

# Application of Stream Tube Method on Waterflooding Performance

Zhitao Xu

Daqing Oilfield Second Oil Production Plant, Daqing Heilongjiang  
Email: xuzhitao19900517@126.com

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2019; published: May 21<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to improve the theory of waterflooding performance, a mathematical model of five-spot pattern is developed using stream tubes. By superposition calculation of displacement process in single tube model, the solution of the stream-tube model is obtained, and the waterflooding performance parameters of the reservoir can be calculated. With the analysis of the dynamic changes of calculated oil rate, water rate and oil recovery combined with the displacement front, it can be concluded that water breakthrough in the stream tube affects the changes of performance results. The results provide theoretical guidance for development and adjustment of waterflooding.

## Keywords

Stream-Tube Model, Displacement Front, Breakthrough, Waterflooding Performance

---

# 流管法在水驱动态中的应用研究

徐志涛

大庆油田第二采油厂, 黑龙江 大庆  
Email: xuzhitao19900517@126.com

收稿日期: 2019年4月29日; 录用日期: 2019年5月14日; 发布日期: 2019年5月21日

---

## 摘要

为了完善水驱动态理论, 建立了一个基于流管法的五点法井网的数学模型。通过对于单流管模型中驱替过程的叠加计算, 求解了该流管模型, 并可以计算出油藏的水驱动态参数。通过分析计算出的产油量、产水量和采出程度的动态变化, 结合驱替前缘动态, 发现流管中注入水的突破会影响动态结果。该研究结果为水驱开发及调整提供了理论指导。

## 关键词

流管模型, 驱替前缘, 突破, 水驱动态

Copyright © 2019 by author(s) 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

水驱作为油田开发中最重要的一种驱替方式, 在实际田生产中广泛应用, 因此水驱动态的研究也就成了重点[1] [2] [3]。目前对于水驱动态的研究, 都是计算分析产量或波及系数等指标[4] [5] [6] [7], 而对于影响水驱动态的本质原因和内在的联系并未真正认识清楚。

流管法计算过程简单有效, 同时克服了数值模拟的数值弥散作用和室内实验周期长、成本高的缺点[8] [9] [10]。流管是通过追踪流场中质点的运动产生的。流体质点从注入井向生产井移动时所遵循的轨迹是流线, 流线之间互相不交叉, 定义以相邻两条流线为边界的区域为流管[11] [12]。它的生成基于这样一个假设: 流管不随时间改变。应用流管法的动态计算归功于 Higgins and Leighton, 并发表了一系列文章来说明该方法的应用[13] [14]。采用流管法预测水驱动态, 通常是在单管的基础上进行的。分别对每个单独的流管进行计算, 然后将所有流管的结果相加, 就可获得井网的总动态。

本文基于流管法的基本原理, 给出了五点法井网的三角流管模型, 建立了水驱动态的油藏工程计算方法。通过分析产油量、产水量、采出程度以及驱替前缘的动态变化, 从机理上得出了影响水驱动态的关键因素。

## 2. 流管模型的建立与计算

### 2.1. 流管模型的建立

五点法井网由于其灵活多变的特性, 在油田被广泛应用。因此, 本文将在五点法井网的基础上进行一系列的计算。五点法井网示意图如图 1 所示。

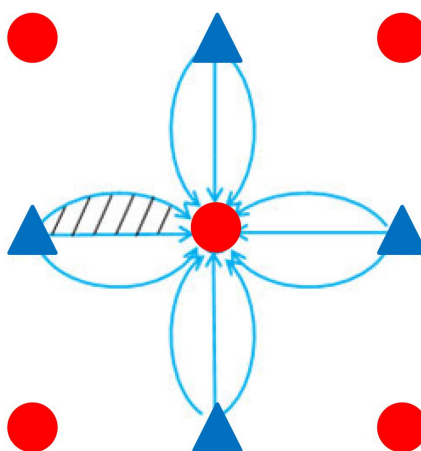


Figure 1. Schematic diagram of the five-spot pattern  
图 1. 五点法井网示意图

取其 1/8 单元作为一个计算单元。为了方便计算，将弯曲流管简化为三角流管，为了方便计算流管的各项几何参数，将每根三角流管拉直后都看成是由两个对称的等腰三角形拼接而成的，如图 2 所示。

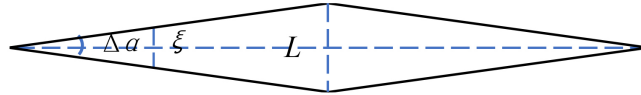


Figure 2. Schematic diagram of a triangular stream tube  
图 2. 三角流管示意图

以流管角平分线的路径来代替油水界面的运动路径，角平分线上某一位置  $\xi$  处的横截面积须分以下两种情况讨论：

$$A(\xi) = \begin{cases} 2 \tan \frac{\Delta\alpha}{2} h \cdot \xi & \left( r_w \leq \xi \leq \frac{L}{2} \right) \\ 2 \tan \frac{\Delta\alpha}{2} h \cdot (L - \xi) & \left( \frac{L}{2} < \xi \leq L - r_w \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $h$  为油层厚度，m； $r_w$  为井径，m。

## 2.2. 流管模型中驱替过程的计算

在三角流管中应用两相渗流的达西公式[15]：

$$p_{iwf} - p_{wf} = q \cdot \frac{1}{K} \int_{r_w}^{L-r_w} \frac{d\xi}{A(\xi) \left( \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \frac{K_{ro}}{\mu_o} \right)} \quad (2)$$

式中， $p_{iwf}$ 、 $p_{wf}$  分别为注水井和生产井的井底压力，Pa； $K$  为绝对渗透率， $m^2$ ； $K_{ro}$ 、 $K_{rw}$  分别为油相和水相的相对渗透率。

可将渗流阻力定义为：

$$R = \frac{1}{K} \int_{r_w}^{L-r_w} \frac{d\xi}{A(\xi) \left( \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \frac{K_{ro}}{\mu_o} \right)} \quad (3)$$

注水过程中，还未突破时，单根流管内的流动由两部分组成：一部分是从注入井到前缘  $L_f$  的两相流动，另一部分是从  $L_f$  到生产井的油相单相流动，此时有：

$$R = \frac{1}{K} \left[ \int_{r_w}^{L_f} \frac{d\xi}{A(\xi) \left( \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \frac{K_{ro}}{\mu_o} \right)} + \int_{L_f}^{L-r_w} \frac{d\xi}{A(\xi) \frac{K_{ro}(S_{wc})}{\mu_o}} \right] \quad (4)$$

式中， $S_{wc}$  为束缚水饱和度。

## 2.3. 动态计算

综合所有流管，可以得到五点法井网的产油量、产水量为：

$$Q_o = 8 \sum_{i=1}^N q_o(i) \quad (5)$$

$$Q_w = 8 \sum_{i=1}^N q_w(i) \quad (6)$$

根据采出程度的定义[16], 可得:

$$R_p = \frac{\sum_{j=1}^{\frac{T}{\Delta t}} Q_o(j) \Delta t}{S_{\text{total}} h \phi \cdot (1 - S_{wc})} \quad (7)$$

式中,  $\Delta t$  为时间步长, s;  $\phi$  为孔隙度;  $S_{\text{total}}$  为所有流管流动区域的总面积,  $\text{m}^2$ 。

### 3. 动态分析

应用上述理论方法, 选取某油藏的基本参数, 并对五点法井网计算单元的流管进行划分, 参数如表 1 所示, 从而建立了计算模型。

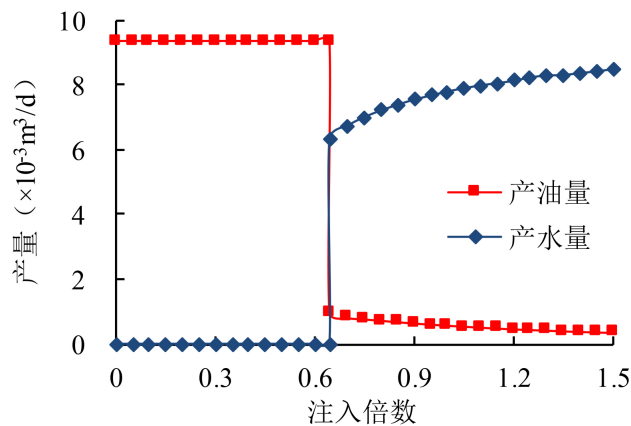
**Table 1.** Basic model parameters

**表 1.** 模型基本参数

参数	数值	参数	数值
油水井距 $l$ (m)	200	井筒半径 $r_w$ (m)	0.15
孔隙度 $\phi$	0.21	水相粘度 $\mu_w$ (mPa·s)	0.75
绝对渗透率 $K$ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	80	油相粘度 $\mu_o$ (mPa·s)	3.5
储层厚度 $h$ (m)	2	流管划分数目 $N$	45

通过计算出的结果对比常规水驱动态法对比, 此流管计算方法准确可行, 同时该方法具有计算时间较短, 适应性更强的优点。

为了从根本上认清井网的产量变化, 首先对单根流管的产量变化进行研究。本文将最靠近注水井和采油井的连线的流管称之为主流管, 以其为研究对象, 主流管的产油量和产水量随注入倍数的变化曲线如图 3 所示。主流管注水初期以稳定产量产油, 不产水。注水到 0.645 PV 时, 流管发生突破, 此时产油量明显变小, 产水量明显变大。突破见水之后, 产油量继续下降, 产水量逐渐上升。其他流管内产量的变化情况也有相同的趋势。



**Figure 3.** Oil/water rate vs. PV injected of the main stream tube  
**图 3.** 主流管的产油量/产水量随注入倍数的变化

将所有流管的产油、产水数据叠加起来可以得到五点法井网的产量，同样可以得到采出程度随驱替过程的变化，如图 4 所示。从图中可以看出，直到主流管突破时，存在一条直线，在其他的流管驱替过程中，直线消失，伴随着逐渐变小的斜率。这可以通过在注入水突破后驱替前缘后平均含水饱和度的增加来解释。

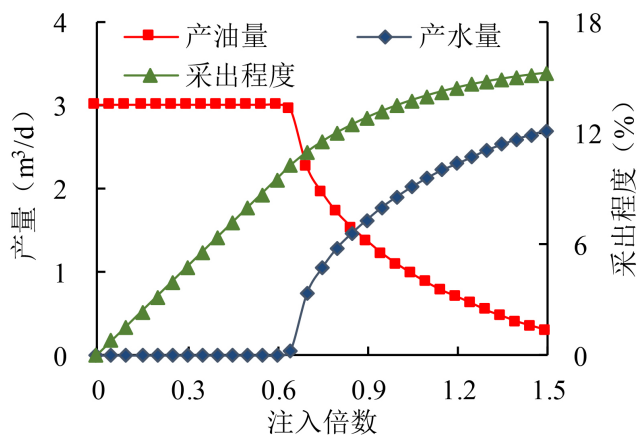


Figure 4. Oil/water rate and oil recovery vs. PV injected of the five-spot pattern  
图 4. 五点法井网的产油量/产水量和采出程度随注入倍数的变化

为了了解驱替前缘的动态变化，做出每隔 0.14 PV 至主流管中注入水突破时刻的所有流管的驱替前缘位置图，如图 5 所示。由图可知，沿主流线方向出现了明显的舌进现象，造成主流管最先突破见水。流管离主流线越远，驱替前缘推进越慢，所以也就越晚突破。

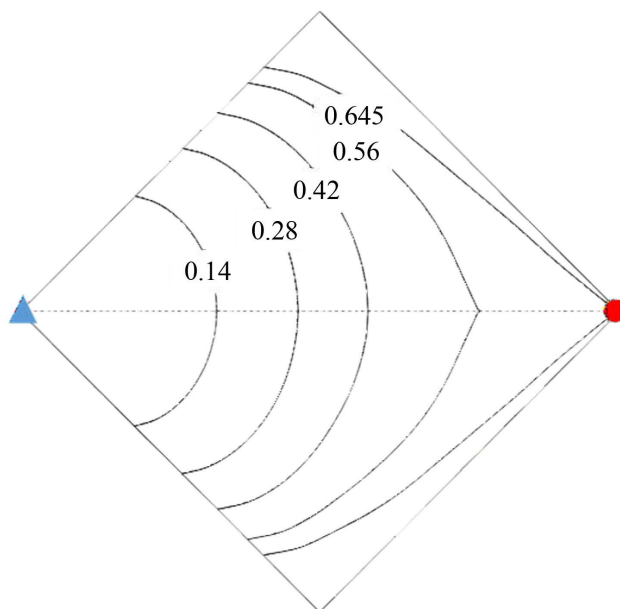


Figure 5. Dynamic position of the displacement front  
图 5. 水驱前缘位置动态图

通过以上分析，可推断出流管中注入水的突破会影响动态结果的变化。原因是突破时相态会发生变化，突破之前为单相和两相共存，突破时变为完全油水两相流。

## 4. 结论

1) 建立了计算水驱动态的计算方法, 完善了油藏工程理论方法, 它可以用来计算产油量、产水量以及采出程度。

2) 通过分析计算的水驱动态变化, 并结合驱替前缘动态, 指出流管中注入水的突破会影响动态结果。

## 参考文献

- [1] 张宏友, 王美楠, 陈晓祺, 别梦君, 肖波. 渤海油田水驱油藏含水率与采出程度关系曲线图版建立及其应用[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 73-76.
- [2] 范天一, 宋新民, 吴淑红, 李巧云, 王宝华, 李小波, 李华, 刘海龙. 低渗透油藏水驱动态裂缝数学模型及数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 496-501.
- [3] 赵传峰, 姜汉桥, 陈民锋, 李秀生. 裂缝性砂岩油藏的水驱动态规律[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(2): 26-28.
- [4] 凌浩川, 周海燕, 孟智强, 石洪福, 孔超杰. 考虑产液量变化的水驱油藏产量递减规律研究[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 96-100.
- [5] 赵春明, 罗宪波, 别梦君. 水驱油田产量递减规律研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(1): 35-38.
- [6] 张顺康. 利用动态资料计算水驱波及系数方法研究[J]. 复杂油气藏, 2018, 11(1): 49-51.
- [7] 杜晓康, 李治平, 田丰, 姜凯. 水驱油田高含水期体积波及系数预测方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(1): 83-87.
- [8] Thiele, M.R., Batycky, R.P., Blunt, M.J., et al. (1996) Simulating Flow in Heterogeneous Systems Using Streamtubes and Streamlines. *Society of Petroleum Engineers*, 11, 5-12. <https://doi.org/10.2118/27834-PA>
- [9] Portella, R.C.M. and Hewett, T.A. (2000) Upscaling, Gridding, and Simulating Using Streamtubes. *Society of Petroleum Engineers*, 5, 315-323. <https://doi.org/10.2118/65684-PA>
- [10] 李兴科, 尹洪军, 徐志涛, 付京. 基于流管法的低渗透油藏水驱动态分析[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2017, 32(6): 704-711.
- [11] 邢翠巧, 尹洪军, 李兴科, 刘岢鑫, 付京. 基于流管法的面积波及效率计算方法研究[J]. 河北工业科技, 2018, 35(4): 231-236.
- [12] 付莹. 基于流管法平-直联合开发井网水平井开发规律研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [13] Higgins, R.V. and Leighton, A.J. (1962) A Computer Method to Calculate Two-Phase Flow in Any Irregularly Bounded Porous Medium. *Society of Petroleum Engineers*, 14, 679-683. <https://doi.org/10.2118/243-PA>
- [14] Higgins, R.V. and Leighton, A.J. (1962) Computer Prediction of Water Drive of Oil and Gas Mixtures through Irregularly Bounded Porous Media Three-Phase Flow. *Society of Petroleum Engineers*, 14, 1048-1054. <https://doi.org/10.2118/283-PA>
- [15] 李宝树. 油水两相渗流公式的改进[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(5): 79-81.
- [16] 纪淑红, 田昌炳, 石成方, 叶继根, 张祖波, 傅秀娟. 高含水阶段重新认识水驱油效率[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 338-345.

### 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: 2330-1724, 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: [ojs@hanspub.org](mailto:ojs@hanspub.org)