

# 油藏工程原理与方法

---

## （第二章）

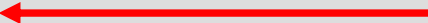
姜汉桥

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

- 1、混相与非混相
- 2、驱替与吸吮
- 3、稳定与不稳定
- 4、为什么要计算开发动态

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

计算注水开发指标的方法：

- 1 岩心试验
- 2 数值模拟
- 3 解析解 
- 4 各种经验方法

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

- 1 一维不稳定驱替
- 2 重力分异情况下的驱替
- 3 底水锥进动态
- 4 面积注水开发指标计算
- 5 剩余油饱和度及其流动性
- 6 改善注水开发效果的水动力学方法

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2-1 一维不稳定驱替

假设条件:

- 1) 油水两相流动，且运动方向相同；
- 2) 岩石是水湿的；水驱油过程；
- 3) 流体不可以压缩，是刚性流体；
- 4) 毛管力和重力使流体饱和度在纵向上达到瞬时平衡。

## § 2-1 一维不稳定驱替

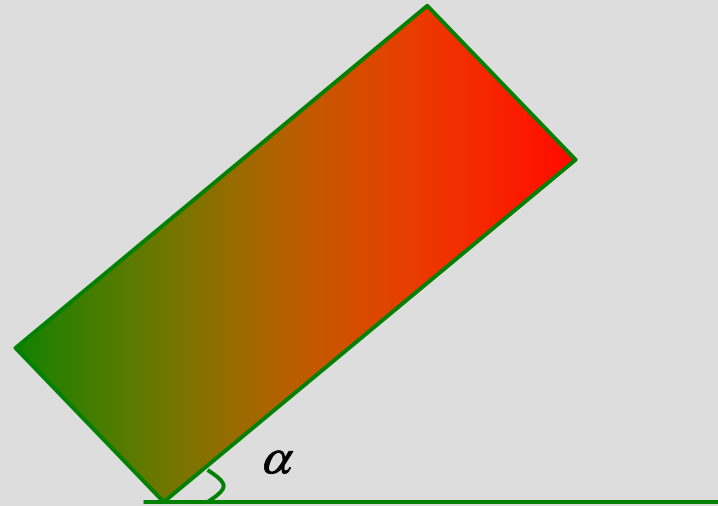
本节讨论：

- 1 分流量方程
- 2 恒速注水开发指标计算
- 3 恒压注水开发指标计算
- 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
- 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
- 6 前缘推进方程解的局限性

## § 2-1 一维不稳定驱替

### 1、分流量方程

计算一维考虑重力、毛管力下的出口端面动态（含水率）

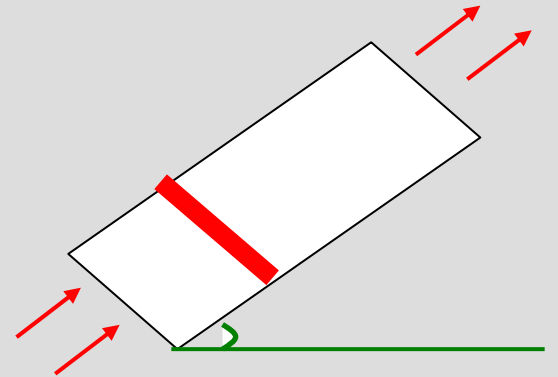


已知端面面积 $A$ ，渗透率为 $K$ ，流体粘度  $\mu_o$ 、密度  $\rho_o$  已知。

求解出口端面的含水率变化？

达西定律可以描述

$$q = -\frac{kA}{\mu} \times \frac{\Delta P}{\Delta L}$$



对于油相:  $q_o = -\frac{kk_{ro}A}{\mu_o} \left( \frac{\partial P_o}{\partial x} + \rho_o g \sin \alpha \right)$

对于水相:  $q_w = -\frac{kk_{rw}A}{\mu_w} \left( \frac{\partial P_w}{\partial x} + \rho_w g \sin \alpha \right)$

$$q_t = q_o + q_w \quad q_w = f_w \times q_t$$

$$q_o = (1 - f_w) \times q_t$$



$$q_o = -\frac{kk_{ro}A}{\mu_o} \left( \frac{\partial P_o}{\partial x} + \rho_o g \sin \alpha \right)$$

$$\text{令 } \lambda_o = \frac{kk_{ro}}{\mu_o}$$

为油的流量

$$q_w = -\frac{kk_{rw}A}{\mu_w} \left( \frac{\partial P_w}{\partial x} + \rho_w g \sin \alpha \right)$$

$$\text{令 } \lambda_w = \frac{kk_{rw}}{\mu_w}$$

为水的流量

$$-(1 - f_w) \frac{q_t}{\lambda_o A} = \left( \frac{\partial P_o}{\partial x} + \rho_o g \sin \alpha \right)$$

$$-f_w \frac{q_t}{\lambda_w A} = \left( \frac{\partial P_w}{\partial x} + \rho_w g \sin \alpha \right)$$

$$p_c = p_o - p_w$$

两式相减:

$$-\frac{q_t}{\lambda_o A} + \frac{q_t}{A} \frac{1}{\lambda_o} f_w + \frac{q_t}{A} \frac{1}{\lambda_w} f_w = \frac{\partial P_o}{\partial x} - \frac{\partial P_w}{\partial x} + (\rho_o - \rho_w) g \sin \alpha$$

$$-\frac{q_t}{A \lambda_o} + \frac{q_t}{A} f_w \left( \frac{1}{\lambda_o} + \frac{1}{\lambda_w} \right) = \frac{\partial P_c}{\partial x} + (\rho_o - \rho_w) g \sin \alpha$$

$$-\frac{q_t}{A\lambda_o} + \frac{q_t}{A} f_w \left( \frac{1}{\lambda_w} + \frac{1}{\lambda_o} \right) = \frac{\partial P_c}{\partial x} \left[ \frac{\lambda_o A}{q_t} + \frac{(\rho_o - \rho_w) g \sin \alpha}{q_t} \right]$$

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} + \frac{\lambda_w \lambda_o A \left[ \frac{\partial P_c}{\partial x} + (\rho_o - \rho_w) g \sin \alpha \right]}{q_t (\lambda_w + \lambda_o)}$$

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left[ 1 + \frac{\lambda_o A \left( \frac{\partial P_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right)}{q_t} \right]$$

考虑毛管力、重力，一维均质地层出口端的分流量方程

分析：什么因素影响含水率的大小？

流体物性参数、油水相界面情况、地层性质、生产参数

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left[ 1 + \frac{\lambda_o A \left( \frac{\partial P_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right)}{q_t} \right]$$

## 1) 水油流度

油水流度，粘度关系, 含水饱和度

## 2) 毛管力

$$\frac{\partial P_c}{\partial x} = \frac{\partial P_c}{\partial s_w} \times \frac{\partial s_w}{\partial x}$$

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left[ 1 + \frac{\lambda_o A \left( \frac{\partial P_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right)}{q_t} \right]$$

### 3) 重力作用与地层倾角

地层倾角的范围不同，重力差起的作用不同

◆低部位注水，高部位采油

( $0 < \alpha < \pi$ ) 向上驱油——  $\Delta \rho g \sin \theta$  为正

值

◆低部位注水，高部位采油

( $\pi < \alpha < 2\pi$ ) 向上驱油——  $\Delta \rho g \sin \theta$  为负值。

## 分流量方程的简化形式:

当不考虑毛管力:

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left( 1 + \frac{\lambda_o A \left[ \frac{\partial P_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right]}{q_t} \right)$$
$$= \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left( 1 - \frac{\lambda_o A \Delta \rho g \sin \alpha}{q_t} \right)$$

当不考虑毛管力、重力因素或者地层水平时:

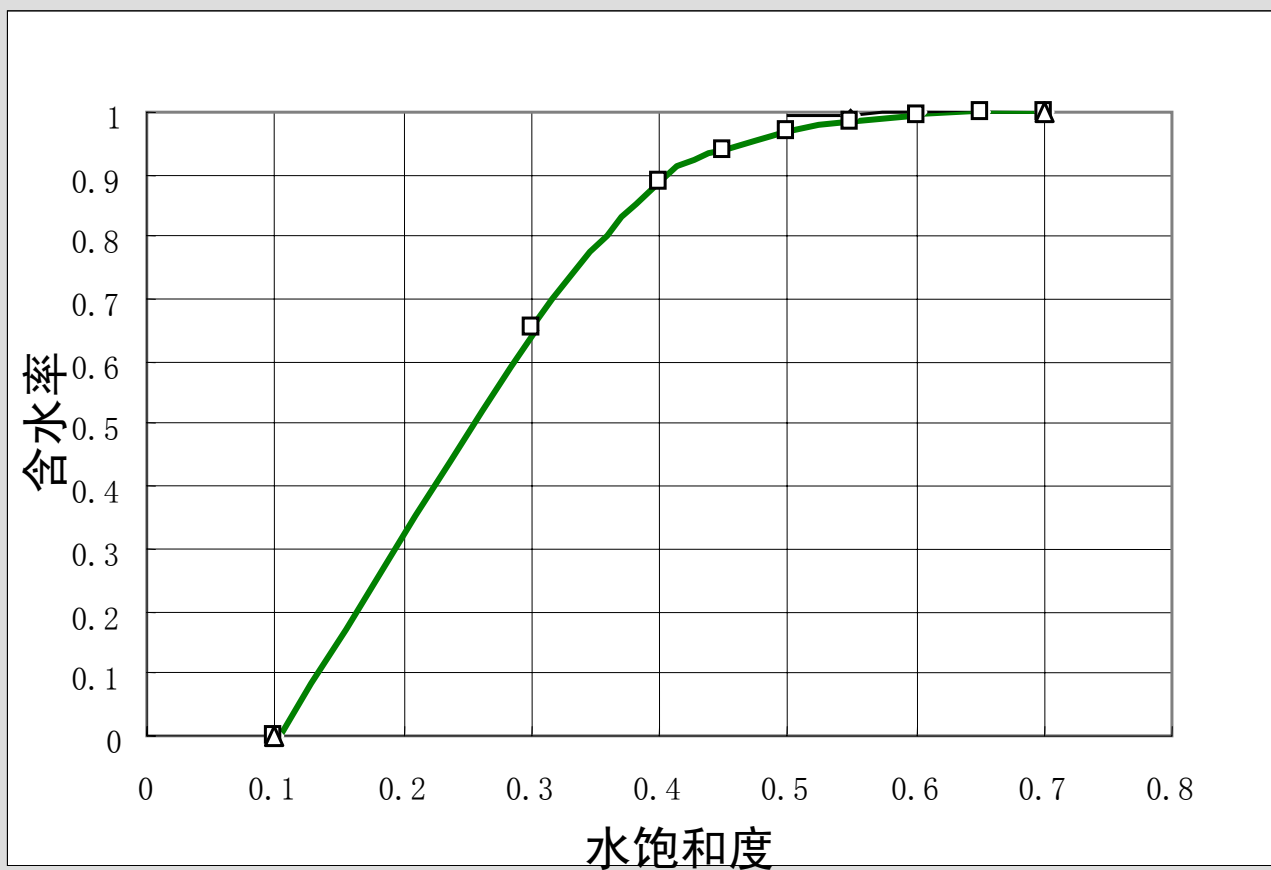
$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left( 1 + \frac{\lambda_o A \left[ \frac{\partial P_c}{\partial x} - \Delta \rho g \sin \alpha \right]}{q_t} \right)$$
$$= \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \left( 1 - \frac{\lambda_o A \Delta \rho g \sin \alpha}{q_t} \right) = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} = \frac{k_{rw}(S_w) / \mu_w}{k_{rw}(S_w) / \mu_w + k_{rw}(S_w) / \mu_w}$$

.....

.....

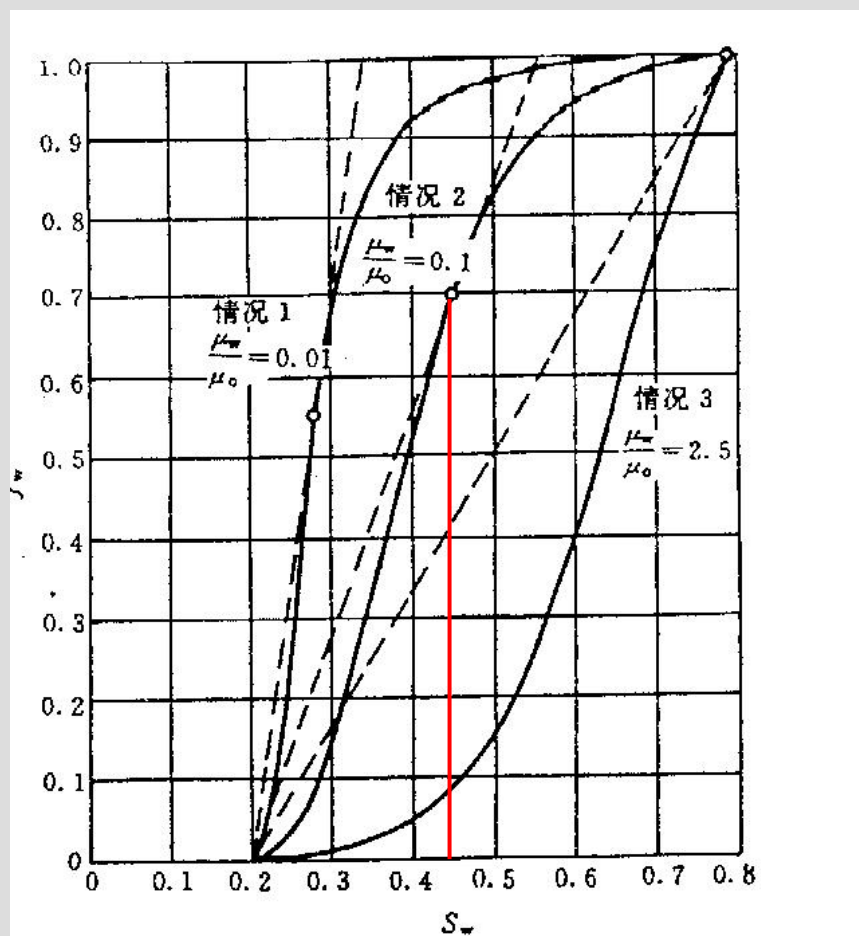
在取得了油水相对渗透率资料和油水粘度比以后，  
即可以计算出分流量曲线：

$$f_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} = \frac{\frac{k_{rw}(s_w)}{\mu_w}}{\frac{k_{rw}(s_w)}{\mu_w} + \frac{k_{ro}(s_w)}{\mu_o}} = \frac{1}{1 + \frac{k_{ro}(s_w)}{k_{rw}(s_w)} \times \frac{\mu_w}{\mu_o}}$$



## 分流量方程的应用:

### 1) 确定水驱油前缘含水饱和度



### 2) 确定任意出口端饱和度下的含水率, 采出程度

### 3) 确定前缘饱和度面移动速度

由B—L方程:

$$x = \frac{f_w'}{\phi A} \int_0^t q_t dt$$

$f_w'$  为含水率对含水饱和度的导数,  
也称为含水上升率

任意饱和度面的移动速度:

$$\left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{q_t}{\phi A} \left( \frac{\partial f_w}{\partial s_w} \right) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{dx}{dt} \right)_{swf} = \frac{q_t}{\phi A} \left( \frac{\partial f_w}{\partial s_w} \right)_{swf} & \text{油水前缘} \\ \left( \frac{dx}{dt} \right)_{sw} = \frac{q_t}{\phi A} \left( \frac{\partial f_w}{\partial s_w} \right)_{sw} & \text{任意饱和度面} \end{array} \right.$$



要求掌握考虑重力和毛管力情况下的分流量方程的具体形式，最好能够推倒。掌握各种因素对含水率的影响规律。

- 1 分流量方程
- 2 恒速注水开发指标计算 ←
- 3 恒压注水开发指标计算
- 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
- 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
- 6 前缘推进方程解的局限性

## 2、恒速注水动态预测



一维地层

已知:  $L; \phi; A; \mu_o; \mu_w; k_{ro}; k_{rw}$

注入速度恒定  $Q_i$  , 刚性驱替, 地层水平,

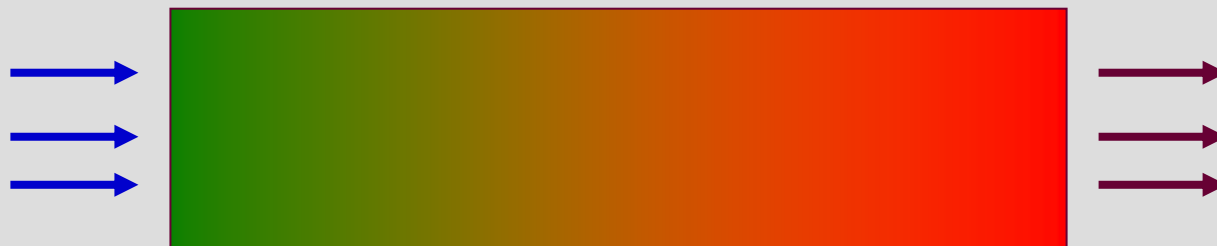
求注水动态

不考虑重力和毛细力, 。

1) 见水前: 产量, 含水, 累积产油量, 累积注水量  
随时间的变化规律?

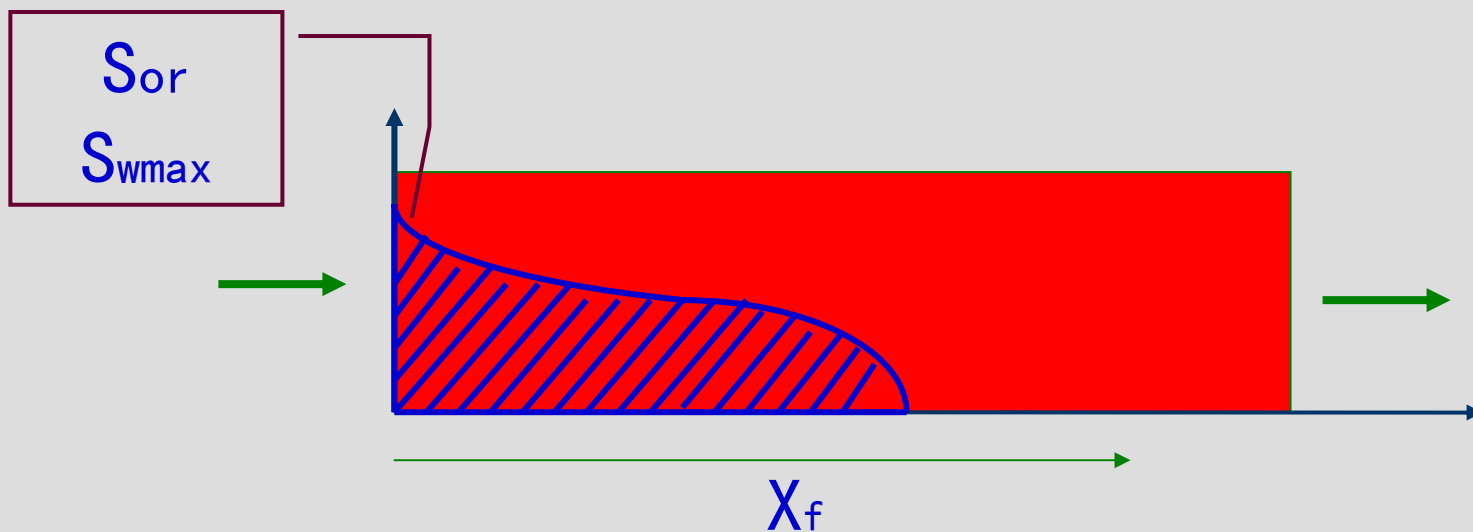
2) 见水后: 产液量、含水率、产油量、平均含水饱和度, 累积产油量, 采出程度随时间的变化?

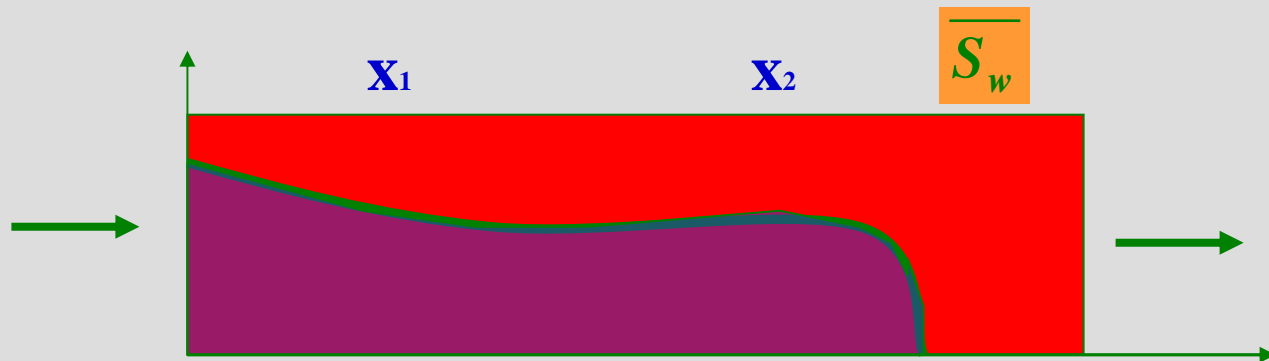
# 见水前动态



$$Q_i = Q_o \quad Q_w = 0 \quad f_w = 0 \quad W_p = 0$$

$$W_i = N_p = Q_i \times t \quad t \sim x_f$$





$$W_i = N_p = \phi A x_f \times (\overline{S_w} - S_{wi}) = Q_i \times t$$

关键是求解油水两相区间的平均含水饱和度  
对于任意的区间（ $x_1 - x_2$ ）的平均饱和度：

$$\overline{S_w} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} S_w A \phi dx}{\int_{x_1}^{x_2} A \phi dx} \quad \rightarrow \quad \frac{S_w x \Big|_{x_1}^{x_2} - \int_{S_{w1}}^{S_{w2}} x ds_w}{x_2 - x_1}$$

$$\frac{s_w x \Big|_{x_1}^{x_2} - \int_{s_{w1}}^{s_{w2}} x ds_w}{x_2 - x_1}$$

$$\because x = \frac{f_w'}{\phi A} \int_0^t q_t dt$$

$$\int_{s_{w1}}^{s_{w2}} x ds_w = \frac{q_i t}{\phi A} \int_{s_{w1}}^{s_{w2}} \left( \frac{\partial f_w}{\partial s_w} \right)_{sw} ds_w$$

$$= \frac{q_i t}{\phi A} \int_{f_{sw1}}^{f_{sw2}} df_w = \frac{q_i t}{\phi A} [f_{w2} - f_{w1}]$$

总的表达形式  
为：

$$\bar{s}_w = \frac{\int_{x_1}^{x_2} s_w A \phi dx}{\int_{x_1}^{x_2} A \phi dx} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} s_w dx}{x_2 - x_1} = \frac{x_2 s_{w2} - x_1 s_{w1}}{x_2 - x_1} - \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{s_{w1}}^{s_{w2}} x ds_w$$

$$\bar{s}_w = \frac{x_2 s_{w2} - x_1 s_{w1}}{x_2 - x_1} - \frac{q_i t (f_{w2} - f_{w1})}{A \phi (x_2 - x_1)}$$

选取两个端点分别为入口端和油水的前缘。

对应的 $x_1$ 、 $x_2$ 分别为 0 和  $x_f$ 。

对应为最大含水饱和度 $S_{wmax}$ 和前缘含水饱和度 $S_{wf}$

$$\overline{s_w} = \frac{x_2 S_{w2} - x_1 S_{w1}}{x_2 - x_1} - \frac{q_i t (f_{w2} - f_{w1})}{A \phi (x_2 - x_1)}$$

$$\overline{s_w} = \frac{x_f S_{wf} - 0 \times S_{wmax}}{x_f - 0} - \frac{q_i t (f_{swf} - 1)}{A \phi (x_f - 0)}$$

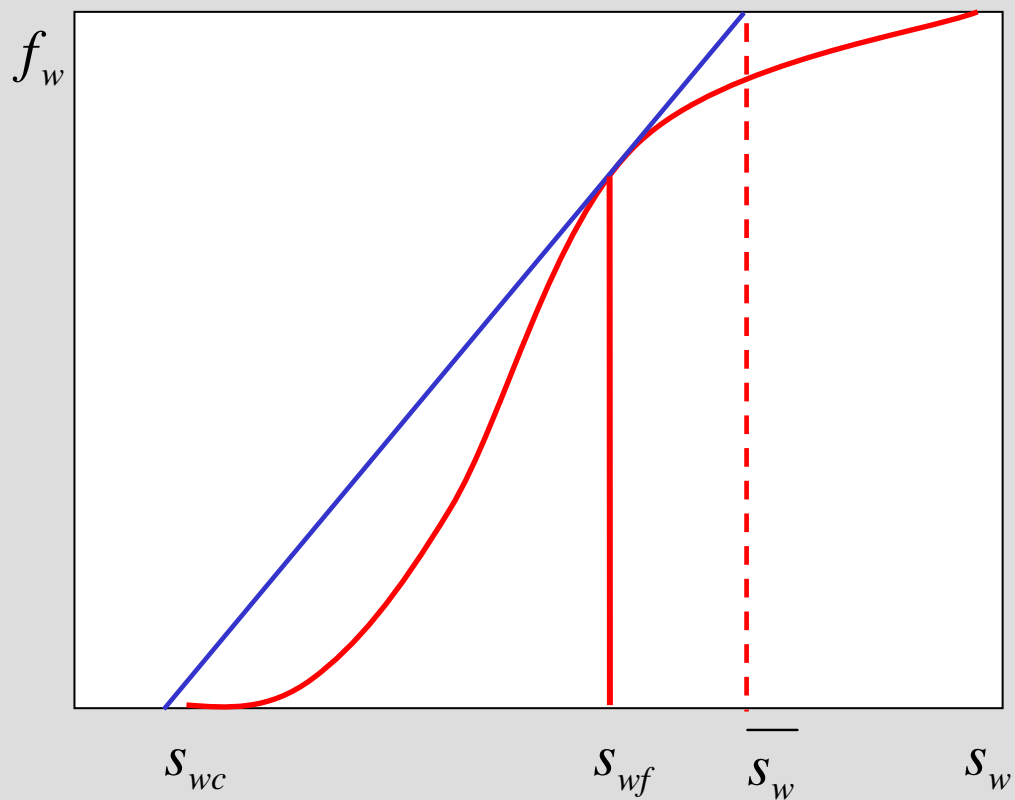
$$\overline{s_w} = S_{wf} - \frac{q_i t (f_{swf} - 1)}{A \phi x_f}$$

$$\overline{S_w} = s_{wf} + \frac{q_i t (1 - f_{swf})}{A \phi x_f}$$

$$\overline{S_w} = s_{wf} + \frac{(1 - f_{swf})}{f'_{swf}}$$

$$\because x = \frac{f'_w}{\phi A} \int_0^t q_t dt \Rightarrow \frac{1}{f'_w} = \frac{q_i t}{\phi A x}$$

求平均饱和度可以直接用图解法





$$W_i = N_p = Q_i \times t = \phi A x_f \times (\overline{S_w} - S_{wi})$$

可以求解任意前缘下的累积产量，以及任意前沿距离下所用的时间。

$$Q_i = Q_o \quad Q_w = 0 \quad f_w = 0 \quad W_p = 0$$

$$W_i = N_p = Q_i \times t$$

——无水产油量、无水采油期

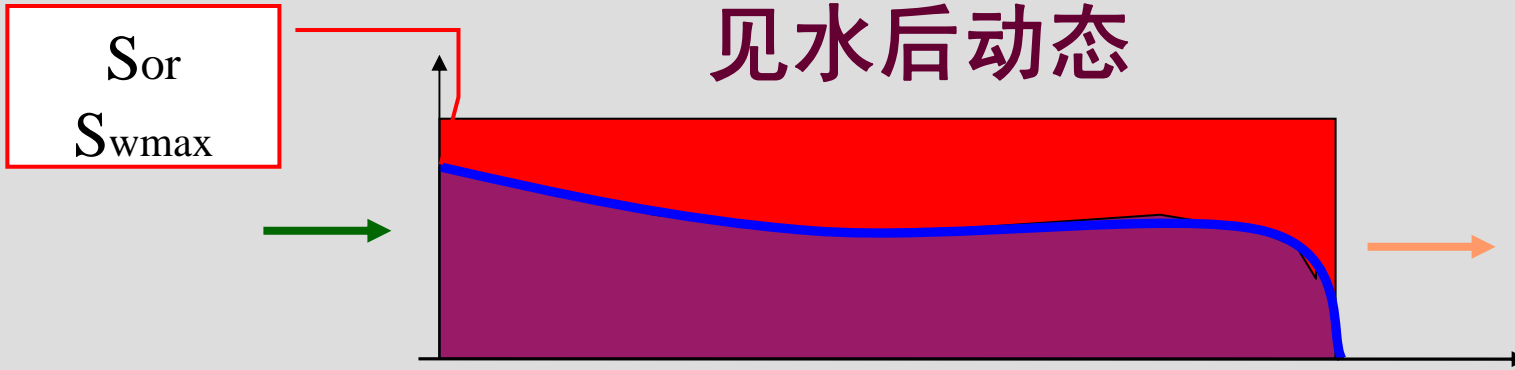
$X_2=L$  注入水到达出口端

$$W_i = N_p = Q_i \times t = \phi A L \times (\overline{S_w} - S_{wi})$$

$$Q_o = Q_i \times (1 - f_{swf})$$

$$t_{\text{见水}} = \frac{N_p}{Q_i}$$

## 见水后动态



2) 见水后，产液量、含水率、产量、地层平均含水饱和度，油藏累积产油量，累积产水量、采出程度随时间的变化？

$$Q_i = Q_t$$

$$Q_w = Q_i \times f_w$$

$$Q_o = Q_i \times (1 - f_w)$$

$$N_p = \phi A L (\bar{s}_w - s_{wc}) \quad W_i = Q_i \times t \quad W_p = Q_i \times t - N_p$$

$$R = \frac{N_p}{N} = \frac{\phi AL(\bar{s}_w - s_{wc})}{\phi AL(1 - s_{wc})} = \frac{(\bar{s}_w - s_{wc})}{(1 - s_{wc})}$$

以上的所有问题归结为求解任意出口端含水饱和度下的地层油水两相区的平均含水饱和度大小以及和时间的关系。

设出口端饱和度  $S_{w2} \geq S_{wf}$  ；  
即可求出出口端的  $f_w$ 、 $Q_o$ 、 $Q_w$

$$\bar{s}_w = \frac{x_2 s_{w2} - x_1 s_{w1}}{x_2 - x_1} - \frac{q_i t (f_{w2} - f_{w1})}{A \phi (x_2 - x_1)}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{s_w} &= \frac{x_2 s_{w2} - x_1 s_{w1}}{x_2 - x_1} - \frac{q_i t (f_{w2} - f_{w1})}{A \phi (x_2 - x_1)} \\
 &= \frac{L \times s_{w2} - 0 \times s_{w\max}}{L - 0} - \frac{q_i t (f_{w2} - 1)}{A \phi (L - 0)} \\
 &= s_{w2} + \frac{q_i t (1 - f_{w2})}{A \phi L}
 \end{aligned}$$

$$\frac{q_i t}{A \phi L} = \frac{\text{总注水量}}{\text{地层孔隙体积}} = \text{无因次注入倍数} = Q_n$$

$$\overline{s_w} = s_{w2} + Q_n (1 - f_{w2})$$

$$\overline{s_w} = s_{w2} + \frac{(1 - f_{w2})}{f'_{w2}}$$

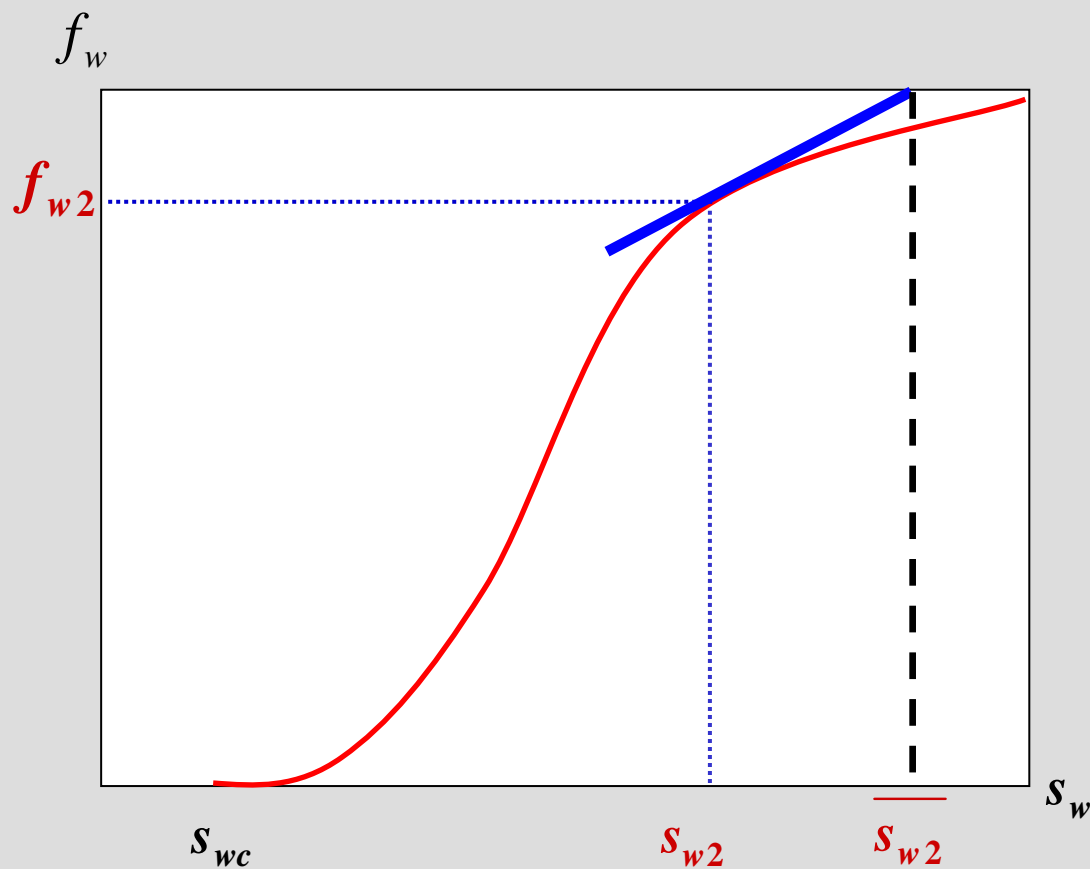
## 平均含水饱和度

$$\overline{s_w} = s_{w2} + \frac{(1 - f_{w2})}{f'_{w2}}$$

## 含水率一阶导数

$$f'_{w2} = \frac{\overline{s_w} - s_{w2}}{1 - f_{w2}}$$

一阶导数是过 $s_{w2}$ 、 $f_{w2}$ 点的切线



$$N_p = \phi AL (\overline{s_w} - s_{wc})$$

$$W_i = Q_i \times t = \phi AL \times Q_n = \phi AL / f'_{sw2}$$

$$R = \frac{N_p}{N} = \frac{\phi AL (\overline{s_w} - s_{wc})}{\phi AL (1 - s_{wc})} = \frac{(\overline{s_w} - s_{wc})}{(1 - s_{wc})}$$

对应任意出口端饱和度的时间：

$$t = \frac{W_i}{Q_i} = \frac{W_i}{\phi AL} \frac{\phi AL}{Q_i} = \frac{\phi AL}{f'_{sw2}} / Q_i$$



## 计算恒速注水动态的步骤——见水前

- 1、用油水相渗曲线和油水粘度比计算分流量曲线
- 2、利用图解法，计算前缘含水饱和度以及平均含水饱和度
- 3、计算含水上升率曲线
- 4、计算见水前的注水速度、产油速度、含水率
- 5、将地层长度等分，计算对应任意前缘位置时的累积产油量、累积注水量、采出程度
- 6、计算任意前缘下的时间
- 7、计算见水时刻以及相应的参数



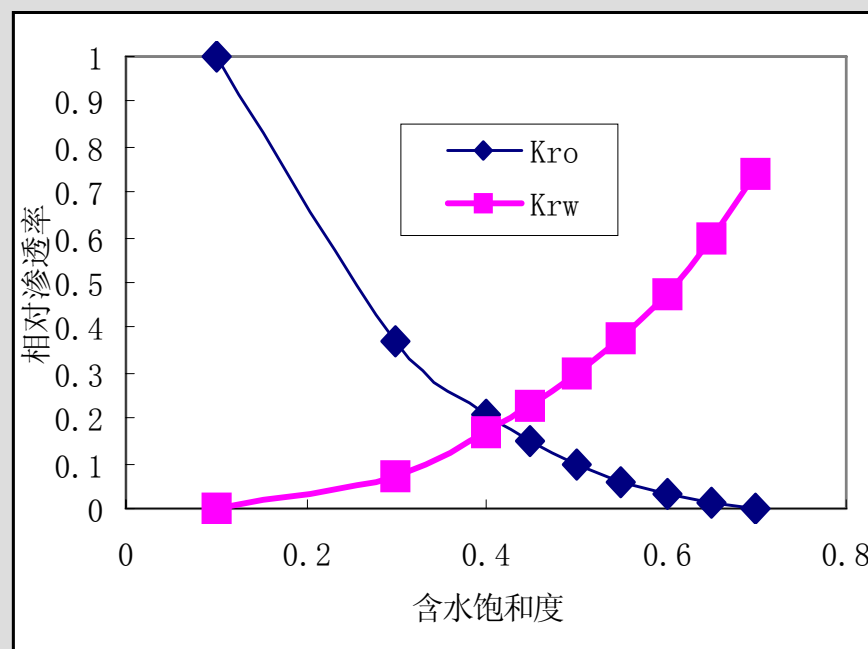
# 计算恒速注水动态的步骤——见水后

- 1、将前缘含水饱和度到最大含水饱和度分段
- 2、计算每段出口端含水饱和度下对应的平均含水饱和度，该饱和度下的含水率，含水率的导数，无因次注入倍数
- 3、计算对应出口端饱和度下的产油量、产水量、
- 4、计算对应出口端饱和度下的累积产油量、累积注水量、累积产水量、
- 5、计算对应出口端含水饱和度下对应的时间
- 6、将计算结果整理，绘制相应的图表

# 恒速注水实例：

油水粘度比  $\mu_o/\mu_w$  为 2

Sw	Kro	Krw
0.10	1.000	0.000
0.30	0.373	0.070
0.40	0.210	0.169
0.45	0.148	0.226
0.50	0.100	0.300
0.55	0.061	0.376
0.60	0.033	0.476
0.65	0.012	0.600
0.70	0.000	0.740

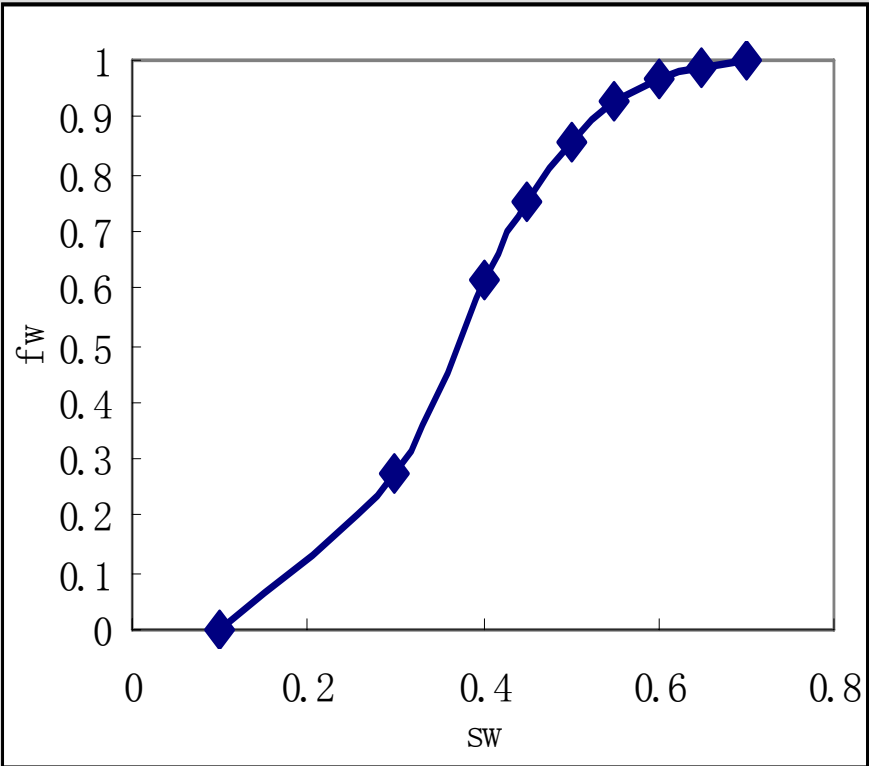


计算见水前后的油藏生产动态

分流量曲线计算表

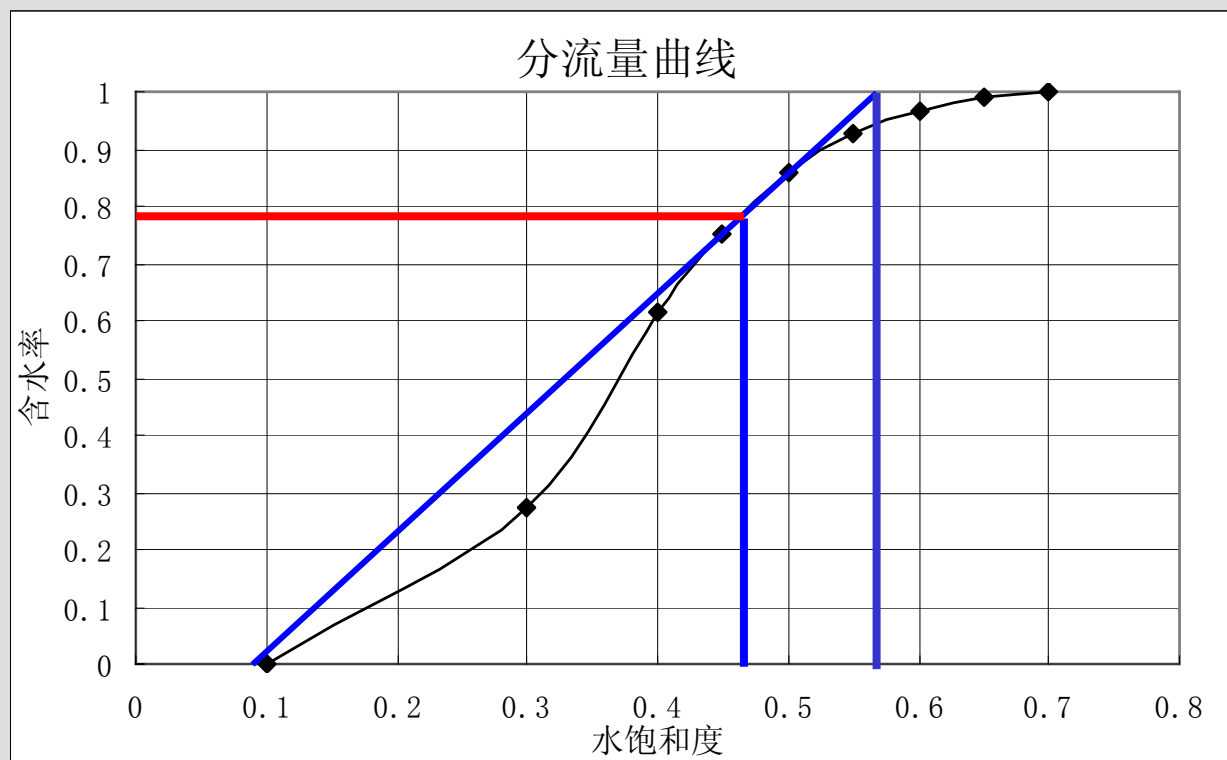
$$f_w = \frac{k_{rw}(S_w) / \mu_w}{k_{rw}(S_w) / \mu_w + k_{ro}(S_w) / \mu_o}$$

Sw	Kro	Krw	fw
0.100	1.000	0.000	0
0.300	0.373	0.070	0.2729
0.400	0.210	0.169	0.61679
0.450	0.148	0.226	0.75333
0.500	0.100	0.300	0.85714
0.550	0.061	0.376	0.92497
0.600	0.033	0.476	0.9665
0.650	0.012	0.600	0.9901
0.700	0.000	0.740	1

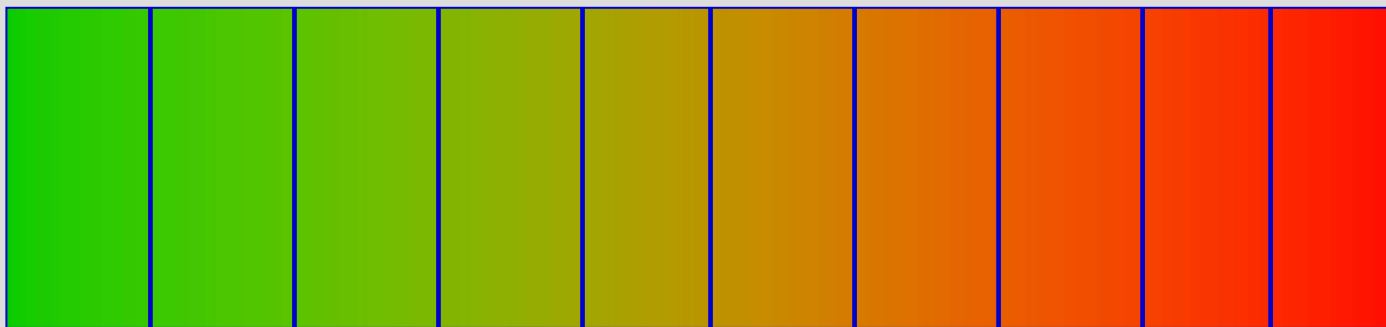


确定见水时前沿含水饱和度 $S_f$

油水两相区的平均含水饱和度



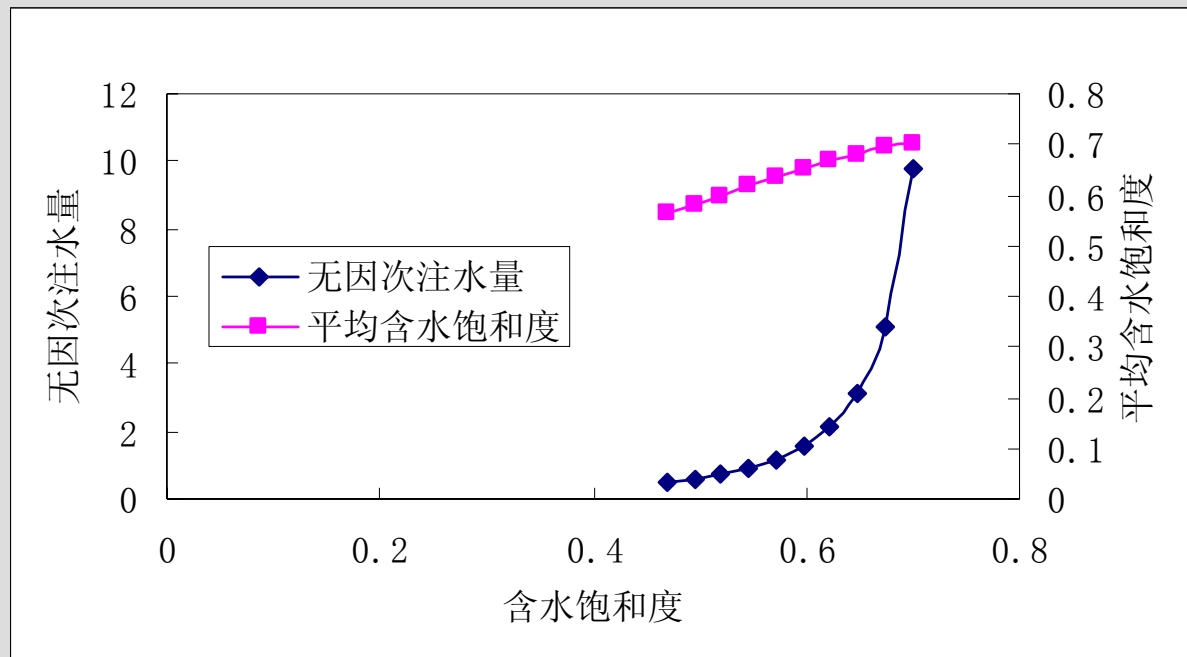
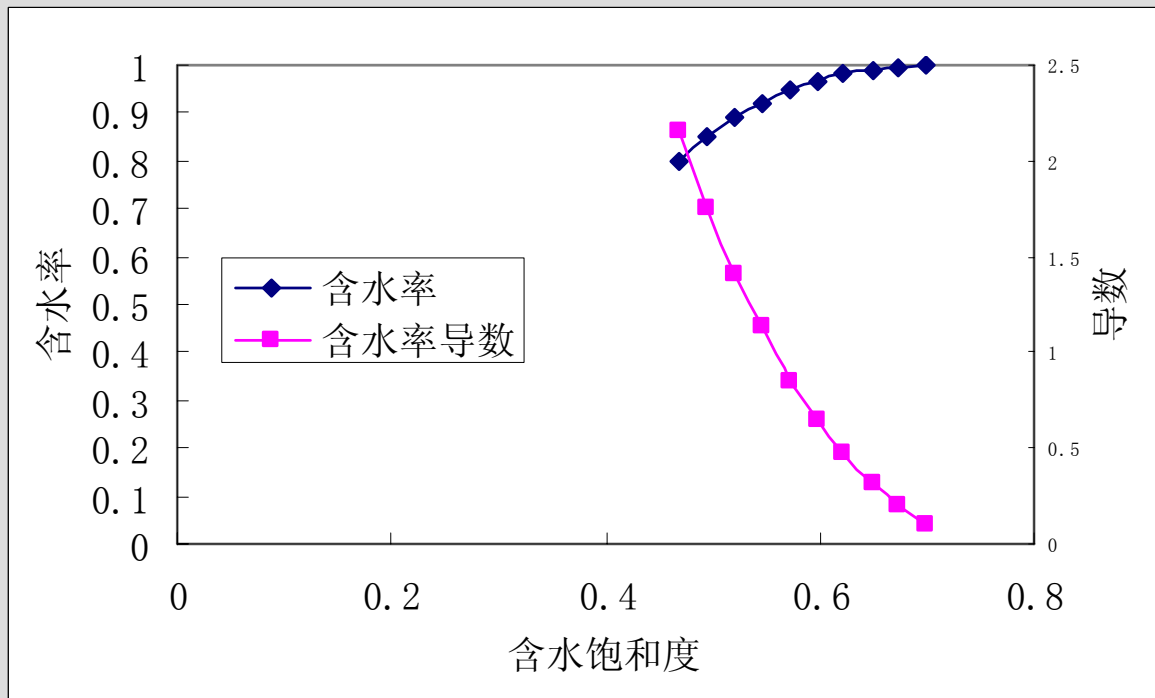
$$S_f = 0.469 \quad \bar{S} = 0.563$$




计算对应每段长度下的生产参数，以及见水时刻  
无水采收率，见水时间。

见水后，出口端饱和度不断上升，可以适当减小步长，增加计算点

出口端含水饱和度	含水率	含水率导数	无因次注水量	平均含水饱和度
0.469	0.798	2.16	0.463	0.563
0.495	0.848	1.75	0.572	0.582
0.52	0.888	1.41	0.711	0.6
0.546	0.920	1.13	0.887	0.617
0.572	0.946	0.851	1.176	0.636
0.597	0.965	0.649	1.54	0.652
0.622	0.980	0.477	2.1	0.666
0.649	0.990	0.317	3.16	0.681
0.674	0.996	0.195	5.13	0.694
0.7	1	0.102	9.8	0.7



- 1 分流量方程
- 2 恒速注水开发指标计算
- 3 恒压注水开发指标计算 
- 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
- 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
- 6 前缘推进方程解的局限性



### 3 恒压注水动态预测



一维地层

已知:  $L; \phi; A; \mu_o; \mu_w; k_{ro}; k_{rw}$

生产压差恒定  $\Delta p$  , 刚性驱替, 地层水平,

求注水动

态. 不考虑重力和毛管力。

1) 见水前: 产量, 含水, 累积产油量, 累积注水量、采出程度等指标随时间的变化规律?

2) 见水后: 产液量、含水率、产油量、平均含水饱和度, 累积产油量、累积产水量、采出程度、累积注水量等指标随时间的变化?

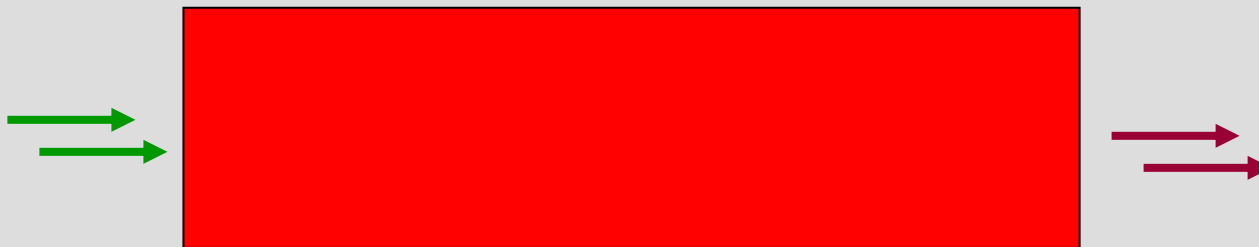
分三步求解动态：

初始时刻的产量 

注水没有突破时的动态：

见水以后的动态：

初始时刻的产量:



$$Q_0 = \frac{k_o A}{\mu_o} \frac{\Delta P}{L} = \frac{K k_{ro} (S_{wc}) A (P_i - P_p)}{\mu_o L}$$

分三步求解动态：

初始时刻的产量

注水没有突破时的动态： ←

见水以后的动态：



见水之前:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{对于油相: } q_o = -\frac{k k_{ro} A}{\mu_o} \left( \frac{dP}{dx} \right) \\ \text{对于水相: } q_w = -\frac{k k_{rw} A}{\mu_w} \left( \frac{dP}{dx} \right) \end{array} \right.$$

$$\text{总液量: } q_t = -\left( \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right) k A \left( \frac{dP}{dx} \right)$$

$$q_t = -\lambda_r k A \left( \frac{dP}{dx} \right)$$

$$\lambda_r = \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w}$$

总相对流度

$$q_t = -\lambda_r k A \left( \frac{dP}{dx} \right) \qquad \frac{1}{\lambda_r} q_t dx = -k A dP$$

积分上下限:  $x=0$  ;  $p=p_i$

$x=L$  ;  $p=p_p$

$$\int_0^L \frac{1}{\lambda_r} q_t dx = -k A \int_{P_i}^{P_p} dP$$

$$q_t = \frac{k A (P_i - P_p)}{\int_0^L \frac{1}{\lambda_r} dx} = \frac{k A (P_i - P_p)}{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}$$

注意:  $\lambda_r \sim k_{ro} k_{rw} \sim S_w \sim x$

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}{\int_0^L dx} = \frac{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}{L}$$

$$\int_0^L \lambda_r^{-1} dx = \overline{\lambda_r^{-1}} L$$

$\overline{\lambda_r^{-1}}$  : 平均视粘度(流度)

$$q_t = \frac{kA(P_i - P_p)}{\int_0^L \frac{1}{\lambda_r} dx} = \frac{kA(P_i - P_p)}{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}$$

$$q_t = \frac{kA(p_i - p_p)}{\overline{\lambda_r^{-1}} L}$$

对于见水前，地层由油水两相区和未波及区组成

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}{\int_0^L dx} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx + \int_{x_f}^L \lambda_r^{-1} dx}{\int_0^{x_f} dx + \int_{x_f}^L dx} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx + \lambda_r^{-1} (L - x_f)}{L}$$

纯油区中  
 $S_{wc}$ 是常数

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx + \lambda_r^{-1}(L - x_f)}{L} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx}{L} + \frac{\lambda_{ro}^{-1}(L - x_f)}{L}$$

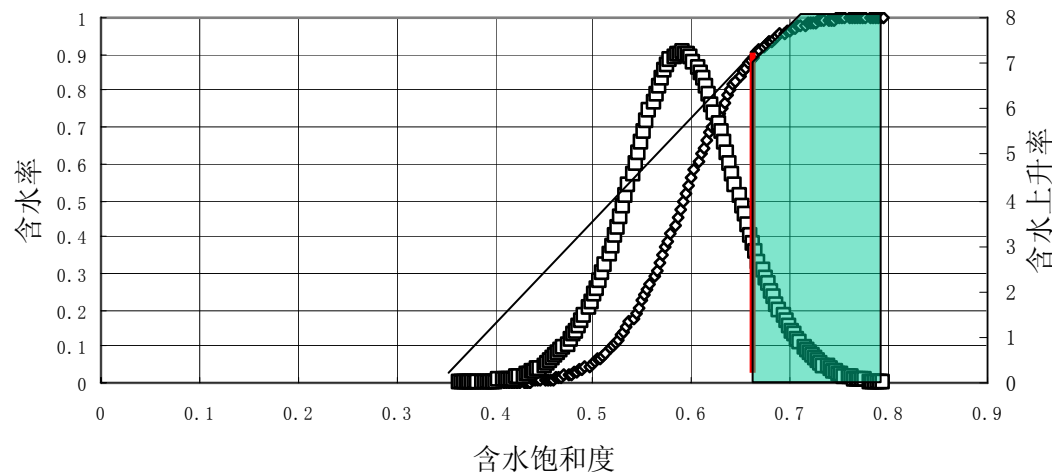
$$x_f = \frac{f'_{swf}}{\phi A} \int_0^t q_t dt = L \times \frac{f'_{swf}}{\phi A L} \int_0^t q_t dt = L Q_i f'_{swf}$$

$$\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx = \int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} L Q_i df'_{sw}$$

$$\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} L Q_i df'_{sw} = \int_{f'_{sw \max}}^{f'_{swf}} \lambda_r^{-1} L Q_i df'_{sw} = L Q_i \int_{f'_{sw \max}}^{f'_{swf}} \lambda_r^{-1} df'_{sw}$$



分流量曲线



$$\int_{f'_{sw \max}}^{f'_{swf}} \lambda_r^{-1} df'_{sw} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\lambda_r^{-1})_i + (\lambda_r^{-1})_{i+1}}{2} \times [(f'_{sw})_i - (f'_{sw})_{i+1}]$$

数值积分 是一个常数

也可以将从注入端到前缘的距离内的有效粘度进行平均，得到见水前油水两相区的平均视粘度

$$\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx = L Q_n \int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} df_{sw}$$

$$\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx = x_f \times \overline{\lambda_{swf}^{-1}}$$

总平均视粘度  $\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx + \lambda_r^{-1}(L - x_f)}{L} = \frac{\int_0^{x_f} \lambda_r^{-1} dx}{L} + \frac{\lambda_{ro}^{-1}(L - x_f)}{L}$

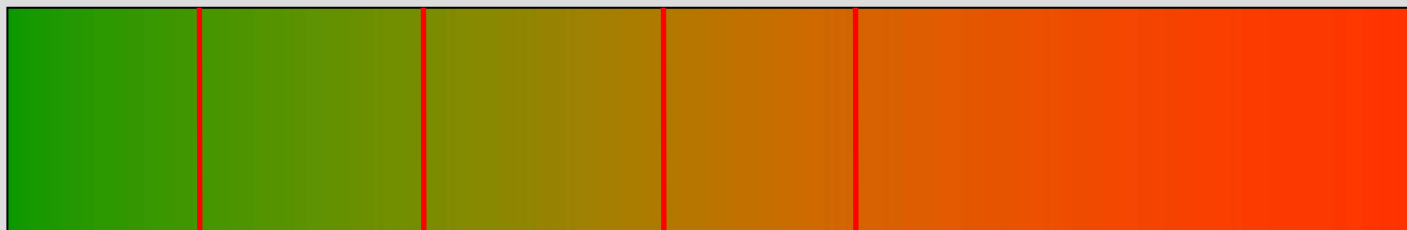
总平均视粘度  $\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{x_f \times \overline{\lambda_{swf}^{-1}}}{L} + \frac{\lambda_{ro}^{-1}(L - x_f)}{L}$

$x_f = L Q_i f'_{swf}$   $\overline{\lambda_r^{-1}} = \overline{\lambda_{swf}^{-1}} \frac{x_f}{L} + \lambda_{ro}^{-1} - \lambda_{ro}^{-1} \frac{x_f}{L}$

总平均视粘度

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \lambda_{ro}^{-1} + \left( \overline{\lambda_{swf}^{-1}} - \lambda_{ro}^{-1} \right) Q_i f'_{swf}$$

如何计算见水前，油水前缘在任意位置时的产量、累积产量、采出程度、运移时间等参数？



总平均视粘度  $\overline{\lambda_r^{-1}} = \overline{\lambda_{ro}^{-1}} + \left( \overline{\lambda_{swf}^{-1}} - \overline{\lambda_{ro}^{-1}} \right) Q_i f'_{swf}$

计算该前缘下的产油量。

此时的产量即等于注水速度。

$$q_t = \frac{kA(p_i - p_p)}{\overline{\lambda_r^{-1}} L}$$

如何计算前缘推到 $x_f$ 处需要的时间？

相邻的两个间隔内的产量是不断变化的，采用近似的求解方法。



从开始注水到计算的第一个距离间隔，可以计算两个端点的产量，以及这个距离间隔内的累积产量。

$$q_0 \rightarrow q_1 \quad 0 \rightarrow N_p \quad t_1 = t_0 + \frac{N_{p1} - N_{p0}}{(q_0 + q_1)/2}$$

$$t_2 = t_1 + \frac{N_{p2} - N_{p1}}{(q_2 + q_1)/2} \dots$$

也可以采用教材上的求法：

$$Q_i^n = \frac{\int_0^{t_n} q_t dt}{V_p} \quad Q_i^{n+1} = \frac{\int_0^{t_{n+1}} q_t dt}{V_p}$$

$$Q_i^{n+1} - Q_i^n = \frac{1}{V_p} \int_{t_n}^{t_{n+1}} q_t dt$$

$$t_{n+1} = t_n + \frac{2(Q_i^{n+1} - Q_i^n)V_p}{q_t^{n+1} + q_t^n}$$

分三步求解动态：

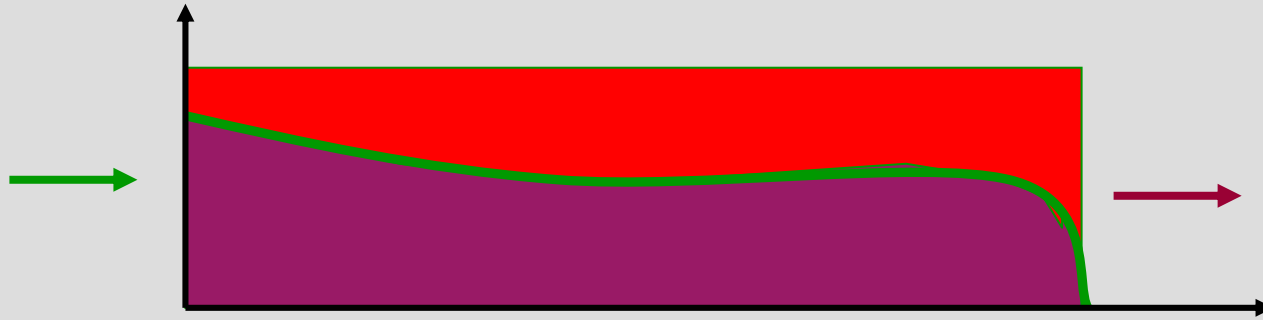
初始时刻的产量

注水没有突破时的动态：

见水以后的动态： ←



## 见水后动态



见水后，产液量、含水率、产量、平均含水饱和度，累积产油量，采出程度随时间的变化？

即对应出口端的任意含水饱和度下的油藏动态。

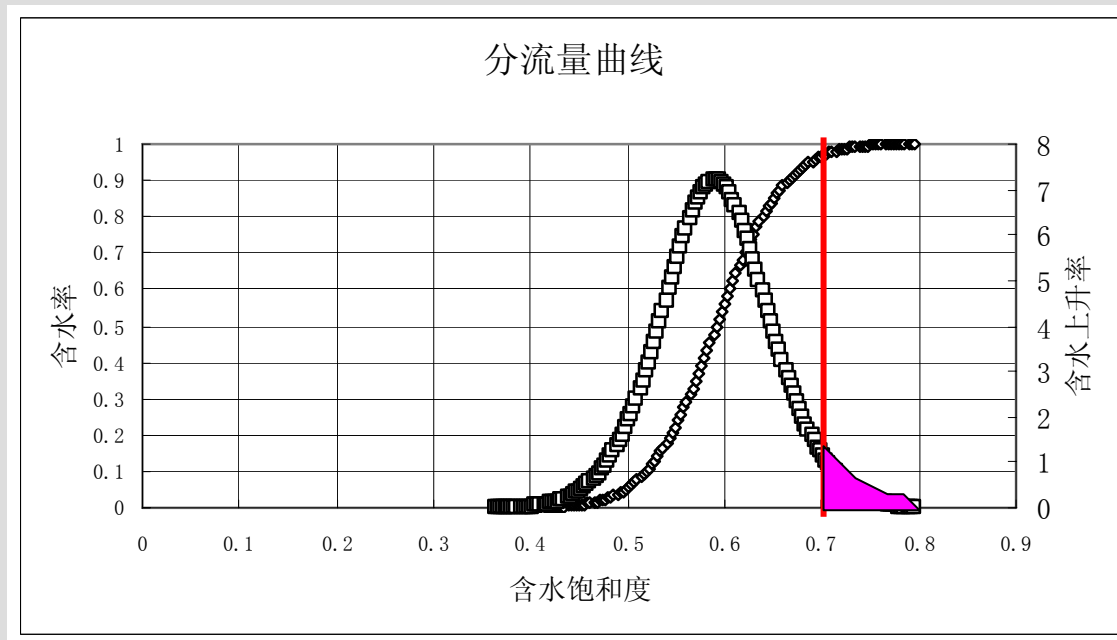
关键还是求解地层中平均油水视粘度，比见水前简单

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx}{\int_0^L dx} \quad \rightarrow \quad \overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_{f'_{sw \max}}^{f'_{sw 2}} L Q_n \lambda_r^{-1} df'_w}{L} = \int_0^{f'_{sw 2}} Q_n \lambda_r^{-1} df'_w$$

在出口端利用B—L方程：

$$L = \frac{f_{w2}'}{\phi A} \int_0^t q_t dt \rightarrow f_{w2}' = \frac{1}{Q_i}$$

$$\overline{\lambda_r^{-1}} = \frac{\int_0^{f_{sw2}'} L Q_i \lambda_r^{-1} df_w'}{L} = \frac{\int_0^{f_{sw2}'} Q_i \lambda_r^{-1} df_w'}{f_{sw2}'}$$



该积分是一变化的值。

## 计算出口端任意饱和度下的动态

- ◆ 计算该饱和度下对应的产液量；
- ◆ 计算对应该出口端饱和度下的地层平均含水饱和度、计算累积产油量、采出程度；
- ◆ 累积注水量利用无因次注入倍数求得，进而求出累积产水量；
- ◆ 计算对应的出口端饱和度的时间：

$$t_{n+1} = t_n + \frac{2(Q_i^{n+1} - Q_i^n)V_p}{q_t^{n+1} + q_t^n}$$



## 恒压注水动态预测步骤——见水前

- 1、计算初始产油量，即初始注水量；
- 2、计算分流量曲线和导数曲线；
- 3、计算从最大含水饱和度到前缘含水饱和度视粘度各个点的积分，积分函数为视粘度，积分变量为含水上升率；
- 4、等分一维地层，计算第一段时的累积产油量、累积注水量、累积产液量、采出程度；
- 5、计算第一段时的无因次注入倍数，计算平均视粘度，计算产油量，注水速度，产液速度；
- 6、计算对应第一阶段的开发时间；
- 7、重复以上步骤，直到出口端面，计算见水时间，累积产量、采出程度。

## 恒压注水动态预测步骤——见水后

- 8、从前缘饱和度到最大水饱和度等分，计算对应端的积分。  
此时积分的上限是出口端下的含水上升率，是一随开发过程的变值。
- 9、计算对应出口端饱和度下的平均视粘度；
- 10、计算该饱和度下的产液速度，产油速度，产水速度，注水速度，含水率；
- 11、计算对应饱和度下的累积产油量，采出程度；
- 12、利用B-L方程求无因次注入倍数，确定累积注水量，累积产水量；
- 13、计算对应饱和度端面的开发时间；
- 14、重复9-13步骤，直到出口端的含水达到98%。
- 15、整理计算结果，绘制相应的图表。

**实例分析某油藏**宽**91.44 m**，厚**6.1m**，长**304.6m**。油藏水平， $\phi$ : **0.15**， $k$ : **200毫达西**， $S_{wi}$ : **0.363**， $S_{or}$ : **0.205**，地下 $\mu_o$ : **2.0mPa.s**， $\mu_w$ : **1.0mPa.s**。油藏分别在两端进行注水和采油，**生产压差3.448 MPa**，**计算注水开发动态。**

取值:  $a_1=1.0$ ;  $a_2=0.78$ ;  $m=2.56$ ;  $n=3.72$

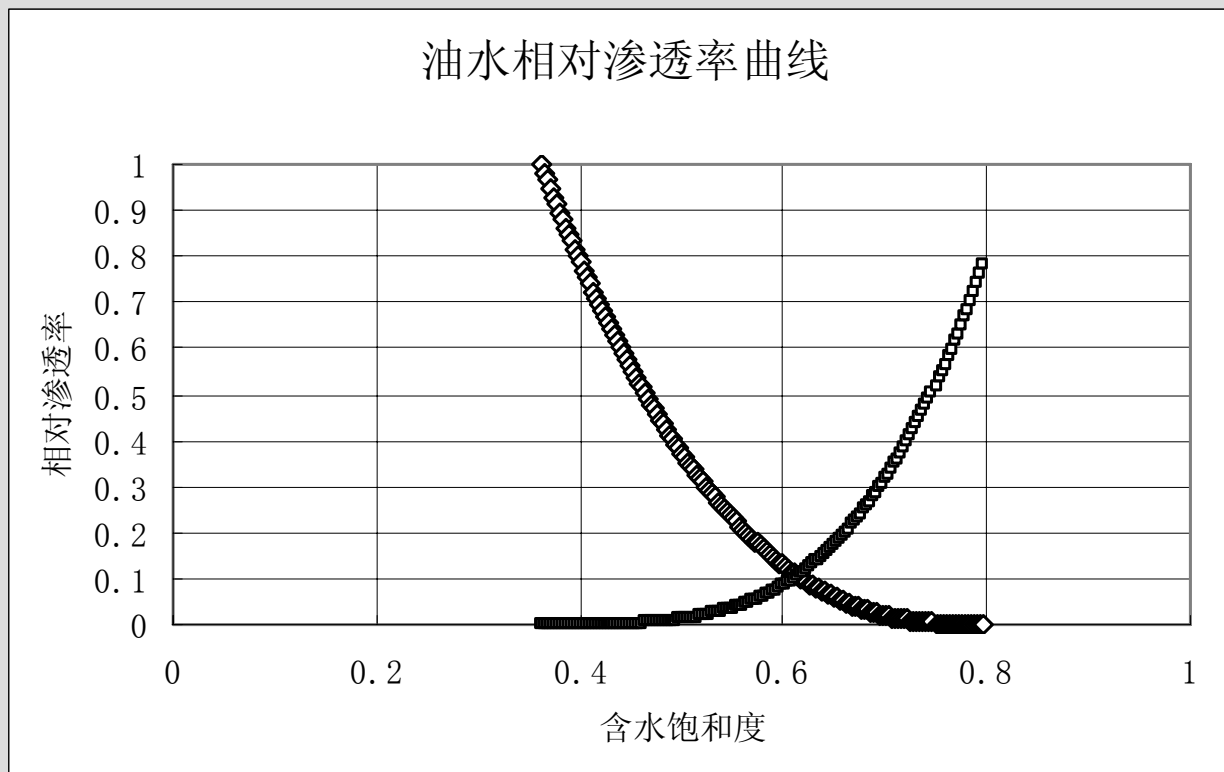
相渗曲线及相关参数解析方法计算:

$$\begin{cases} k_{ro} = a_1(1 - S_{wD})^m \\ k_{rw} = a_2 S_{wD}^n \end{cases} \quad S_{wD} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}}$$

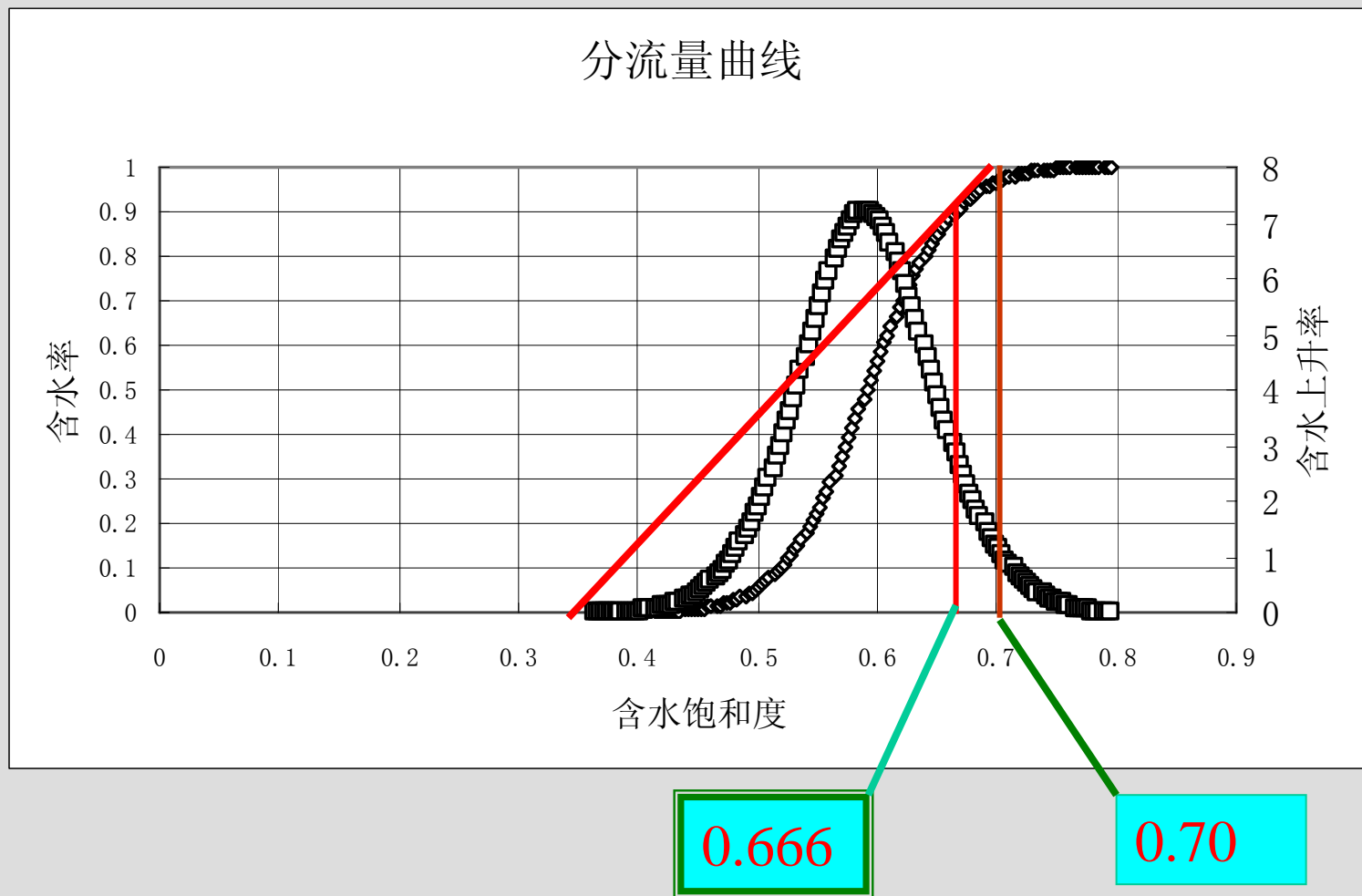
$$\begin{cases} f_w = \frac{S_{wD}^n}{S_{wD}^n + A(1 - S_{wD})^m} \\ \frac{\partial f_w}{\partial S_w} = \frac{AB[nS_{wD}^{n-1}(1 - S_{wD})^m + mS_{wD}^n(1 - S_{wD})^{m-1}]}{[S_{wD}^n + A(1 - S_{wD})^m]^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = \frac{a_1 \mu_w}{a_2 \mu_o} \\ B = \frac{1}{1 - S_{or} - S_{wc}} \end{cases}$$

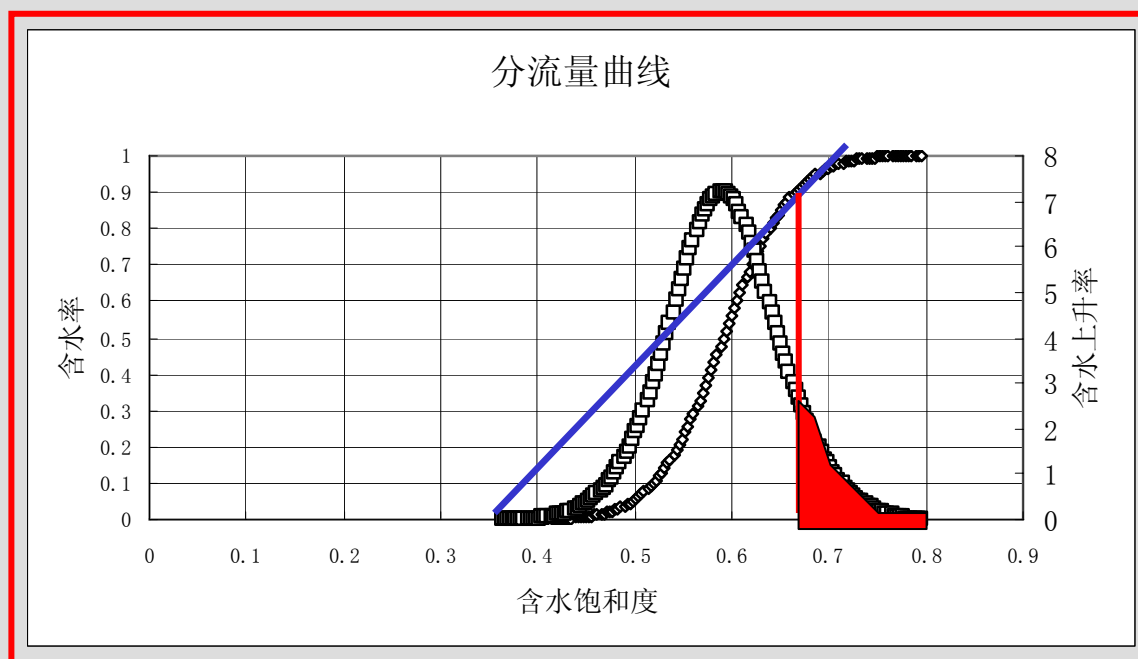
# 求相关参数——计算相对渗透率曲线



# 求相关参数——计算含水率、含水率导数曲线

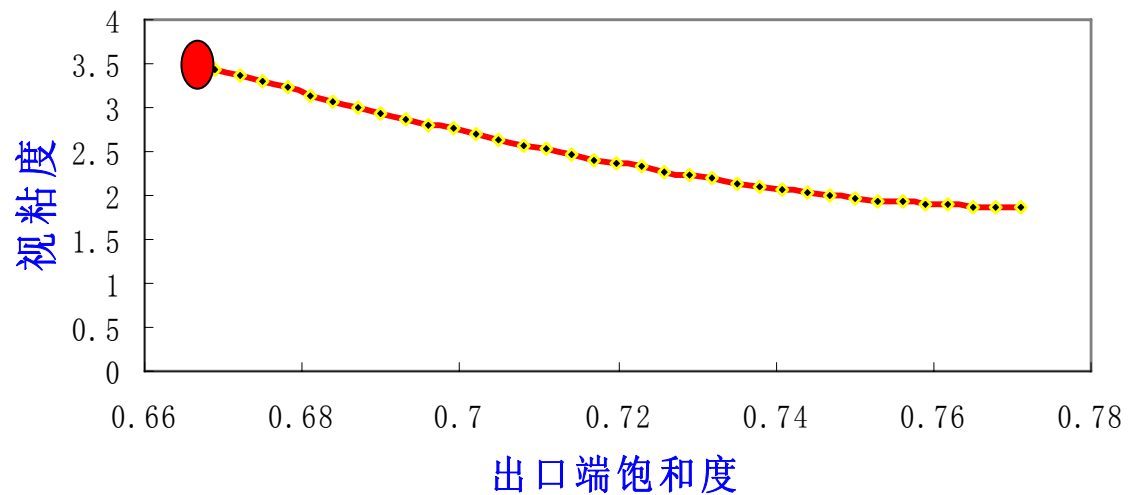


# 计算基本曲线

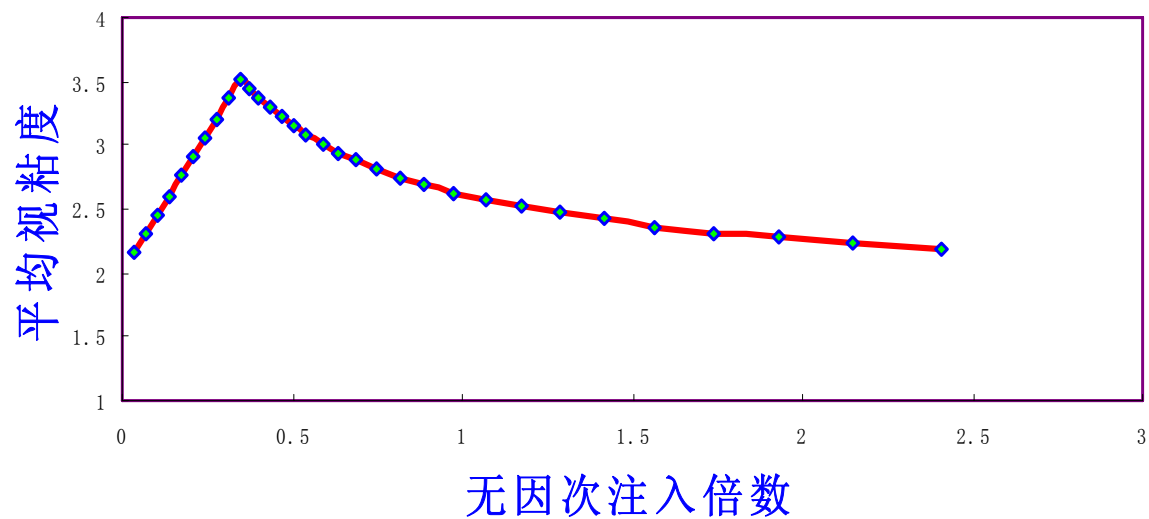


计算此时积分的同时，也得到了见水后不同出口端饱和度下平均视粘度的积分值。

不同出口端饱和度下对应的地层流体视粘度



无因次注入倍数与平均视粘度的关系



计算从最大含水饱和度 ( $1-S_{OR}-S_{IW}$ ) 到前沿含水饱和度 ( $S_{WF}$ ) 下，关于视粘度的积分，是一定值。已经完成

将地层见水前分成10等份（距离），求各等份位置的无因次注入倍数，计算油水前沿到达各等份距离时的视粘度，是关于无因次注入倍数的线性表达式。

根据不同等份位置时的视粘度，计算各时刻的产量；

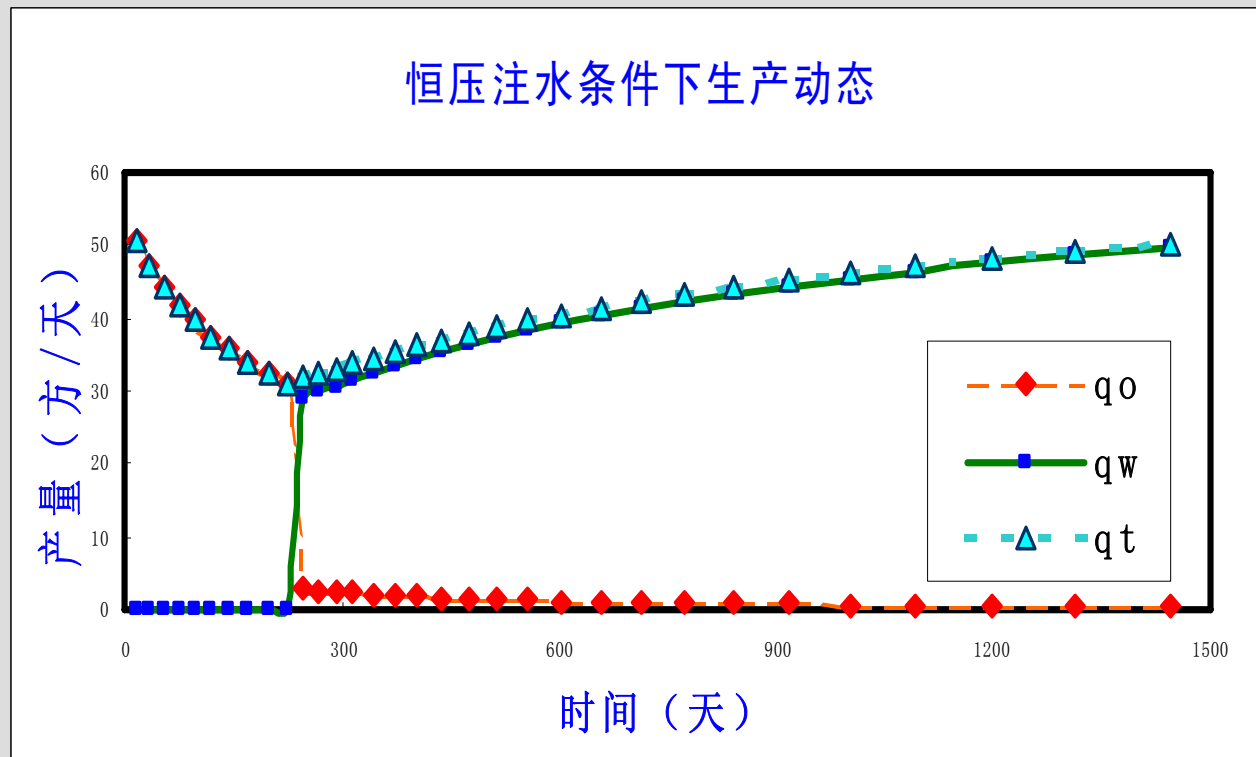
顺序计算油水前沿到达各等份位置时的时间。



将 $S_{wf} \sim 1 - S_{Or} - S_{iw}$ 按0.003的间隔划分，并计算不同的出口端含水饱和度下地层的视粘度；

计算不同的出口端含水饱和度下的产液量,产油量,产水量,含水率,累积产油量,注水量,产水量；

计算不同的出口端含水饱和度下所对应的开发时间



time	qo	qw	qt	fw	qi	R
17	50.72	0	50.72	0	0.035	0.035
35.3	47.4	0	47.4	0	0.07	0.07
54.9	44.48	0	44.48	0	0.106	0.106
75.6	41.9	0	41.9	0	0.141	0.141
97.7	39.6	0	39.6	0	0.176	0.176
120.9	37.54	0	37.54	0	0.211	0.211
145.4	35.69	0	35.69	0	0.246	0.246
171.2	34.01	0	34.01	0	0.282	0.282
198.2	32.48	0	32.48	0	0.317	0.317
226.4	31.08	0	31.08	0	0.352	0.352
246.4	2.85	28.9	31.75	0.91	0.377	0.365
268	2.66	29.78	32.44	0.918	0.404	0.368
291.2	2.48	30.68	33.16	0.925	0.434	0.37
316.2	2.31	31.58	33.9	0.932	0.467	0.372
343.2	2.15	32.51	34.66	0.938	0.503	0.375
372.2	2	33.44	35.44	0.944	0.543	0.377
403.7	1.85	34.39	36.24	0.949	0.587	0.38
437.6	1.71	35.36	37.06	0.954	0.636	0.382
474.4	1.58	36.33	37.9	0.958	0.69	0.384
514.4	1.45	37.31	38.76	0.963	0.75	0.387
557.8	1.33	38.31	39.64	0.966	0.817	0.389
605	1.22	39.31	40.53	0.97	0.891	0.391
656.6	1.11	40.32	41.43	0.973	0.974	0.394
713	1.01	41.34	42.35	0.976	1.067	0.396
775	0.92	42.36	43.28	0.979	1.171	0.398
843.1	0.83	43.39	44.22	0.981	1.288	0.401
918.2	0.75	44.42	45.16	0.983	1.42	0.403
1001.4	0.67	45.45	46.11	0.985	1.569	0.405
1094	0.6	46.47	47.07	0.987	1.738	0.408
1197.3	0.53	47.5	48.03	0.989	1.931	0.41
1313.2	0.47	48.51	48.98	0.99	2.151	0.412
1443.8	0.41	49.52	49.93	0.992	2.405	0.415

- 1 分流量方程
- 2 恒速注水开发指标计算
- 3 恒压注水开发指标计算
- 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
- 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
- 6 前缘推进方程解的局限性

## 4 前缘推进方程的恒速与恒压解的关系

{	恒速注水速度、产液速度	生产压差改变
	恒压——生产压差	产液量在改变

地层中油水的流动、分布规律与生产控制条件无关，在相同的前缘饱和度下，流体分布是相同的。且都符合下述规律：

$$x = \frac{f_w'}{\phi A} \int_0^t q_t dt = L Q_n f_w'$$

产量和压差之间都符合下述的规律：

$$q_t = \frac{kA(p_i - p_p)}{\int_0^L \lambda_r^{-1} dx} = \frac{kA(p_i - p_p)}{\lambda_r^{-1} L}$$

生产压差、产液量、两者之间可以相互控制。

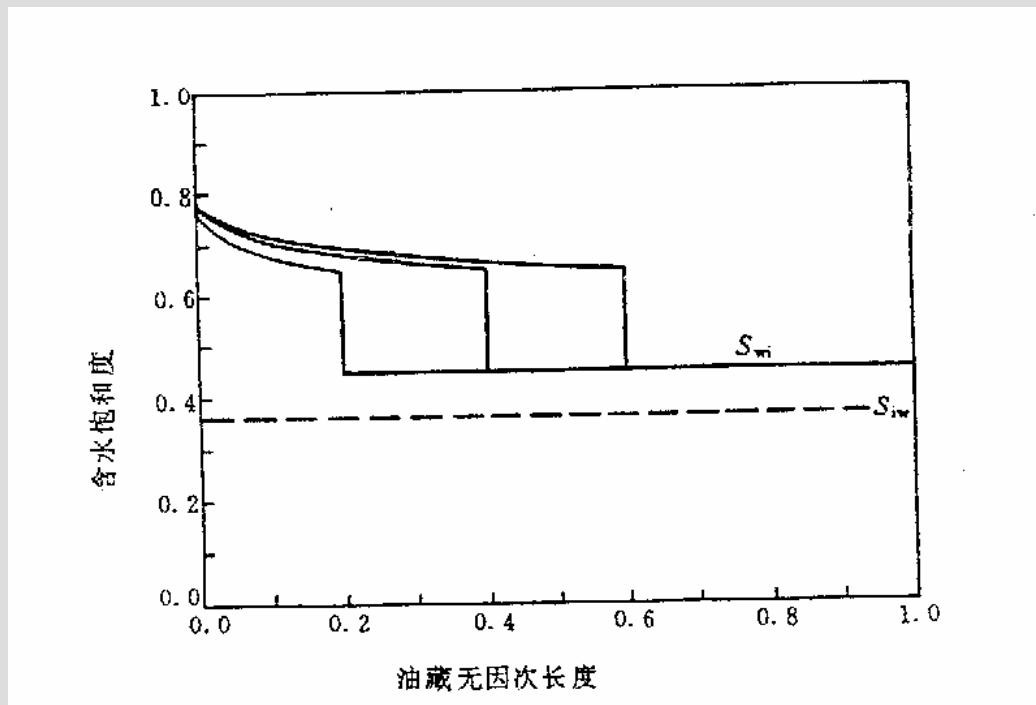
- 1 分流量方程
- 2 恒速注水开发指标计算
- 3 恒压注水开发指标计算
- 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
- 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
- 6 前缘推进方程解的局限性

## 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态

如果在初始的情况下，含水饱和度大于束缚水饱和度，进行注水开发，油藏的动态如何变化？

无论恒速还是恒压注水，都应求解前缘饱和度和平均饱和度

关键是求解在该初始饱和度下的前缘含水饱和度，以及前缘饱和度下的平均含水饱和度？注入水见水以后的动态求法相同。



$$q_o = q_t \times (1 - f_{wi})$$

$$q_w = q_t \times f_{wi}$$

$$\int_0^t q_t dt = \int_0^t q_t \times f_{wi} dt + \int_0^L (S_w - S_{wi}) \phi A dx$$

$$\frac{\int_0^t q_t dt}{\phi AL} = \frac{\int_0^t q_t \times f_{wi} dt}{\phi AL} + \frac{\int_0^L (S_w - S_{wi}) \phi A dx}{\phi AL}$$

$$Q_n = f_{wi} \times Q_n + \frac{\int_0^L (S_w - S_{wi}) \phi A dx}{\phi AL}$$



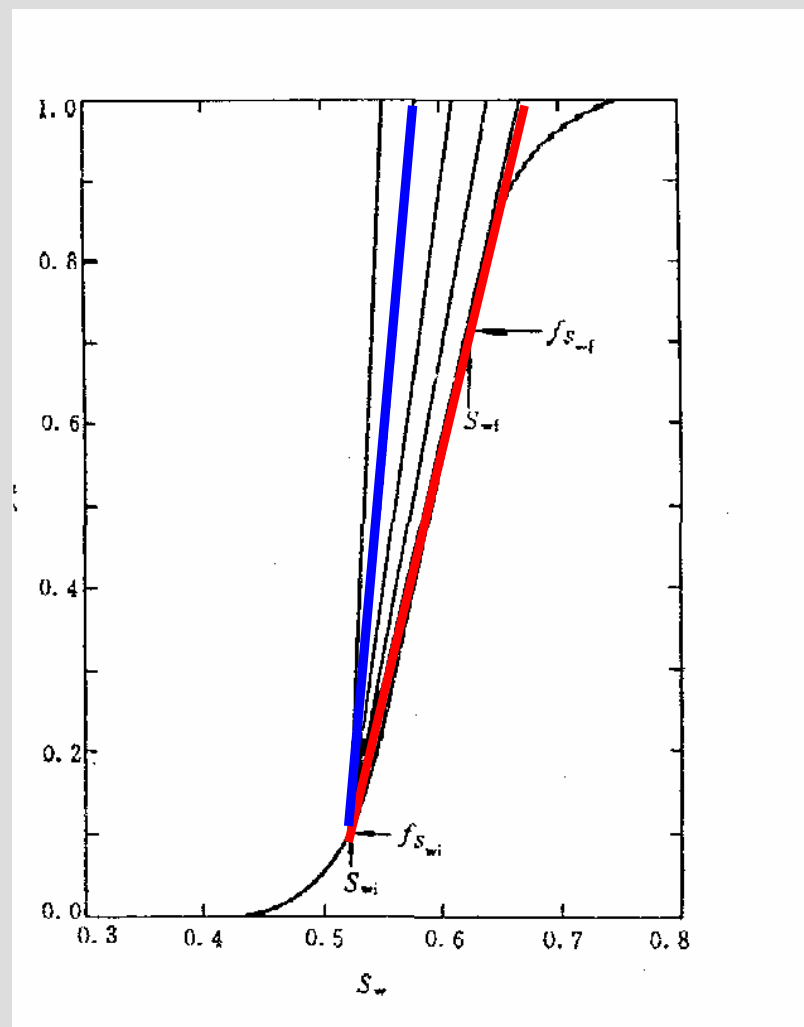
$$\frac{1}{Q_n} = \frac{1 - f_{wi}}{\overline{S_w} - S_{wi}}$$



$$\overline{S_w} = S_{wi} + (1 - f_{wi}) Q_n$$

$$\frac{1}{Q_n} = \frac{1 - f_{wi}}{S_w - S_{wi}}$$

◆以初始水饱和度点作  
斜率(注入倍数导数)  
不同的直线, 得到平  
均含水饱和度



- ◆得到平均含水饱和度后, 即可求解相应的其他参数
- ◆见水以后的平均饱和度求法, 同以前的方法



- 1 分流量方程
  - 2 恒速注水开发指标计算
  - 3 恒压注水开发指标计算
  - 4 前缘推进方程的恒速与恒压关系
  - 5 具有可流动初始饱和度下的水驱动态
  - 6 前缘推进方程解的局限性
-

任何理论的求解方法都有一定的局限性，不同的是与实际的接近程度不同。

- 1 模型的假设条件苛刻，地层均质、流体分布均质、流动方向均质，不能考虑非均质性的影响。
- 2 刚性驱替。
- 3 单采单注模型。
- 4 没有考虑重力和毛管力的影响。
- 5 是岩心模型，但是对毛细管末端效应没有考虑。

简单计算油藏注水开发指标


# 需要掌握的内容

- 1) 分流量方程，推倒，影响因素，应用。
- 2) 含水上升率，平均视粘度的概念。
- 3) 掌握恒速注水动态的求解。
- 4) 掌握恒压注水动态的求解。
- 5) 能够求解基本的开发指标（特殊点）。
- 6) 了解初始水饱和度高于束缚水情况下的动态求解。
- 7) 掌握前缘方程的局限性。
- 8) 分流量、驱替、稳定不稳定、混相、含水率、含水上升率、视粘度、平均视粘度、无水采油期、无水采收率。

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

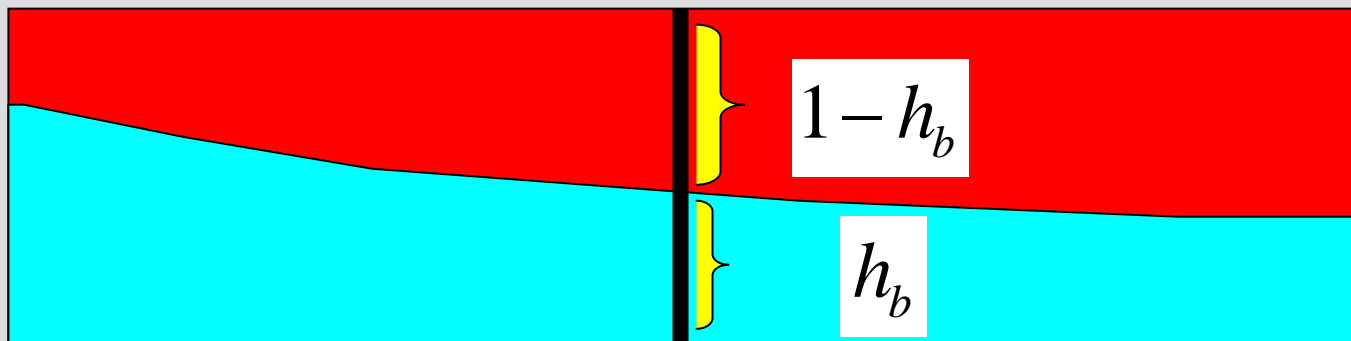
- 1 一维不稳定驱替
- 2 重力分异情况下的驱替
- 3 底水锥进动态
- 4 面积注水开发指标计算
- 5 剩余油饱和度及其流动性
- 6 改善注水开发效果的水动力学方法

## 本节的主要内容

- 1 水平油藏的重力分异 
- 2 倾斜油藏的重力分异
- 3 重力分异流动时的相对渗透率
- 4 多层油藏动态计算

本部分考虑的内容是只有重力情况下的垂向平衡，暂时不考虑毛细力的影响。

?



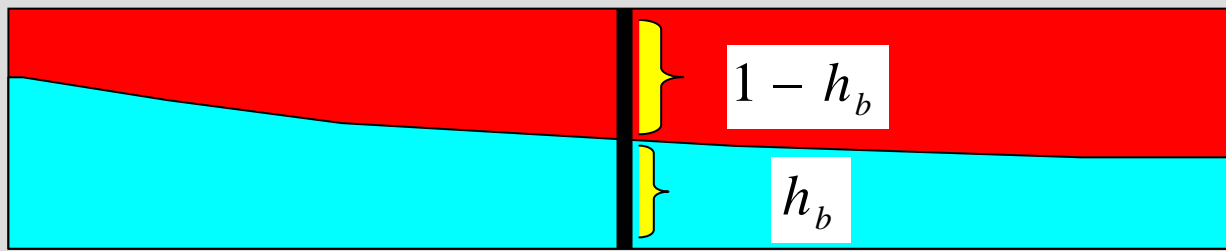
整个界面上的饱和度变化是一个跳跃变化，在重力作用下处于垂向平衡。

在任一剖面上，其有关物性参数可按厚度加权平均。

$$S_{w2} = h_b (1 - S_{or}) + (1 - h_b) S_{wc}$$

$$k_{roz} = (1 - h_b) k'_{ro} \quad k_{rwz} = h_b k'_{rw}$$

$$q_o = - \frac{K k_{roz} A}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial x} \quad q_w = - \frac{K k_{rwz} A}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x}$$



$$S_{w2} = h_b (1 - S_{or}) + (1 - h_b) S_{wc} \quad k_{roz} = (1 - h_b) k'_{ro} \quad k_{rwz} = h_b k'_{rw}$$

$$q_o = - \frac{K k_{roz} A}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial x} \quad q_w = - \frac{K k_{rwz} A}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$f_{wz} = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} = \frac{k_{rwz} / \mu_w}{k_{rwz} / \mu_w + k_{roz} / \mu_o} \quad \text{令 } M' = \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o} \quad \text{端点流度比}$$

$$f_{wz} = \frac{\frac{k_{rwz} / \mu_w}{k_{roz} / \mu_o}}{\frac{k_{rwz} / \mu_w}{k_{roz} / \mu_o} + 1} = \frac{\frac{h_b}{(1 - h_b)} \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o}}{\frac{h_b}{(1 - h_b)} \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o} + 1} = \frac{M'}{M' + \frac{1 - h_b}{h_b}}$$

$$= \frac{M' h_b}{M' h_b + 1 - h_b}$$

$$f_{wz} = \frac{M' h_b}{1 + (M' - 1) h_b}$$

含水上升  
率:

$$\frac{\partial f_{wz}}{\partial S_{wz}} = \frac{\partial f_{wz}}{\partial h_b} \times \frac{\partial h_b}{\partial S_{wz}}$$

已知:  $f_{wz} = \frac{M' h_b}{1 + (M' - 1)h_b}$

$$S_{w2} = h_b(1 - S_{or}) + (1 - h_b)S_{wc} \quad \Rightarrow \quad h_b = \frac{S_{wz}}{1 - S_{or} - S_{wc}}$$

所以:  $\frac{\partial f_{wz}}{\partial h_b} = \frac{M'}{(1 + (M' - 1)h_b)^2}$

$$\frac{\partial h_b}{\partial S_{wz}} = \frac{1}{1 - S_{or} - S_{wc}}$$

$$\frac{\partial f_{wz}}{\partial S_{wz}} = \frac{M'}{(1 - S_{or} - S_{wc})(1 + (M' - 1)h_b)^2}$$



$$S_{w2} = h_b(1 - S_{or}) + (1 - h_b)S_{wc}$$

$$f_{wz} = \frac{M'h_b}{1 + (M' - 1)h_b}$$

$$\frac{\partial f_{wz}}{\partial S_{wz}} = \frac{M'}{(1 - S_{or} - S_{wc})(1 + (M' - 1)h_b)^2}$$

由B-L方程

$$\frac{\partial f_{wz}}{\partial S_{wz}} = \frac{1}{Q_{i2}}$$

$$Q_{i2} = \frac{(1 - S_{or} - S_{wc})(1 + (M' - 1)h_b)^2}{M'}$$

注水刚刚突破时( $h_b = 0$ ):

$$Q_i = \frac{(1 - S_{or} - S_{wc})}{M'}$$

$$\overline{S_{wz}} = S_{wz2} + (1 - f_{wz2})Q_{i2}$$

找出了以上  
水淹厚度比  
与各种参数  
的关系

$$\frac{\partial f_{wz}}{\partial S_{wz}} = \frac{M'}{(1 - S_{or} - S_{wc})(1 + (M' - 1)h_b)^2}$$

由B-L方程

$$Q_{i2} = \frac{(1 - S_{or} - S_{wc})(1 + (M' - 1)h_b)^2}{M'}$$

注水刚刚突破时( $h_b = 0$ ):

$$Q_i = \frac{(1 - S_{or} - S_{wc})}{M'}$$

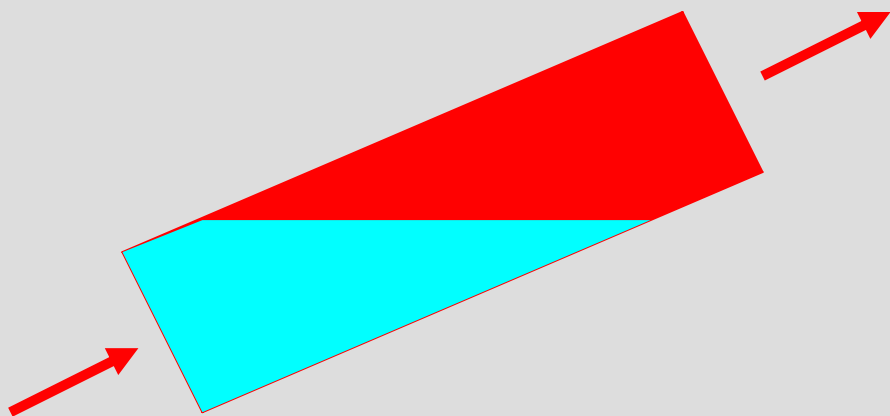
$$\overline{S_{wz}} = S_{wz2} + (1 - f_{wz2})Q_{i2}$$

当 $h_b = 1$ 时, ( $S_{wz2} = 1 - S_{or}$ ) 系统为完全驱替

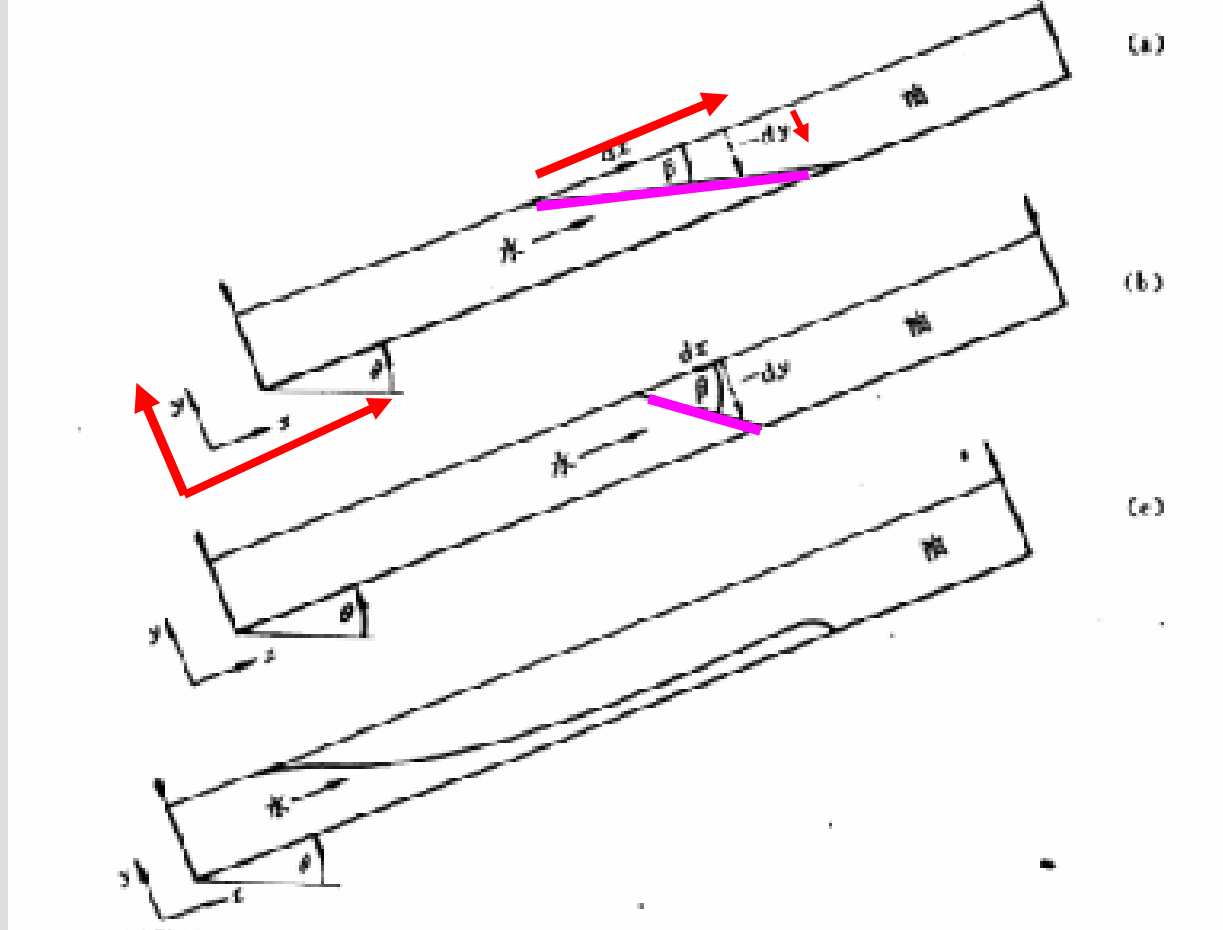
找出了以上  
水淹厚度比  
与各种参数  
的关系

# 本节的主要内容

- 1 水平油藏的重力分异
- 2 倾斜油藏的重力分异
- 3 重力分异流动时的相对渗透率
- 4 多层油藏动态预测



实际的油藏中是重力差和毛管力共同作用下形成油水界面，能否保持稳定还要看这两者与粘滞力的比较。



如果驱替过程中油水界面能够保持稳定，即稳定驱替，否则为不稳定驱替

$$\frac{dy}{dx} = -\tan \beta = C \quad \tan \beta > 0 \quad \frac{dy}{dx} = -\tan \beta = 0$$

在稳定驱替条件下，在油水界面上：

$$q_o = -\frac{Kk'_{ro}A}{\mu_o} \left( \frac{\partial p_o}{\partial x} + \rho_o g \sin \theta \right) = q_t$$

$$q_w = -\frac{Kk'_{rw}A}{\mu_w} \left( \frac{\partial p_w}{\partial x} + \rho_w g \sin \theta \right) = q_t$$

稳定条件下油水界面稳定上移，油水流量相等

$$-\frac{\mu_w}{Kk'_{rw}A} q_t = \frac{\partial p_w}{\partial x} + \rho_w g \sin \theta$$

$$-\frac{\mu_o}{Kk'_{ro}A} q_t = \frac{\partial p_o}{\partial x} + \rho_o g \sin \theta$$

$$q_t \left( \frac{\mu_o}{Kk'_{ro}A} - \frac{\mu_w}{Kk'_{rw}A} \right) = \frac{\partial (p_w - p_o)}{\partial x} + (\rho_w - \rho_o) g \sin \theta$$

$- p_c$ 
 $\Delta \rho$

$$q_t \left( \frac{\mu_o}{Kk'_{ro}A} - \frac{\mu_w}{Kk'_{rw}A} \right) = \frac{\partial(p_w - p_o)}{\partial x} + (\rho_w - \rho_o)g \sin \theta$$

在垂向平衡条件下:

$$p_c = \Delta \rho g h$$

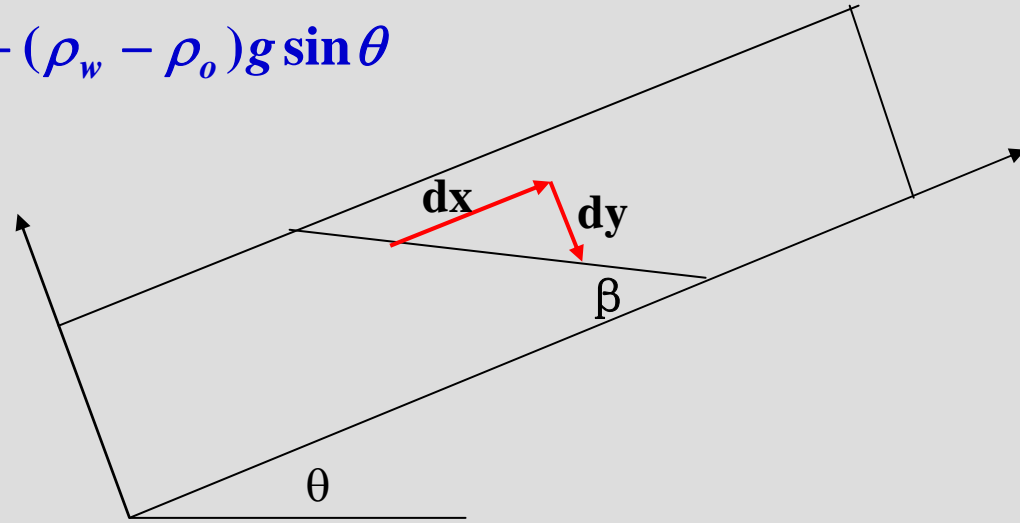
$$\frac{\partial p_c}{\partial x} = \Delta \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$h = -\cos \theta dy \quad \frac{dh}{dx} = -\cos \theta \frac{dy}{dx} \quad \frac{\partial p_c}{\partial x} = -\Delta \rho g \cos \theta \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{q_t}{AK} \frac{\mu_w}{k'_{rw}} \left( \frac{\mu_o}{k'_{ro}} \frac{k'_{rw}}{\mu_w} - 1 \right) = \frac{\partial p_c}{\partial x} + \Delta \rho g \sin \theta$$

$$\left( \frac{\mu_o}{k'_{ro}} \frac{k'_{rw}}{\mu_w} - 1 \right) = \frac{Kk'_{rw}A}{q_t \mu_w} \left[ -\Delta \rho g \cos \theta \frac{dy}{dx} + \Delta \rho g \sin \theta \right]$$

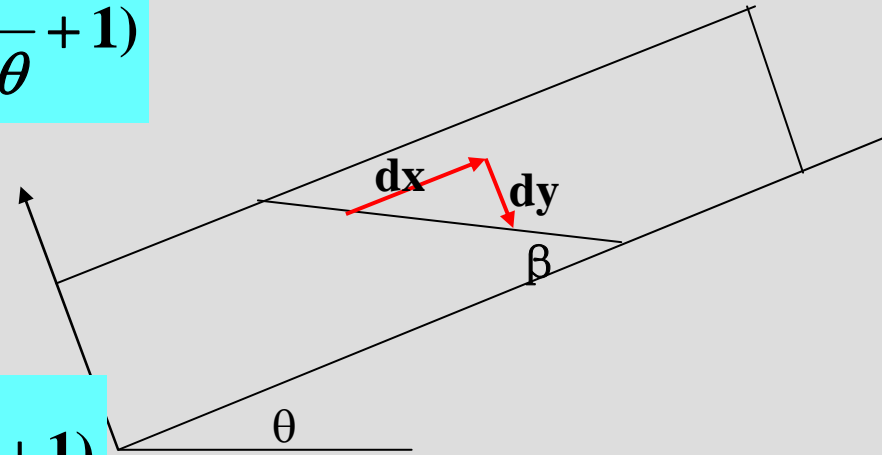
$$\left( \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o} - 1 \right) = \frac{Kk'_{rw}A\Delta \rho g \sin \theta}{\mu_w q_t} \left( \frac{dy}{dx} \frac{1}{\tan \theta} + 1 \right)$$



$$\left(\frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o} - 1\right) = \frac{Kk'_{rw} A \Delta \rho g \sin \theta}{\mu_w q_t} \left(\frac{dy}{dx} \frac{1}{\tan \theta} + 1\right)$$

$$M' = \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o}$$

$$G = \frac{Kk'_{rw} A \Delta \rho g \sin \theta}{\mu_w q_t}$$



$$\frac{dy}{dx} = -\tan \beta$$

$$(M' - 1) = G \left(\frac{dy}{dx} \frac{1}{\tan \theta} + 1\right)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\tan \beta = \frac{M' - 1 - G}{G} \tan \theta$$

稳定条件:

$$G > M' - 1$$

临界条件:

$$G = M' - 1$$

临界流量:

$$q_{tc} = \frac{Kk'_{rw} A \Delta \rho g \sin \theta}{\mu_w (M' - 1)}$$

当  $M' < 1$  时, 无条件稳定  
当  $M' = 1$  时, 无条件稳定  
当  $M' > 1$  时, 有条件稳定

## 本节的主要内容

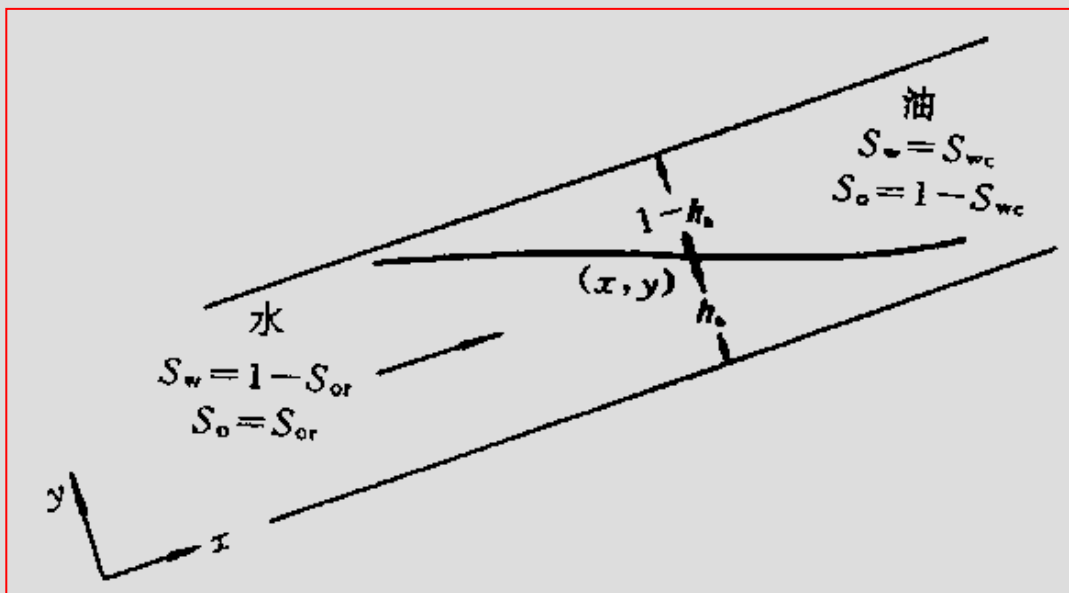
- 1 水平油藏的重力分异
- 2 倾斜油藏的重力分异
- 3 重力分异流动时的相对渗透率
- 4 多层油藏动态预测



对于倾斜的油藏，存在重力和毛管力的情况下，如何计算动态？

方法同水平分异条件下的相同，只有找到地层垂向上的油水分布比例与各参数的关系即可以。主要是含水饱和度的关系





在地层的截面上进行厚度的加权平均，得到平均的参数。

$$S_{wz} = h_b (1 - S_{or}) + (1 - h_b) S_{wc}$$

$$h_b = \frac{S_{wz} - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}}$$

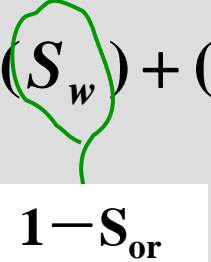
$$k_{rwz}(S_{wz}) = h_b k'_{rw} \quad k_{roz}(S_{wz}) = (1 - h_b) k'_{ro}$$

在地层的截面上进行厚度的加权平均，得到平均的参数。

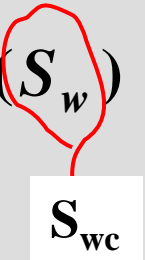
$$S_{wz} = h_b (1 - S_{or}) + (1 - h_b) S_{wc}$$

$$h_b = \frac{S_{wz} - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}}$$

$$k_{rwz}(S_{wz}) = h_b k_{rw}(S_w) + (1 - h_b) k_{rw}(S_w)$$



$1 - S_{or}$



$S_{wc}$

$$k_{rwz}(S_{wz}) = h_b k'_{rw}$$

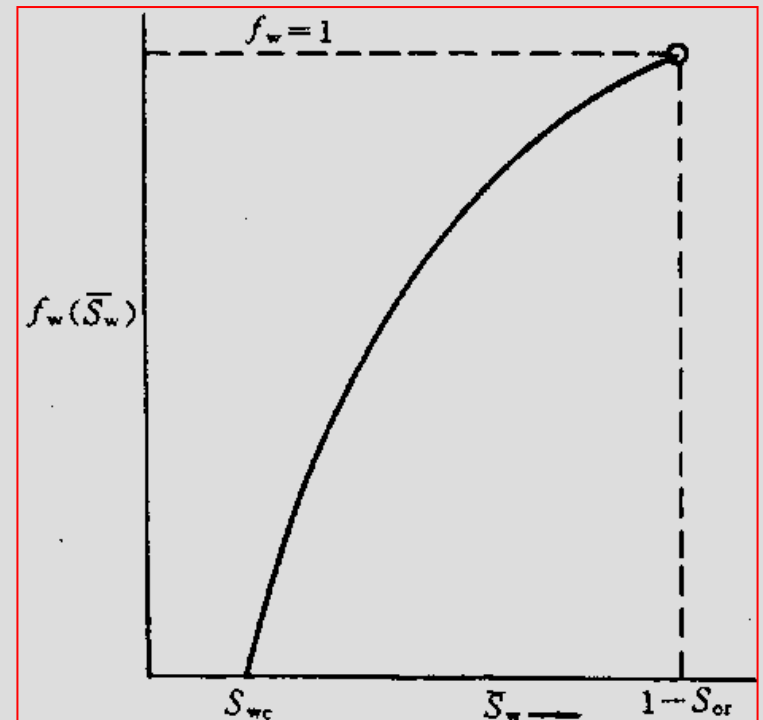
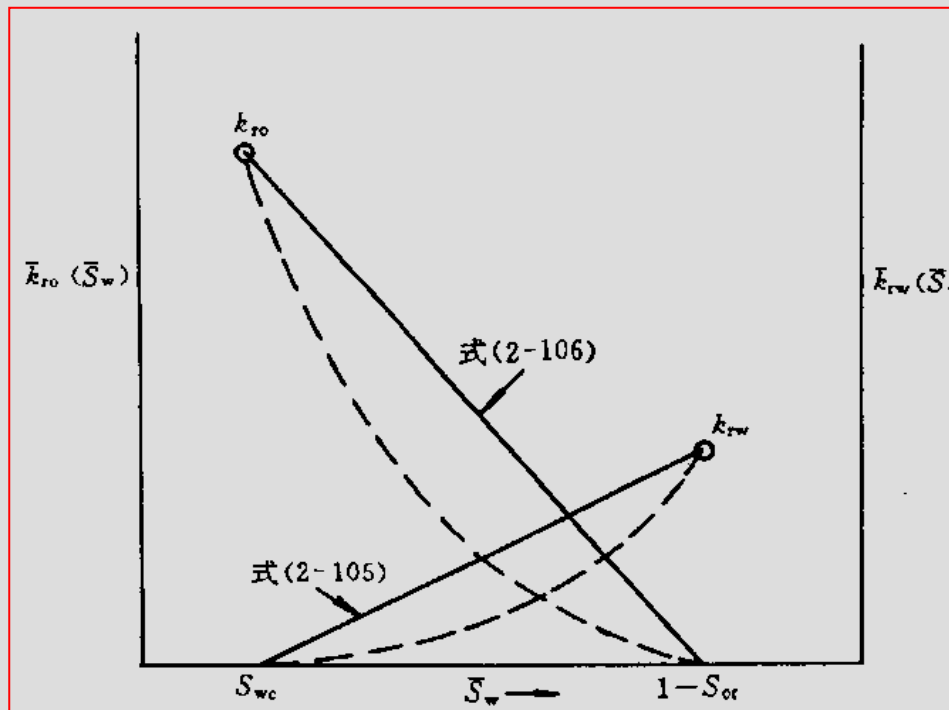
$$k_{roz}(S_{wz}) = h_b k_{ro}(S_w) + (1 - h_b) k_{ro}(S_w)$$

$$k_{roz}(S_{wz}) = (1 - h_b) k'_{ro}$$

$$k_{rwz}(S_{wz}) = \left( \frac{S_{wz} - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \right) k'_{rw}$$

$$k_{roz}(S_{wz}) = \left( \frac{1 - S_{or} - S_{wz}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \right) k'_{ro}$$

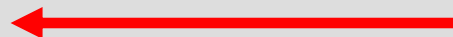
厚度平均相对渗透率和厚度平均含水饱和度是线性关系。



在稳定驱替条件下没有跃变前沿。

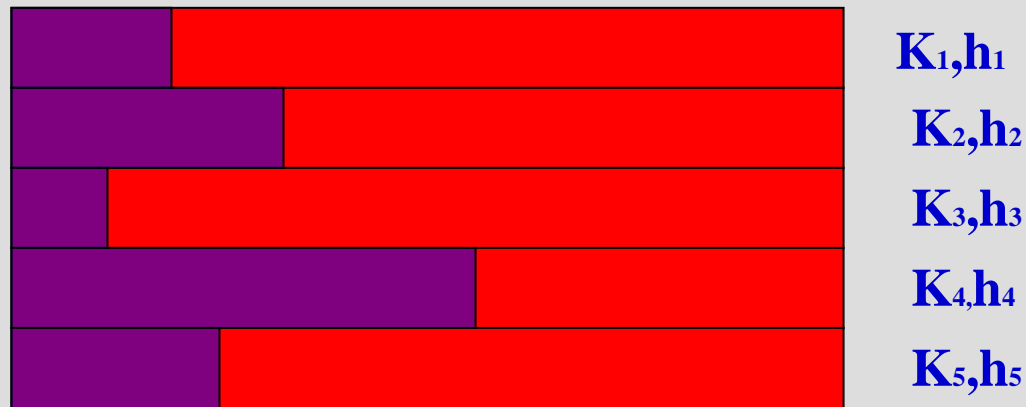
## 本节的主要内容

- 1 水平油藏的重力分异
- 2 倾斜油藏的重力分异
- 3 重力分异流动时的相对渗透率
- 4 多层油藏动态预测



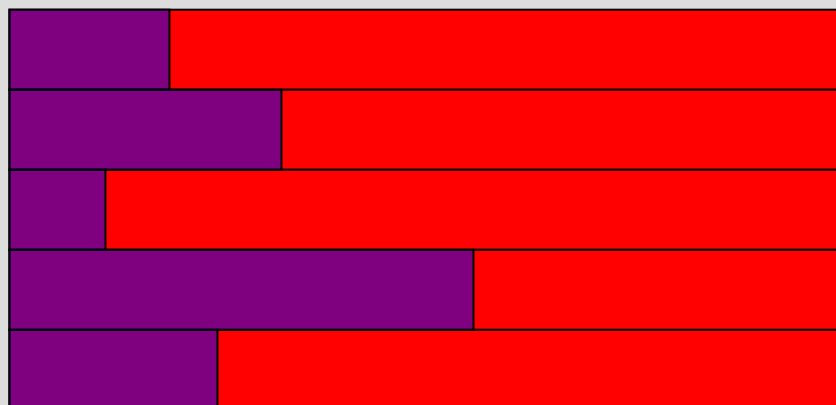
# 当油藏存在多层时动态如何计算？

## 剖面压力均等模型



粘滞力远远大于毛管力和重力；纵向上的渗透发生在瞬间完成；活塞式驱替

动态计算时，首先将地层按渗透率的大小进行排序，对于不同时刻的参数，如渗透率，饱和度等采用厚度加权平均方程求出。



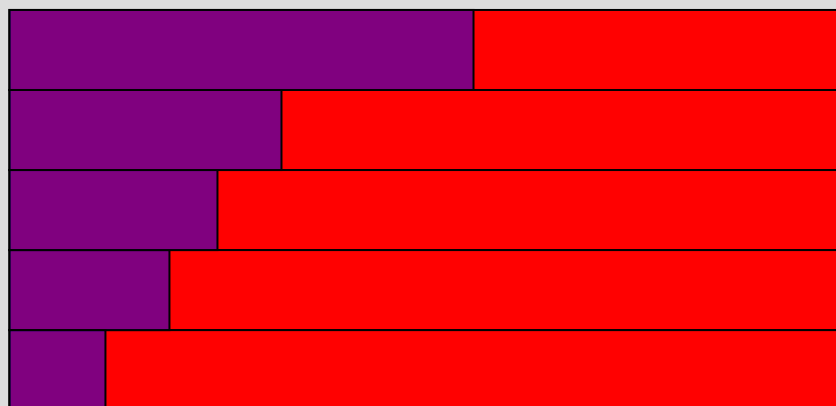
$K_1, h_1$

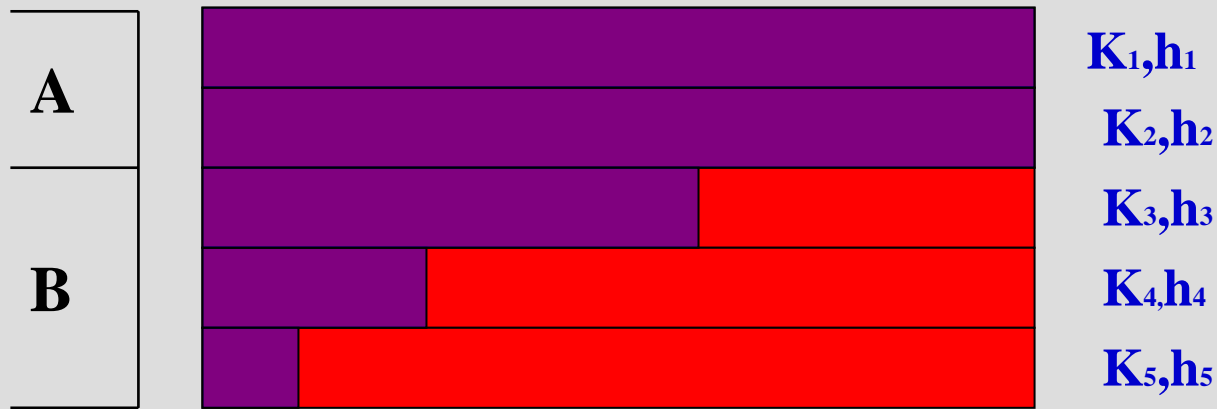
$K_2, h_2$

$K_3, h_3$

$K_4, h_4$

$K_5, h_5$

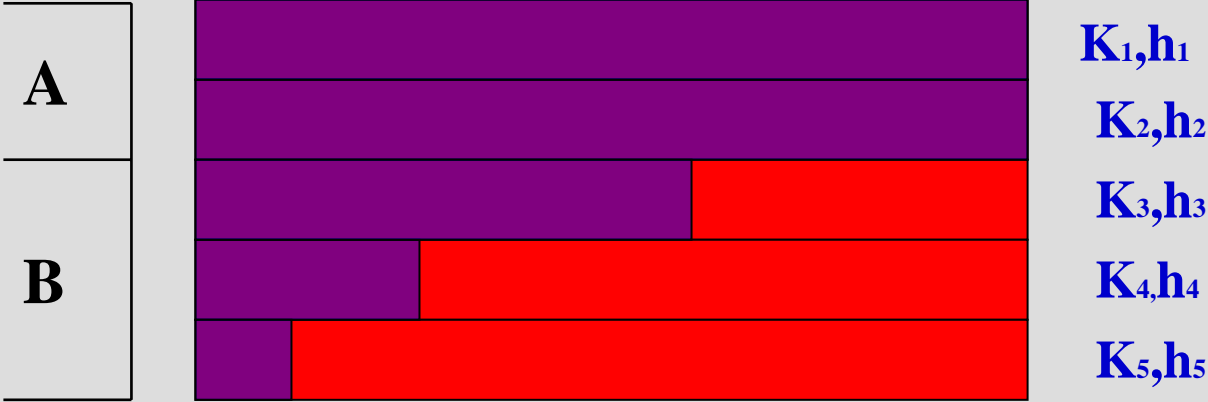




$$f_{wz} = \frac{\int_A u_{wx} dz}{\int_A u_{wx} dz + \int_B u_{ox} dz} = \frac{\int_A \left( \frac{k_w}{\mu_w} \frac{dp_w}{dx} \right) dz}{\int_A \left( \frac{k_w}{\mu_w} \frac{dp_w}{dx} \right) dz + \int_B \left( \frac{k_o}{\mu_o} \frac{dp_o}{dx} \right) dz}$$

每一层的生产压差相等，即任一剖面上压力梯度相等

$$f_{wz} = \frac{\int_A (k_w / \mu_w)_{S_{or}} dz}{\int_A (k_w / \mu_w)_{S_{or}} dz + \int_B (k_o / \mu_o)_{S_{wi}} dz}$$



$$f_{wz} = \frac{\int_A (k_w / \mu_w)_{S_{or}} dz}{\int_A (k_w / \mu_w)_{S_{or}} dz + \int_B (k_o / \mu_o)_{S_{wi}} dz}$$

$$S_{wz} = \frac{\int_A \phi (S_{oi} - S_{or}) dz + \int_{A,B} \phi S_{wi} dz}{\overline{\phi} h}$$

$$f_{wz} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{k_j k_{rwj}}{\mu_w} h_j}{\sum_{j=1}^m \frac{k_j k_{rwj}}{\mu_w} h_j + \sum_{j=m+1}^n \frac{k_j k_{roj}}{\mu_o} h_j}$$

$$S_{wz} = \frac{\sum_{j=1}^m (1 - S_{orj}) \phi_j h_j + \sum_{j=m+1}^n S_{wj} \phi_j h_j}{\phi h}$$

$$\phi = \frac{\sum_{j=1}^n \phi_j h_j}{h}$$



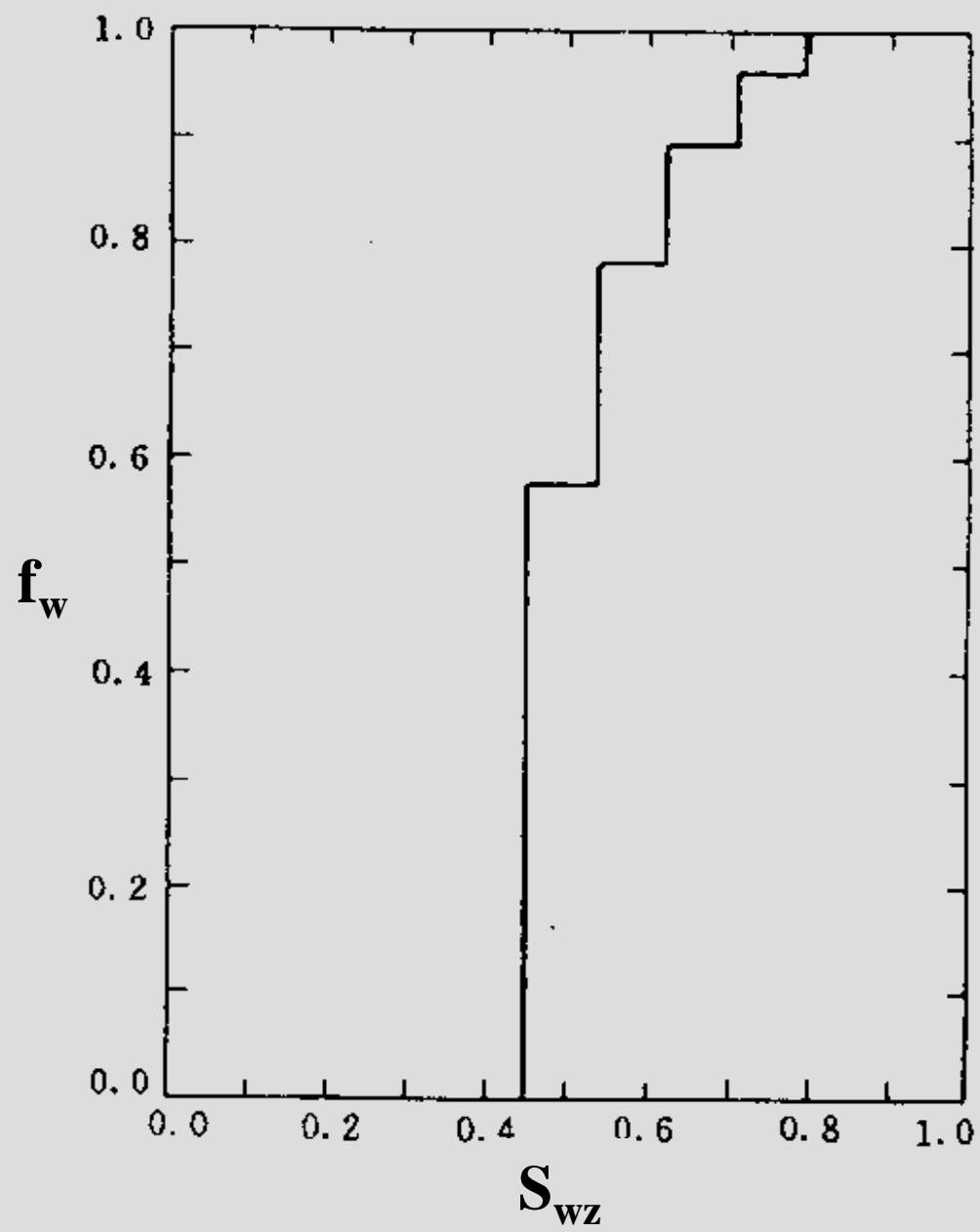
若各层油水相渗端点值相同、孔隙度相同：

$$f_{wz} = \frac{\sum_{j=1}^m k_j h_j}{\sum_{j=1}^m k_j h_j + \frac{1}{M} \sum_{j=m+1}^n k_j h_j}$$

$$S_{wz} = \frac{(1 - S_{or}) \sum_{j=1}^m h_j + S_{wc} \sum_{j=m+1}^n h_j}{h}$$

第 $m+1$ 小层的前缘推进速度：

$$v_{swz(m+1)} = \frac{q_t}{A\phi} \left( \frac{f_{wz(m+1)} - f_{wzm}}{S_{wz(m+1)} - S_{wzm}} \right)$$

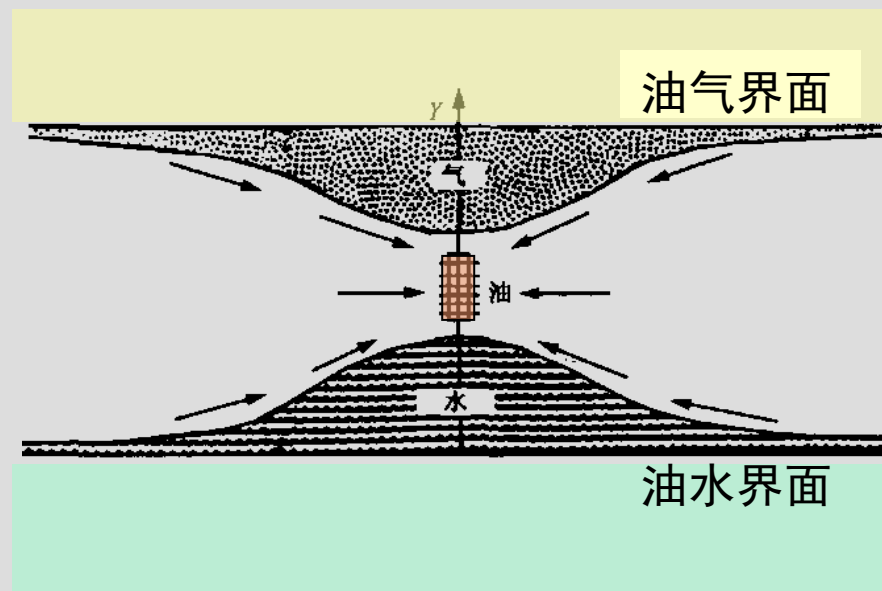
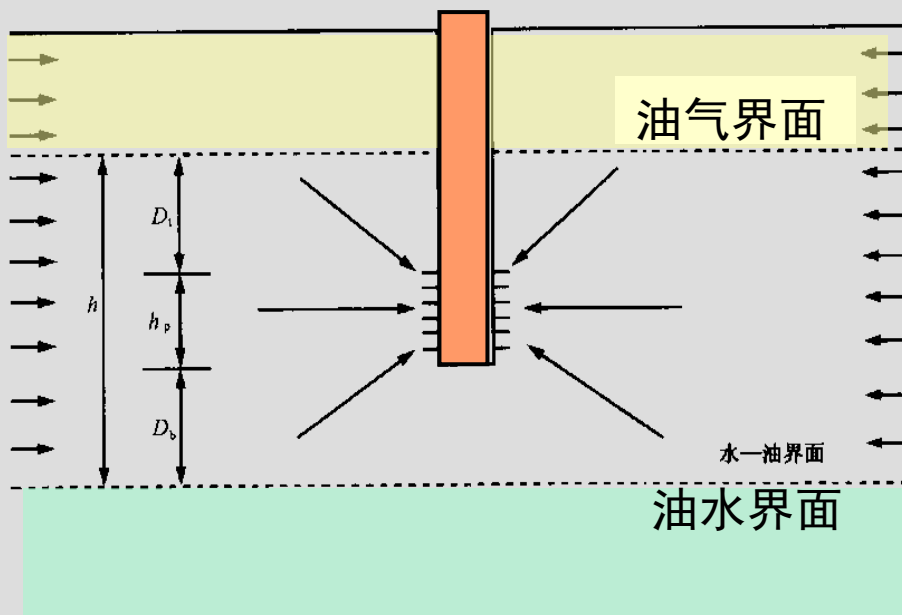


## 本节掌握内容

- 1 什么是毛管力重力垂向平衡，油水分布特征？
- 2 端点流度比？
- 3 了解水平油层重力分异条件下的油层动态计算方法。
- 4 掌握倾斜油藏重力分异条件下，稳定驱替的条件即影响因素。
- 5 了解重力分异条件下的相对渗透率处理。
- 6 了解多层油藏的动态计算方法。

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2—3 底水锥进



油井生产时的压力梯度使近井地带的**油气界面**降低，**油水界面**升高。油层之上较轻的气及油层下面较重的水使流体梯度得以平衡。这些平衡力使油气及油水界面呈锥状分布。

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2—3 底水锥进

影响流体在井底附近流动分布的三种基本力是：

(1) 毛细管力； (2) 重力； (3) 粘滞力。

- ◆ 毛细管力对锥进的影响通常很小而被忽略不计。
- ◆ 重力是垂向的，其影响随流体密度而变；
- ◆ 粘滞力是与流体渗流有关的压力梯度。
- ◆ 流体界面和射孔层段之间的重力和粘滞力处于平衡
- ◆ 当井眼处动力（粘滞力）大于重力时，一个“锥进”就会最终突破井眼。

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2—3 底水锥进

三个概念来阐述锥进的具体特征。

(1) 稳定锥进； (2) 不稳定锥进； (3) 临界产量

如果油井以定产量生产而且泄油区域内的压力梯度也保持稳定，就达到了稳定状态。此时，如果油井中动力（粘滞力）小于重力，那么已形成的气或水的锥进就不会到达井筒，锥进也不会前进或后退，形成一个稳定锥进。

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2—3 底水锥进

如果井底流动压差足以克服重力作用，不稳定锥进就会继续推进，并最终突入井中。应注意：稳定锥进只是拟稳态的，因为整个油藏泄油体积内压力分布都在不断变化。如在衰竭式开采中，油水界面会逐渐推进，进入井的完井层段，增大了锥进发生的可能。

临界生产速度是指在生产中保证锥进不进入井筒的极限产量，如果超过这个数值，相应井筒处的压力梯度会导致气或水锥进入井筒，在临界生产速度下，气或水锥处于稳定

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2—3 底水锥进

计算锥进的公式大致有以下三类。

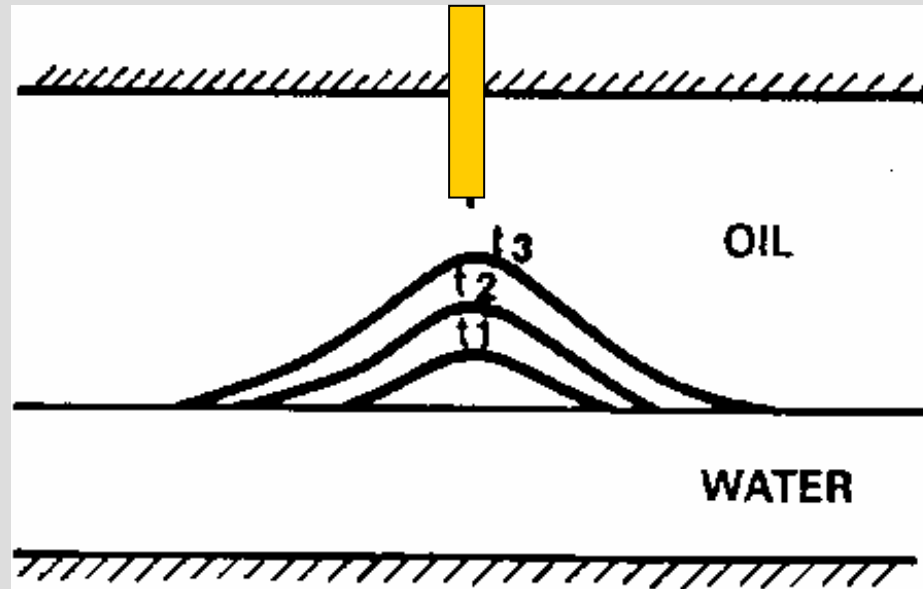
- (1) 临界产量公式;
- (2) 突破时间预测;
- (3) 突破后井的生产动态预测。

上述公式可用于计算直井和水平井的锥进问题。



## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2—3 底水锥进



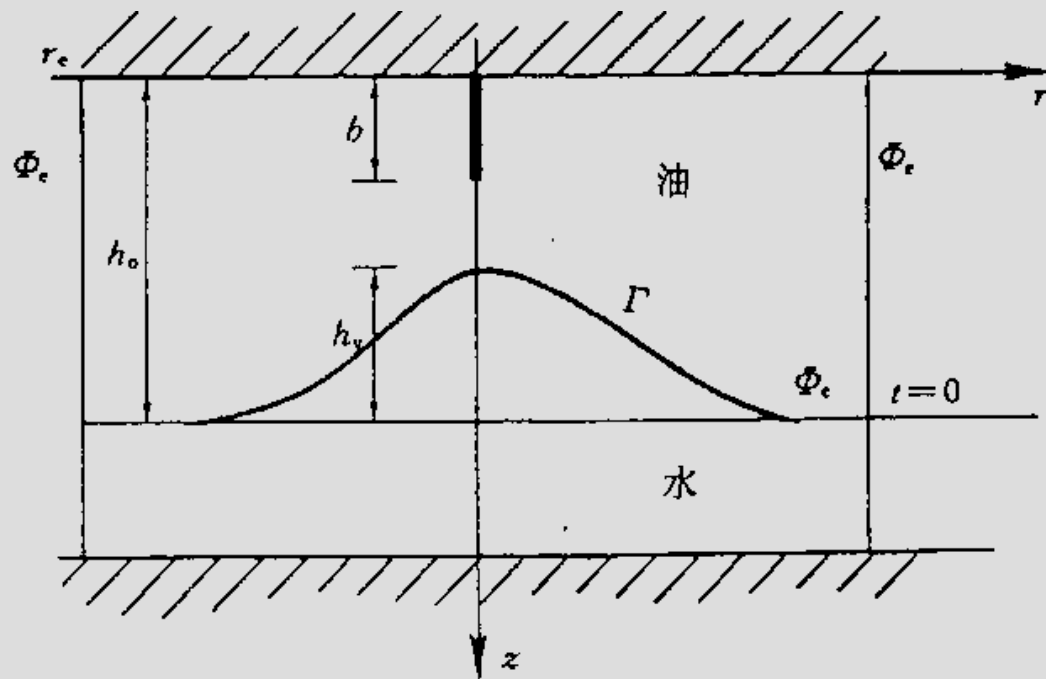
锥体上升的高度取决于由  $(\rho_w - \rho_o)$  引起的重力与垂向压力梯度的平衡。

当  $q_o$  小于临界产量  $q_{oc}$ ，底水的锥体是稳定的。

## § 2-3 底水锥进

### 一、临界产量的计算

在锥体表面 $\Gamma$ 以下任意点 $(r, z)$ 的势:



$$\Phi_w(r, z) = \text{常数} \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0$$

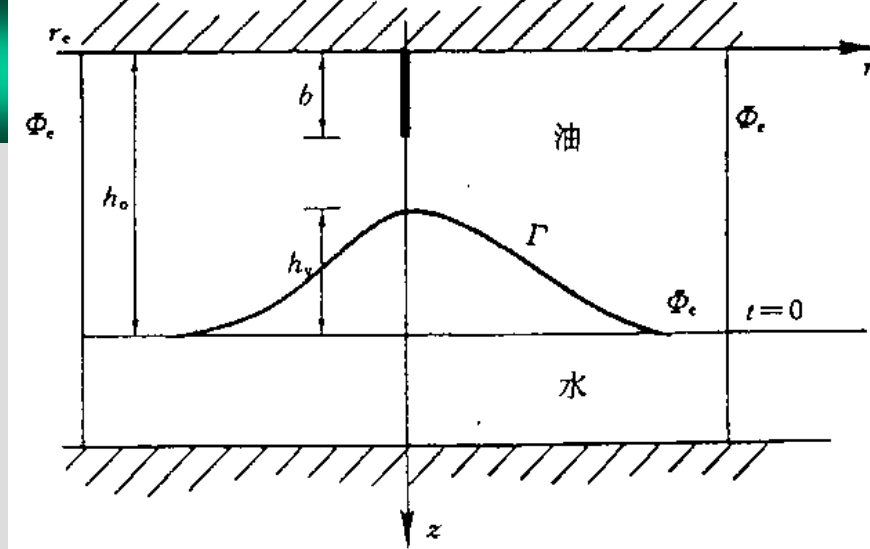
在锥体内,  $p_o = p_w = p$

## § 2-3 底水锥进

由势的定义:

$$\Phi_o = \int_0^{p_o} \frac{dp_o}{\rho_o} - gz$$

$$\Phi_w = \int_0^{p_w} \frac{dp_w}{\rho_w} - gz$$



若流体不可压缩:

$\rho$  为常数, 且考虑毛管力=0

$$\Phi_o(r, z) = \frac{p}{\rho_o} - gz$$

$$\Phi_w(r, z) = \frac{p}{\rho_w} - gz$$

$$\rho_o \Phi_o(r, z) + gz \rho_o = p$$

$$\rho_w \Phi_w(r, z) + gz \rho_w = p$$

$$\rho_o (\Phi_o(r, z) + gz) = \rho_w (\Phi_w(r, z) + gz)$$

$$\frac{\rho_o}{\rho_w} (\Phi_o(r, z) + gz) = \Phi_w(r, z) + gz$$

## § 2-3 底水锥进

$$\Phi_w(r, z) = \frac{\rho_o}{\rho_w} (\Phi_o(r, z) + gz) - gz$$

$$\frac{\rho_o}{\rho_w} \frac{d\Phi_o}{dz} + \frac{\rho_o}{\rho_w} g - g = \text{常数}$$

$$\frac{d\Phi_o}{dz} = -g + \frac{\rho_w}{\rho_o} g = \text{常数}$$

$$\frac{d\Phi_o}{dz} = g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o}$$

$r=r_e$  处, 油相中的势=油水接触界面处的势

$$\frac{\Phi_e - \Phi_{ov}}{h_v} = \left( \frac{d\Phi_o}{dz} \right)_v = g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o}$$

定义生产压差的势  $\Delta\Phi$  常数

## § 2-3 底水锥进

$$\frac{\Phi_e - \Phi_{ov}}{h_v} = \left( \frac{d\Phi_o}{dz} \right)_v = g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o}$$

定义生产压差的势  $\Delta\Phi$  常数

定义无因次势  $\Phi_D(r, z)$  常数:  $\Phi_D(r, z) = \frac{\Phi_e - \Phi_o(r, z)}{\Delta\Phi}$

无因次高度  $z_D = \frac{z}{h_o}$  令  $h_{DV} = h_v / h_o$

$$\left( \frac{\partial \Phi_D}{\partial z_D} \right)_v = \frac{\partial \Phi_o / \Delta\Phi}{\partial z / h_o} = \frac{\Phi_e - \Phi_{ov}}{h_v} \frac{h_o}{\Delta\Phi} = - \frac{\Phi_{DV}}{h_{DV}}$$

$$\frac{\Phi_{DV}}{h_{DV}} = g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{h_o}{\Delta\Phi}$$

纵向上无因次势梯度

## § 2-3 底水锥进

$$\frac{\Phi_{DV}}{h_{DV}} = g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{h_o}{\Delta\Phi}$$

临界产量:

$$q_{oc} = -2\pi \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \rho_o \int_0^{h_o} r_e \left( \frac{\partial \Phi_o}{\partial r} \right)_{r_o} dz \quad \text{令} \quad r_D = \frac{r}{h_o} \sqrt{\frac{k_v}{k_r}}$$

无因次化:

$$q_{oc} = 2\pi h_o \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \rho_o \Delta\Phi \int_0^1 r_{De} \left( \frac{\partial \Phi_D}{\partial r_D} \right)_{r_{De}} dz_D$$

因为:  $\rho_o \Delta\Phi = g(\rho_w - \rho_o) h_o \frac{h_{DV}}{\Phi_{DV}}$

$$q_{oc} = 2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \frac{h_{DV}}{\Phi_{DV}} \int_0^1 r_{De} \left( \frac{\partial \Phi_D}{\partial r_D} \right)_{r_{De}} dz_D$$

令  $\Omega(r_{De}, b_D) = \frac{h_{DV}}{\Phi_{DV}} \int_0^1 r_{De} \left( \frac{\partial \Phi_D}{\partial r_D} \right)_{r_{De}} dz_D \quad b_D = \frac{b}{h_o}$

$$q_{oc} = 2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \Omega(r_{De}, b_D)$$

## § 2-3 底水锥进

$$q_{oc} = 2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \Omega(r_{De}, b_D)$$

如何确定

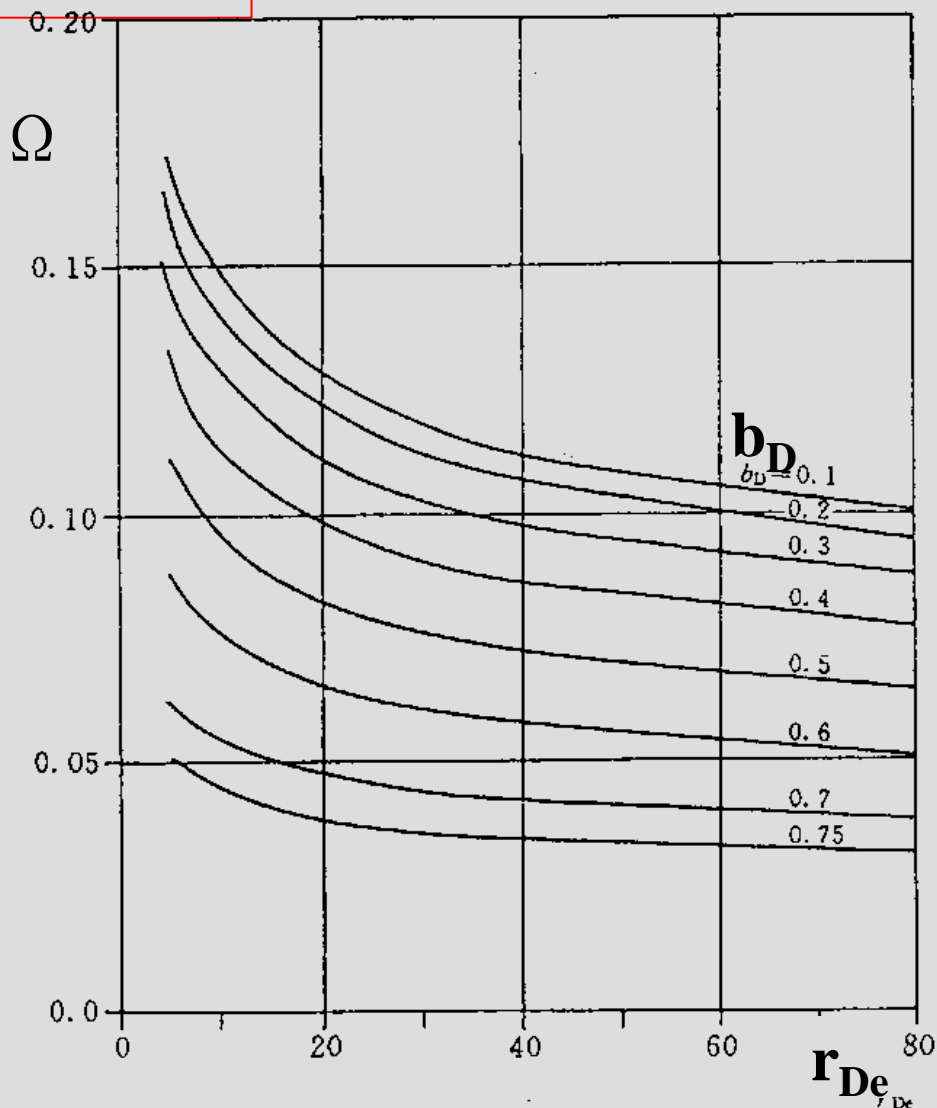
$\Omega$  :

1、图版法:

使用范围:

$$5 \leq r_{De} \leq 80$$

$$0.1 \leq b_D \leq 0.75$$



## § 2-3 底水锥进

$$q_{oc} = 2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) \frac{k_r k_{ro}(s_{wc})}{B_o \mu_o} \Omega(r_{De}, b_D)$$

如何确定

$\Omega$  : 2、回归公式法

$$\Omega(r_{De}, b_D) = A(b_D) \frac{1}{B(b_D) + C(b_D) \ln r_{De}}$$

其中系数:

$$A(b_D) = 0.993 + \frac{0.00119}{0.769 - b_D}$$

$$B(b_D) = \frac{1}{0.302 - 0.053 b_D - 0.336 b_D^2}$$

$$C(b_D) = 1.459 \exp[0.803 b_D^2 \ln(5.664 b_D^{0.85} + 9)]$$



## 二、预测底水锥进时间

- (1) 水锥体突破完井段的时间;
- (2) 当时间 $t >$ 突破时间, 油井含水变化

$$H_{Dv} = \frac{2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) k_r}{q_o B_o \mu_o} h_{Dv} \quad t_D = \frac{g(\rho_w - \rho_o) k_V (1 + M^\alpha)}{2\mu_o \phi h_o} t$$

无因次突破高度:  $(h_{Dv})_{BT} = 1 - b_D = 1 - b / h_o$

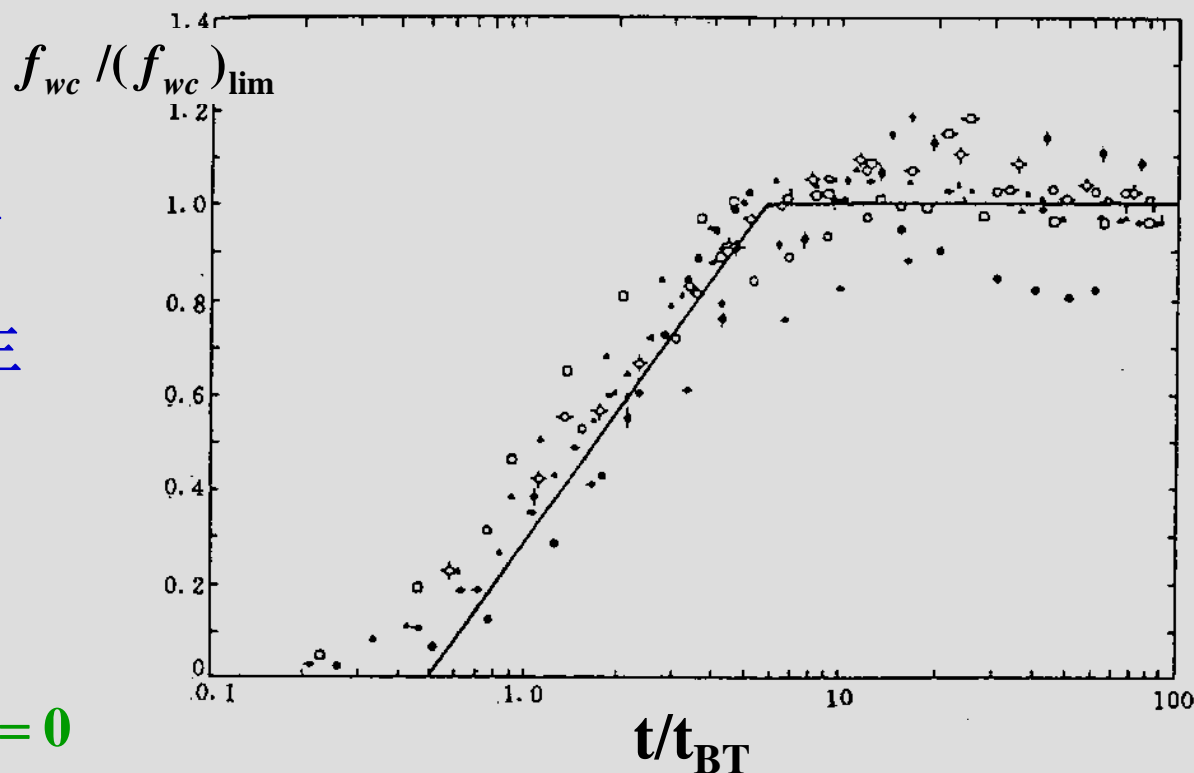
无因次突破时间:  $(t_D)_{BT} = \frac{g(\rho_w - \rho_o) k_V (1 + M^\alpha)}{2\mu_o \phi h_o} t_{BT}$

$t_{BT}$ 时无因次水锥高度:  $(H_{Dv})_{BT} = \frac{2\pi g h_o^2 (\rho_w - \rho_o) k_r}{q_o B_o \mu_o} (1 - b_D)$

$(t_D)_{BT} \sim (H_{Dv})_{BT}$  :  $(t_D)_{BT} = \frac{(H_{Dv})_{BT}}{4} \frac{16 + 7(H_{Dv})_{BT} - 3(H_{Dv})_{BT}^2}{7 - 2(H_{Dv})_{BT}}$

## 二、预测底水锥后含水变化

水锥突破后，油井以大于临界产量生产时，含水变化



$$\text{当 } \frac{t}{t_{BT}} < 0.56 \quad f_{wc} = 0$$

$$\text{当 } 0.56 \leq \frac{t}{t_{BT}} \leq 5.7 \quad \left[ \frac{f_{wc}}{(f_{wc})} \right]_t = 0.94 \lg \left( \frac{t}{t_{BT}} \right) + 0.24$$

$$\text{当 } \frac{t}{t_{BT}} > 5.7 \quad f_{wc} = 1.0$$

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2-4 面积注水开发指标计算

1、精确解

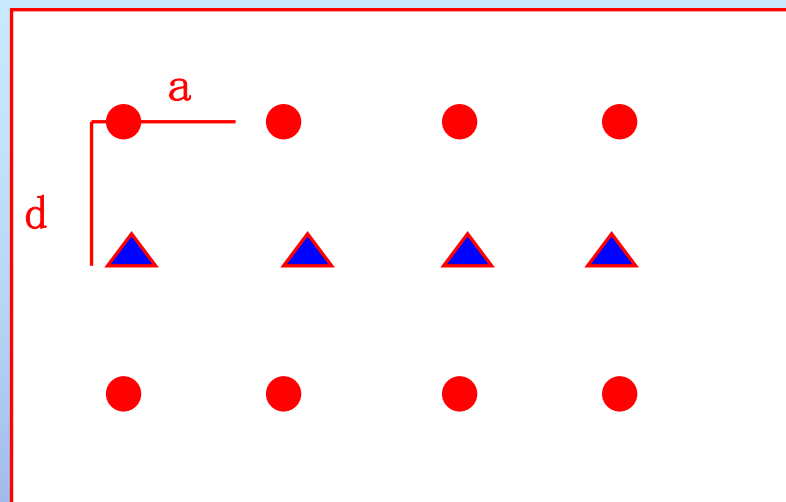
2、近似解

# 一、精确解

油水粘度相同，刚性驱替。

## (1) 直线排状注水系统

$$i = \frac{0.1178KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P}{\mu_o(\log \frac{a}{r_w} + 0.682\frac{d}{a} - 0.798)}$$



上式可以计算当初始注水和含水100%时的注水量，即产量。

$$i = \frac{0.1178KK_{rw}(S_{or})h\Delta P}{\mu_w(\log \frac{a}{r_w} + 0.682\frac{d}{a} - 0.798)}$$

## (2) 交错排状注水系统

$$i = \frac{0.1178KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P}{\mu_o(\log \frac{a}{r_w} + 0.682\frac{d}{a} - 0.798)}$$

## (3) 五点井网

$$i = \frac{0.1178KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P}{\mu_o(\log \frac{d}{r_w} - 0.2688)}$$

## (4) 反七点井网

$$i = \frac{0.1571KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P}{\mu_o(\log \frac{d}{r_w} - 0.2472)}$$

## (5) 反九点井网

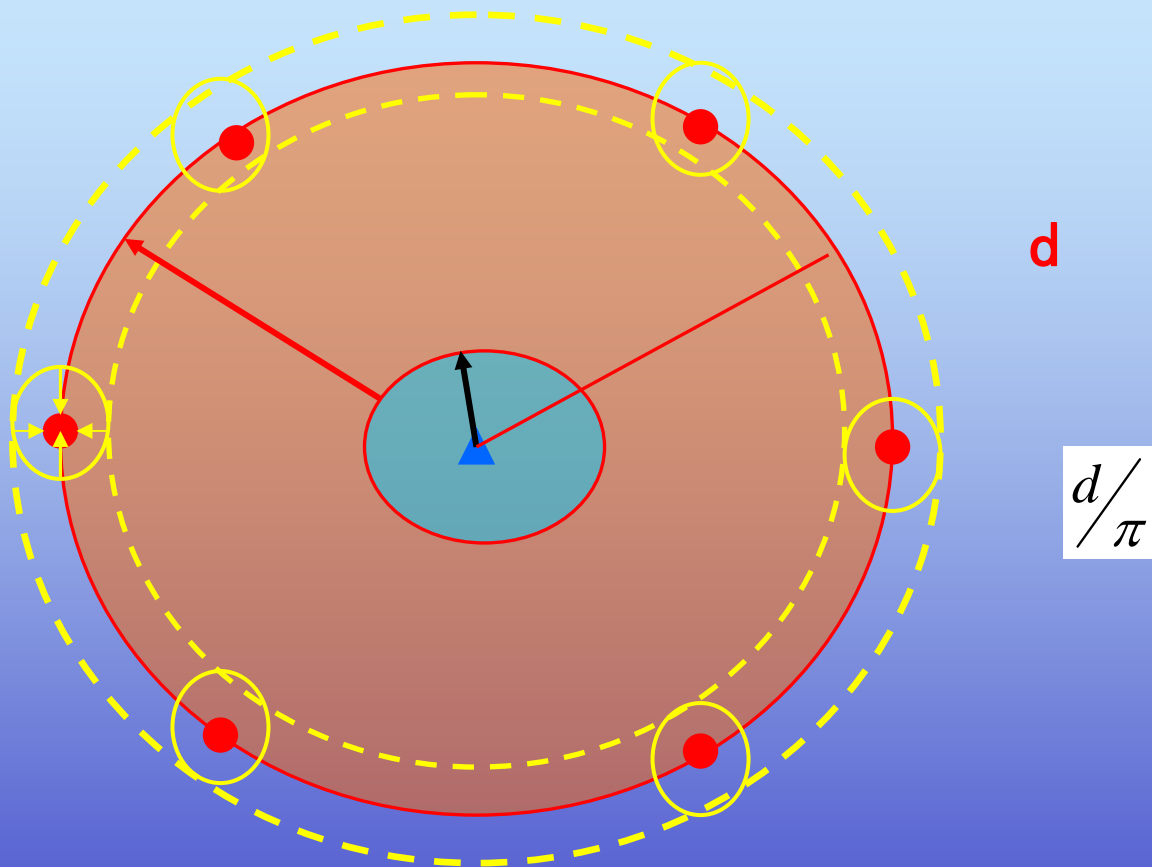
角井

$$i = \frac{0.1178KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P_{ic}}{\mu_o(\frac{1+R}{2+R})(\log \frac{d}{r_w} - 0.1183)}$$

边井

$$i = \frac{0.1178KK_{ro}(S_{wc})h\Delta P_{is}}{\mu_o[(\frac{3+R}{2+R})(\log \frac{d}{r_w} - 0.1183) - \frac{0.301}{2+R}]}$$

## 二、近似解



## (1) 见水前:

三个阻力区间: 注水井到油水前沿、油水前沿到排油坑道、  
排油坑道到生产井底

注水井底到油水前沿的阻力:

$$R_1 = \frac{\mu_w}{2\pi Kh K_{rw}(S_{wm})} \ln \frac{r_f}{r_w}$$

油水前沿到排油坑道的阻力:

$$R_2 = \frac{\mu_o}{2\pi Kh K_{ro}(S_{wc})} \ln \frac{d}{r_f}$$

排油坑道到生产井底的阻力

$$R_3 = \frac{\mu_o}{2\pi Kh K_{ro}(S_{wc})} \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w}$$

内部阻力

产量=驱动力除以阻力

$$q_L = \frac{2\pi K h K_{ro}(S_{wc}) \Delta P h}{\mu_o \left[ \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{K_{ro}(S_{wc})}{K_{rw}(S_{wm})} \ln \frac{r_f}{r_w} + \ln \frac{d}{r_f} + \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w} \right]}$$

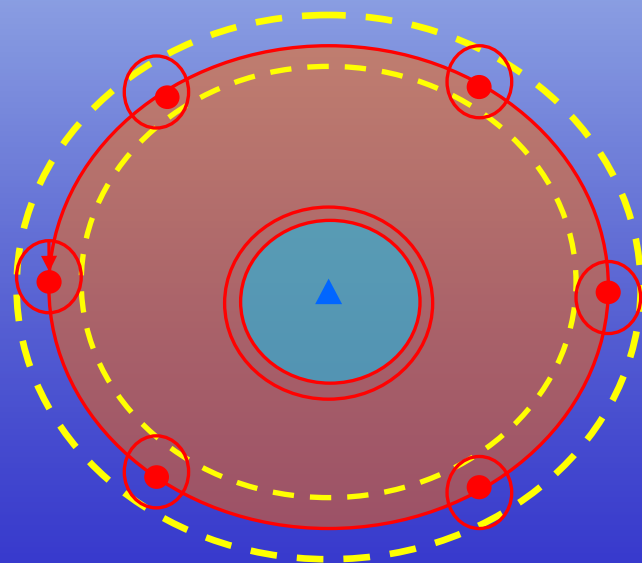
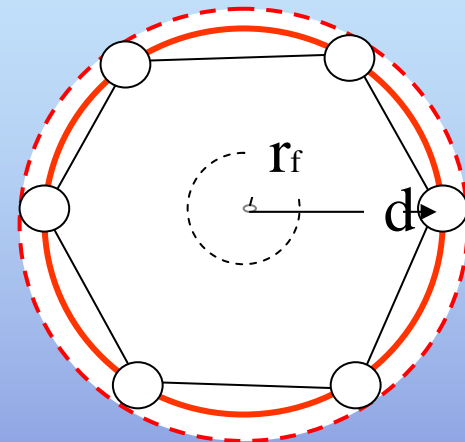
$$q_o = \frac{q_L}{m}$$

油水前沿的移动计算:

$$q_L dt = 2\pi r_f h \phi dr_f \times (S_{wf} - S_{wc})$$

$$\frac{q_L}{m} dt = \frac{\phi (S_{wf} - S_{wc}) \mu_o}{K K_{ro}(S_{wc}) \Delta P} \times r_f dr_f$$

$$\frac{q_L}{m} = \frac{\mu_o q_l}{2\pi k h k_{ro}(s_{wc}) \Delta p}$$





$$\overline{q_l} = \frac{\mu_o q_l}{2\pi k h k_{ro}(s_{wc}) \Delta p}$$

$$\overline{q_L} = \frac{1}{A \ln \frac{r_f}{r_w} + B \ln \frac{d}{r_f} + C}$$

$$A = \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{K_{ro}(S_{wc})}{K_{rw}(S_{wm})} \quad B = 1 \quad C = \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w}$$

$$(A - B) \ln r_f + D = \frac{1}{\overline{q_l}}$$

$$\text{式中: } D = C + B \ln d - A \ln r_w$$

$$\text{在前缘处: } q_l dt = (\overline{s_w} - s_{wc}) 2\pi r_f h \phi dr_f$$

**E**

$$\overline{q_l} dt = \frac{(\overline{s_w} - s_{wc}) \phi \mu_o}{k k_{ro}(s_{wc}) \Delta p} r_f dr_f$$

$$dt = E[(A - B) \ln r_f + D] r_f \bullet dr_f$$

$$\text{式中: } E = \frac{[\phi(S_{wf} - S_{wc})\mu_o]}{[K K_{ro}(S_{wc}) \Delta P]}$$

$$dt = E[(A - B)\ln r_f + D]r_f \bullet dr_f$$

$$E = \frac{[\phi(S_{wf} - S_{wc})\mu_o]}{[KK_{ro}(S_{wc})\Delta P]}$$

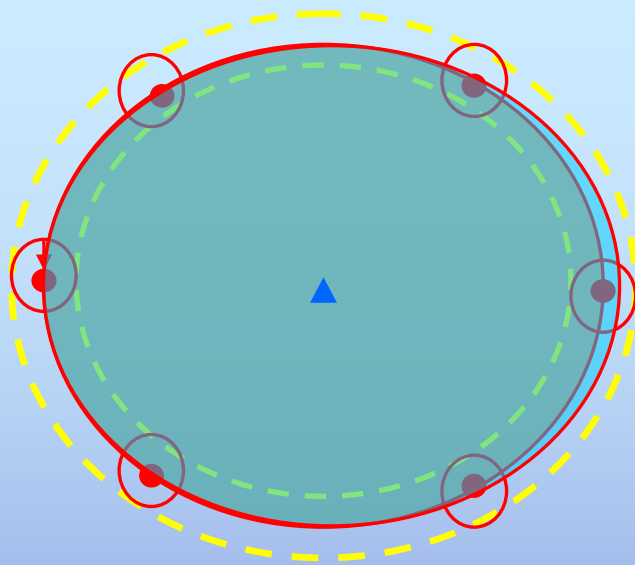
$$t = E \frac{r_f^2}{2} [(A - B)(\ln r_f - \frac{1}{2}) + D]$$

前沿移动公式

$$T_f = E \frac{d^2}{2} [(A - B)(\ln d - \frac{1}{2}) + D]$$

油井见水时间

(2) 见水以后:



注水井底到排油坑道  
排油坑道到生产井底

注水井底到排油坑道

$$R_1 = \frac{\mu_w}{2\pi Kh K_{rw}(S_{wm})} \ln \frac{d}{r_w}$$

排油坑道到生产井底

$$R_2 = \frac{\mu_o}{2\pi Kh K_{ro}(S_{we})} \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w}$$

注入速度  
产液速度

$$q_L = \frac{2\pi Kh K_{rw}(S_{wm}) \Delta P h}{\mu_w \left[ \ln \frac{d}{r_w} + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{K_{rw}(S_{wm})}{K_{ro}(S_{we})} \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w} \right]}$$

$$q_{pL} = \frac{q_L}{m}$$

$$q_L = \frac{2\pi K h K_{rw}(S_{wm}) \Delta P h}{\mu_w \left[ \ln \frac{d}{r_w} + \frac{K_{rw}(S_{wm})}{K_{rw}(S_{we})} \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w} \right]}$$

含水较高后

出口端含水饱和度随时间的变化规律

单位时间内产油量等于地层中含水量的上升。

$$q_L [1 - f(S_{we})] \times dt = \pi d^2 h \phi \times dS_{we}$$

$$dt = \frac{\mu_w \phi d^2}{2K K_{rw}(S_{wm}) \Delta P} \times \frac{\ln \frac{d}{r_w} + \frac{K_{rw}(S_{wm})}{K_{rw}(S_{we})} \frac{1}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w}}{1 - f(S_{we})} \bullet dS_{we}$$

$$t = A_e \int_{S_{wf}}^{S_{wm}} \frac{B_e + \frac{C_e}{K_{rw}(S_{we})}}{1 - f(S_{we})} dS_{we}$$

$$A_e = \frac{\mu_w \phi d^2}{2K k_{rw}(s_{wm}) \Delta p}$$

$$B_e = \ln \frac{d}{r_w}$$

$$C_e = \frac{k_{rw}(S_{wm})}{m} \ln \frac{d}{2(m+1)r_w}$$

以上的注水面积开发指标计算只是简单的估算，在数值模拟技术没有应用之前，是主要的计算动态的方法。现在计算油藏的动态，一般采用的是数值模拟计算。

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2-5 剩余油及其可流动性

剩余油：在任意驱替阶段，储层中剩余的含油量。

### ◆ 残余油饱和度 $S_{or}$

若油相要流动，其油饱和度必须超过某一特定值，也就是残余油饱和度，在这一饱和以下，油相留在孔隙中不流动。

### ◆ 剩余油饱和度 $S_{orw}$

在驱替过程中，将有剩余油存在，在数量上用一大于残余油饱和度的值来表征。这种饱和度称为剩余油饱和度  $S_{orw}$ 。

### ◆ 可动油饱和度 $S_{om}$

定义为可动油占孔隙体积的百分比： $S_{om} = 1 - S_{wc} - S_{or}$

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2-5 剩余油及其可流动性

剩余油相对于水驱后的饱和度（ $S_{orw}$ ）在水驱情况下是重要的一个参数，它定义了微观驱油效率，进而确定了采收率。另外，当考虑EOR时， $S_{orw}$ 对项目的经济评估是关键参数。

剩余油饱和度的监测方法：

- 1、岩心分析方法
- 2、常规测井数据估算
- 3、生产测井数据估算
- 4、单井示踪剂试验

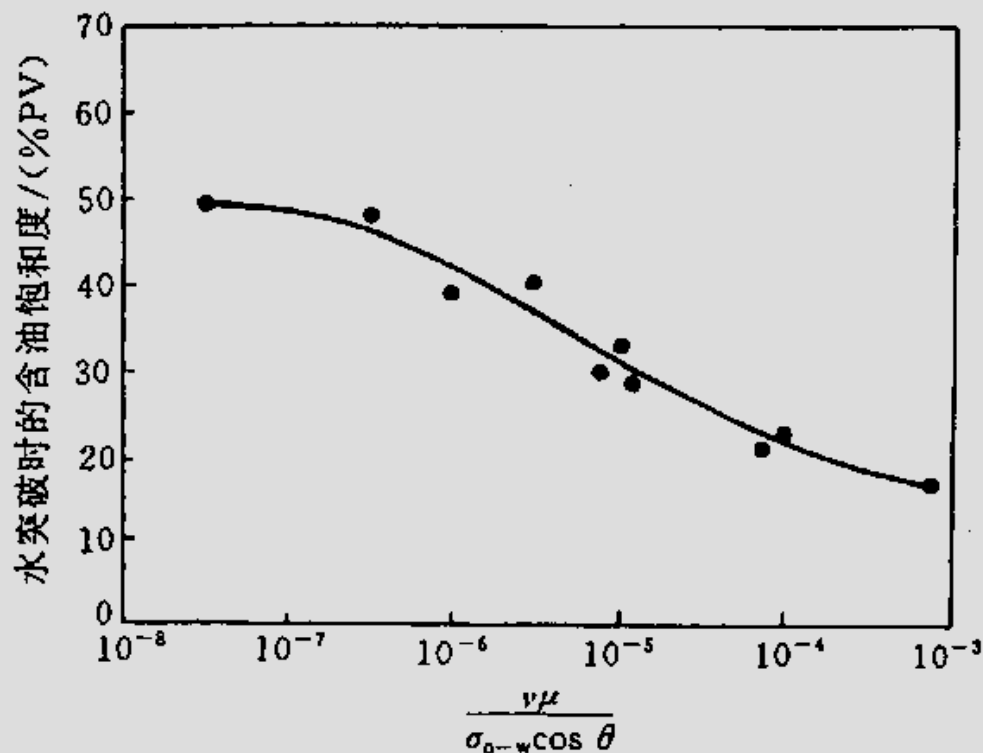
## § 2-5 剩余油及其可流动性

剩余油饱和度的大小主要受粘滞力和毛管力影响

$$\frac{\text{粘滞力}}{\text{毛管力}} = \frac{v\mu_w}{\sigma_{o-w} \cos \theta}$$

定义:  $N_{ca} = \frac{v\mu_w}{\sigma_{o-w}}$

为毛管数





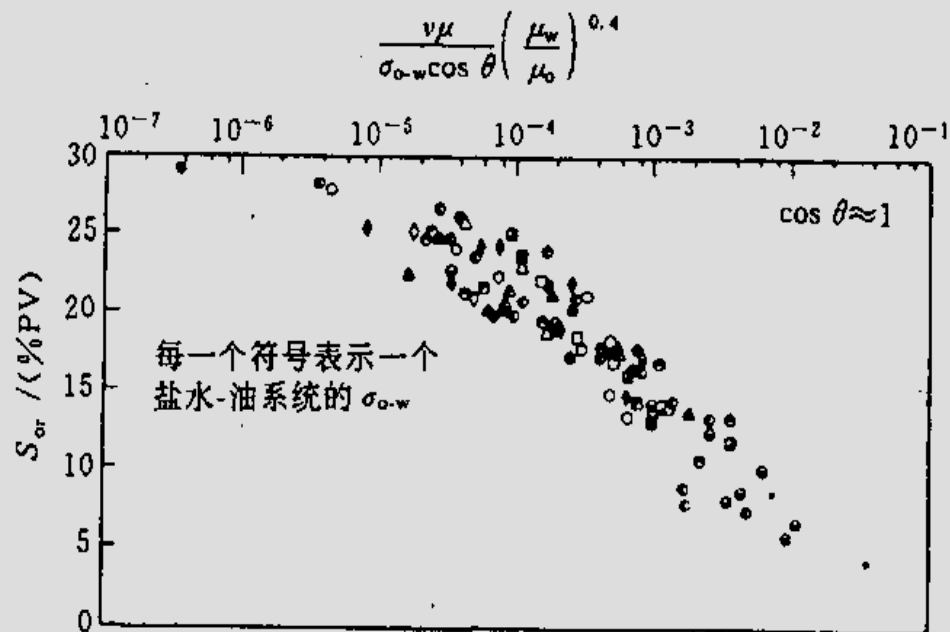
## § 2-5 剩余油及其可流动性

定义:  $N_{ca} = \frac{v\mu_w}{\sigma_{o-w}}$  为毛管数

定义:  $N_{cam} = \frac{v\mu_w}{(s_{oi} - s_{or})\sigma_{o-w} \cos\theta} \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right)^{0.4}$  为修正毛管数

拐点表示了以毛管力为主过渡到以粘滞力为主的转化。过渡带在  $N_{cam} 10^{-4} \sim 10^{-5}$  范围内。

建立剩余油与毛管数关系，有利于判断在何种条件下剩余油与注水速度无关，以及确定水驱后剩余油的最终采收率。



## § 2-5 剩余油及其可流动性

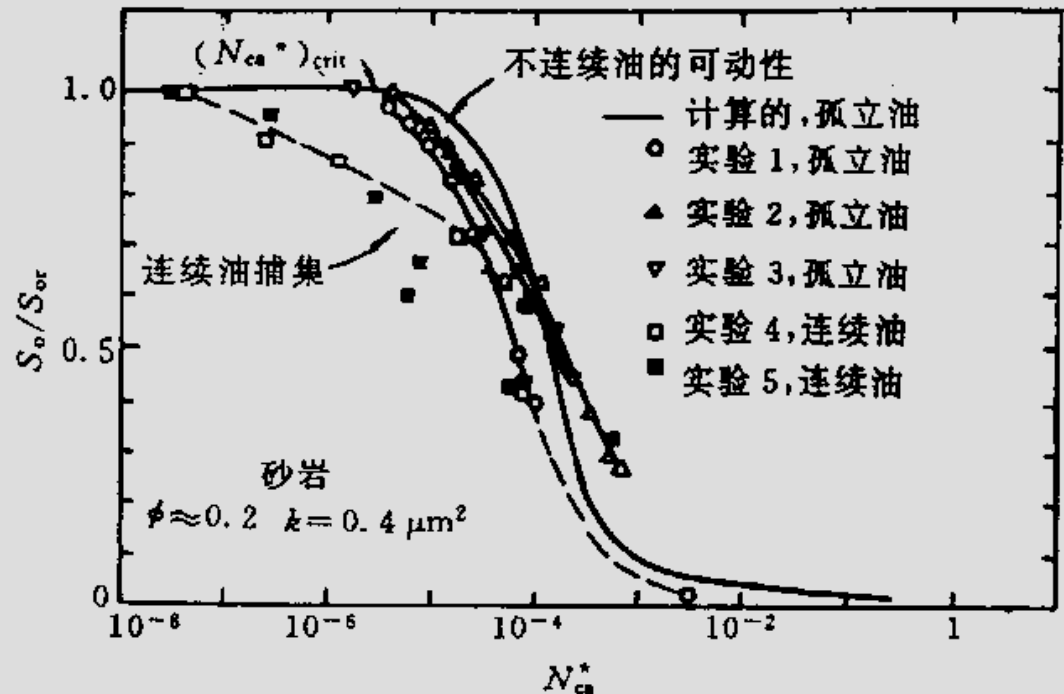
定义:  $N_{ca} = \frac{v\mu_w}{\sigma_{o-w}}$  为毛管数

定义:  $N_{cam} = \frac{v\mu_w}{(s_{oi} - s_{or})\sigma_{o-w} \cos\theta} \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right)^{0.4}$  为修正毛管数

定义:  $N_{ca}^* = \frac{u\mu_w}{\sigma_{o-w}} = \phi N_{ca}$  为达西速度毛管数

$N_{ca}^* < 10^{-5}$  时,

剩余油不流动



## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2-6 改善水驱的水动力学方法

剩余油富集区通常分布在：

- (1) 断层附近地区。边界断层附近，常留下较大剩余油集中区，井间断层附近也常留下小块滞留区。
- (2) 岩性复杂地区。包括河道砂体的没滩或边滩等部位，以及岩性尖灭线附近地区等。
- (3) 现有井网控制不住的小砂体或狭长条形砂体等。
- (4) 注采系统不完善地区。注采井网布置不规则地区，如注水井过少的地区或受效方向少的井附近等。

## 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

### § 2-6 改善水驱的水动力学方法

- (5) 非主流线地区。虽然该地区的注采系统较完善，但两相邻水井间的分流区仍滞留有余油，而且分布分散。如在此打加密井往往初期含水比较低，但很快就会上升。
- (6) 微构造部位。由于注入水常向低处渗流，当微构造部位无井控制时，常会滞留有余油。

# 第二章 非混相驱替注水开发指标计算

## § 2-6 改善水驱效果的水动力学方法

水动力学方法：

- ◆ 周期注水（不稳定注水）
- ◆ 改变液流方向
- ◆ 强化注采系统的变形井网
- ◆ 补充点状和完善排状注水系统
- ◆ 提高排液量
- ◆ 堵水与调剖技术
- ◆ 各种调整方法的结合

## § 2-6 改善水驱效果的水动力学方法

水动力学方法：

- ◆ 周期注水（不稳定注水）
- ◆ 改变液流方向
- ◆ 强化注采系统的变形井网
- ◆ 补充点状和完善排状注水系统
- ◆ 提高排液量
- ◆ 堵水与调剖技术
- ◆ 各种调整方法的结合

## § 2-6 改善水驱效果的水动力学方法

水动力学方法：

- ◆ 周期注水（不稳定注水）
- ◆ 改变液流方向
- ◆ 强化注采系统的变形井网
- ◆ 补充点状和完善排状注水系统
- ◆ 提高排液量
- ◆ 堵水与调剖技术
- ◆ 各种调整方法的结合

## § 2-6 改善水驱效果的水动力学方法

### 周期注水机理：

周期注水就是周期性地改变注入量和采出量，在地层中造成不稳定的压力场，使流体在地层中不断地重新分布，从而使注入水在层间压力差的作用下发生层间渗流，促进毛管吸渗作用，增大注入水波及系数及洗油效率，提高采收率。

### 影响周期注水因素：

一是地层参数，包括层状非质性和各层间的水动力不连通程度；

二是注水方式参数，包括周期注水前开采时间、注水量变化幅度和注水频率等指标。



## § 2-6 改善水驱效果的水动力学方法

影响周期注水因素：

层状非质性：小层间渗透率差别大，效果好。

水动力不连通程度： $\psi = 0.5$  为极限值

周期注水时机：尽早实施，效果更好。

幅度因数： $B = b \beta$

注水半周期： $t_{\text{半周期}} = \frac{0.5L^2}{\kappa}$

