/94436-MS>
- [5] Frooqnia, A., Torres-Verdín, C., Sepehrnoori, K., *et al.* (2013) Estimation of Near-Wellbore Relative Permeability from Simulation and Inversion of Time-Lapse. *Multiphase Production Logs SPWLA 54<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*, New Orleans, 22-26 June 2013, SPWLA-2013-VVV.
- [6] 杨通佑, 范尚炯, 陈千元, 等. 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.

[编辑] 龚丹

**Hans** 汉斯

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)