

砂岩油田注水开发合理井网 研究中的几个理论问题

齐 与 峰

(石油勘探开发研究院)

提 要

本文在考察了油田开发历史上所形成的研究成果之后,提出并解决了应进一步研究的几个理论问题。在由许多互不连通或连通很差的含油砂体所组成的油层条件下,推导出井网对水驱采收率影响的理论表达式。应用本公式,再联系其它有关各方面,形成了井网研究的系统科学理论。同时还报导了这一理论的应用效果,论及了合理井网存在原因、确定方法,指出了由此引出的很有实用价值的新观点,并强调了“五点法”注水在一定条件下所具有的优越性。

一、前 言

合理井网的研究,在砂岩油田注水开发设计和调整工作中,一直是受到人们重视的课题^[1]。40年代,提出了在均质单层和流度比为1的条件下,见水时刻扫油面积系数与注水方式间的理论^[2]。1952年以后,研究并搞清了在任意流度比条件下,见水后扫油面积系数在水驱油过程中的变化^[3]。随着数值模拟和大型物理模拟技术的发展,井网对非均质单油层采收率影响的研究得以广泛展开,得出井网与单油层采收率无关,注水方式的影响也仅限于无水期和含水期。这一结论,在油田开发史上曾产生过重大影响。50年代末,有人倡导“稀井网大压差”^[4],并大规模地付诸实施,然而在实践中却受到了挫折。60年代,苏联谢嘉乔夫将油田开发末期采收率的实际数据加以整理,得到富有成效的结果^[5],从此,开辟了一个新领域。他首次找到油田最终采收率 η 和井网密度 S 间的关系公式, $\eta = \eta_0 e^{-\alpha S^{1.01}}$ 。但是,这个关系的理论研究,至今尚未见到进展。与此同时,大庆油田提出“按油砂体大小布井”的观点,按油砂体图来统计水驱控制程度与井网的关系,作为开发决策的依据,已在全国范围内推广,实践的成功揭示了在一定条件下,井网可以大幅度影响最终采收率的机制。本文从上述机制出发,导出了井网理论的基本关系式。文献[7]研究了在注采平衡且产油(吸水)指数恒定条件下,研究注采井数比与总渗流阻力之间的关系,并从中找到获得最大产量的注水方式。由于合理井网是多种因素相互作用的产物(诸如油田地质、地下流体性质、国家要求、电能供应、采油工艺、地面基建和经济效益等),是研究对象功能良好的存在形式,而寻找这种功能的方法即系统方法。几年前,研究合理井网的系统方法在文献[8]中开始出现,但没有发表该方法在形成过程中所建立的基础公式和应用效果。本文就井网对水驱采收率影响的理论表达式

的形成过程进行了补充, 阐明了应用文献[8]引出的结论就是井网研究的系统理论, 并介绍了该理论的应用效果以及由此产生的具有实际指导意义的新观点。考虑到对单油层注水开发合理井网的研究已有过定论, 所以本文直接就从井网对油砂体的钻遇规律研究开始。

二、油砂体钻遇率

井网对水驱控制的程度直接影响采收率, 对那些只被油井钻遇而未被水井打开或只被水井钻遇而未被油井打开的油砂体或它的一翼, 其中所含原油不可能受到注入水的驱排冲刷, 这种含油砂体, 从中只能采出很少油量, 应划归为损失储量; 对一口井也未钻遇的含油砂体尤其如此。因此, 只有被油水井同时钻遇的砂体, 其中的储量才能算水驱控制储量, 这种砂体的采收率可高达单层水驱采收率。所以, 提高水驱控制程度应成为一个追求的指标。但怎样才能实现这一要求呢? 油田开发的历史实践证明, 在考虑开发井位时, 因层组内砂体众多, 不能仅从照顾砂体的具体情况出发, 而只能着眼于适应大多数砂体要求, 采用均匀井网或分片均匀井网。正确选择注水方式和井网密度。这样, 建立水驱控制程度和井网间理论函数关系, 以寻求最合适的井网, 就成为一项十分重要的任务了。

本文的研究工作是从单个砂体开始, 再推广到油层条件去。注水方式种类虽多, 分析认为任何注水方式都是由平行四边形井网单元拼接而成, 矩形可视为平行四边形的特例, 图1表示这种抽象的结果。井网单元各有特点, 如夹角大小, 角点上的井别, 反映了不同的注水方式。设井网单元边长为 a , 高度为 b , 总面积 $S = ab$, 高长比 $\xi = b/a$ 。可知, 五点法 $\xi = \frac{1}{2}$; 四点法 $\xi = \frac{\sqrt{3}}{2}$; 反九点法 $\xi = 1$; 行列井网 $\xi =$ 排距与井距比。

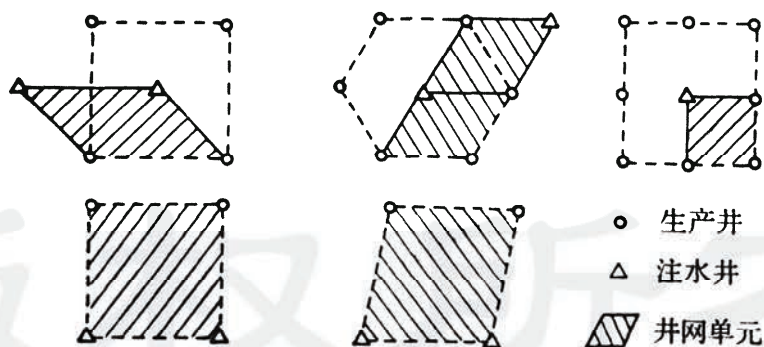


图1 注水方式与井网单元

Fig. 1 The regime of water injection and well pattern unit

其次, 对砂体形态也应加以抽象。因油层中的砂体, 不仅数量众多, 而且形态各异, 若不经抽象, 研究工作就无法进行, 问题在于正确抽象, 这是至关重要的。从总体上看, 影响水驱控制程度的是砂体的面积, 而不是它的形态, 因此, 可把砂体形态一律抽象为圆形, 让圆的面积同砂体面积相等。为文字简化起见, 以下凡谈到砂体之处, 均指圆形油砂体。

设砂体的半径为 R ，若在一个砂体上只钻遇一口油井和一口水井者为单向连通，概率设为 P_1 ，若同一砂体上钻遇两口注水井（生产井）和一口生产井（注水井）者为双向连通，概率设为 P_2 ，若同一砂体上至少钻到一口水井（油井）与三口油井（水井）或油水井各占两口者称为三向连通，概率设为 P_3 。下面以五点法为例，研究连通概率的确定方法。

五点法井网单元的形态特点是注采井距相等。当随机钻遇某个砂体时，砂体之圆心必落在一个井网单元之中，这个砂体是否能同时被油水井钻遇，这就决定于砂体的大小了。

已知注采井间距为 $a/\sqrt{2}$ ，当砂体半径为 $R \in \left[\frac{a}{2\sqrt{2}}, \frac{a}{\sqrt{2}} \right]$ 时，分别以注采井位为圆心画圆，把两两相交的面积记为 S_2 ，见图 2 之下半图。显然，凡是圆心落入 S_2 内的砂体必为水驱控制，反之，圆心落入 S_2 面积之外者必然为储量损失部分。两者是互斥的。故单向连通概率 $P_1 = S_2/S$ 。其中：面积 S 已知， S_2 也是容易计算的。由于圆心坐标已知，半径已知，故可很容易地写出各自的圆周方程式，并求出圆周上的交点，通过积分可找到 S_2 的计算公式。详见附录。

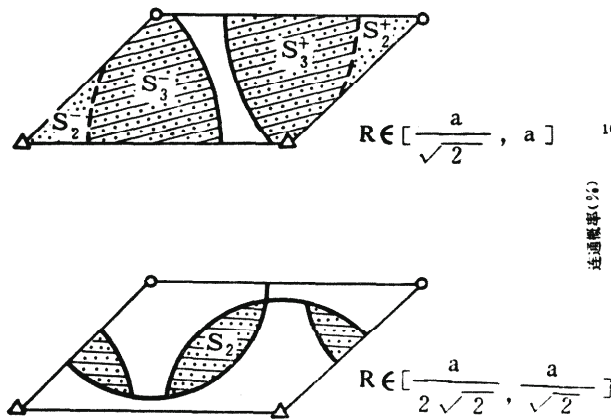


图 2 五点法连通概率示意图

Fig. 2 A schematic showing the interconnection probability in a 5 points pattern water injection system

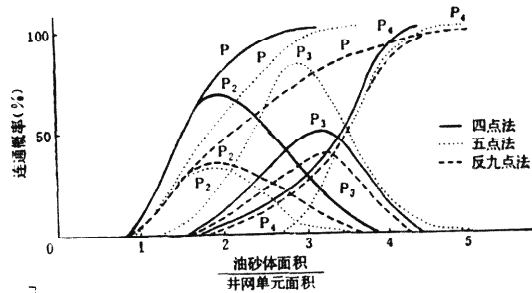


图 3 面积注水连通概率曲线

Fig. 3 The curves showing interconnection probability in pattern water injection

当砂体半径 $R \in \left[\frac{a}{\sqrt{2}}, a \right]$ 时，圆的半径增大，这时仍以注采井位为圆心，以 R 为半径画圆，两圆或三圆相交部分见图 2 上半图。三个圆相交的区域记为 S_2^+ 和 S_3^+ ，即是说，若油砂体圆心落入 S_2^+ 或 S_3^+ 域内，则油砂体必为双向连通；落入 S_2^- 或 S_3^- 者，油砂体必为单向连通；而落入其它部位者，则为损失储量，出现的概率 $P_2 = (S_2^+ + S_3^+) / S$ ， $P_1 = (S_2^- + S_3^-) / S$ ，均可采用与上述相似的办法找出计算公式。当砂体半径 $R \in \left[a, \sqrt{\frac{5}{2}}a \right]$ 时，出现了三向连通砂体。如此继续做下去，当 $R > \sqrt{\frac{5}{2}}a$ 时，砂体内有一个完整井组的概率为 1。

至于四点法、反九点法、行列井网，均可采用类似的办法找到它们连通概率式。

设油砂体面积为 ω ，引入无因次变量， $\eta = \omega/S$ 。各种注水方式下的连通概率计算公式已分列于附录中，计算的结果见图3。由图3看出，在已知面积的砂体中，欲想得到较高的水驱控制储量，不仅要有合适的井网密度，而且要有正确的注水方式；还可看出，平均井网单元面积为油砂体面积的三分之一左右为宜，过低的井网密度会增加水驱损失储量；在相同油层和相同井网密度下，五点法的水驱控制能力最强，反九点法的控制能力最差。最后，还应该说明，当油层中砂体数目众多，且无共同长轴走向时，上述方法也可推广到行列井网。

三、油田水驱控制程度

在油田实际问题中，油层是由许多大小不一的油砂体所组成的，在不同地区，不同类型油层内，在面积大小不同的砂体中，其储量所占的比例也不一样。以大庆油田北二、三区10个油层组为例（图4），萨Ⅱ组与萨Ⅲ组相差很大，前者以小砂体为主组成，后者由大砂体为主组成。设面积与累积储量分布函数关系为 $F(\omega)$ ，油田采收率为 K_c ，根据连通概率

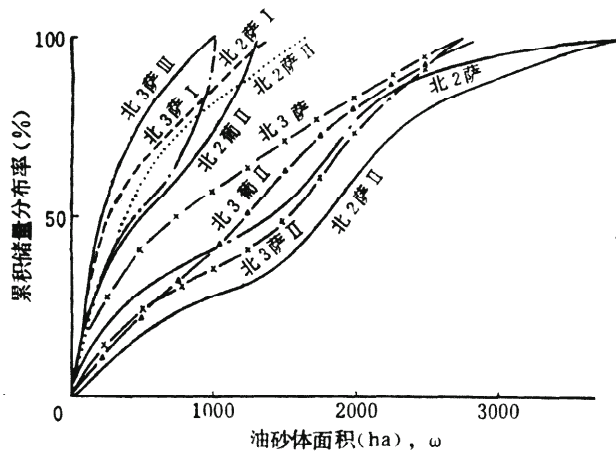


图4 萨尔图油田北二、三区10个油层组储量分布概率关系曲线

Fig. 4 Curves showing the reserve distribution in 10 subformations in North II, III area of Saertu Oilfield

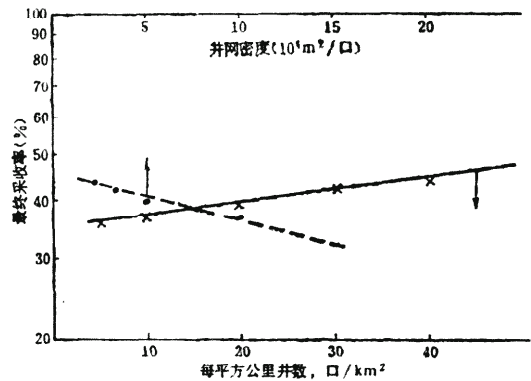


图5 北三区萨Ⅰ组理论计算曲线 (大庆油田)

Fig. 5 Theoretical calculation curves for Sa I group North III Area (Daqing Oilfield)

的定义，可知

$$K_c = \eta_0 \int_0^{\infty} (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) dF(\omega) \quad (1)$$

式中 η_0 为单油层水驱最终采收率，这个数据同注水方式及井网密度均无关系。式(1)给出了从单个油砂体钻遇率过渡到全油田砂体钻遇率，乃至到油田最终采收率的计算公式。这是一个理论公式，下面是对该式的检验。

首先考察公式(1)同谢嘉乔夫经验公式的关系。公式(1)考虑了注水方式和井网密度两个因素的影响，而经验公式只考虑井网密度一个因素。大庆油田北三区萨Ⅰ组油层是用

四点法面积井网开发的，至今虽然难以取得准确的最终采收率数据，但大致也可以作为一个检验的标准。由(1)式计算四点法条件下井网密度与采收率的关系。计算是通过数值积分而完成的，结果见图5。图中虚线表示井网密度同采收率间的关系。虚线在一定范围内为直线，说明注水方式固定后理论计算结果同谢嘉乔夫的结论是一致的。实线可用于预测该开发层系的最终采收率，每平方千米30口井时最终采收率可达41%左右。

公式(1)是严格的，但使用起来很不方便，下面设法寻找一个实用计算公式。设 λ 为砂体的水驱控制程度， e 是采注井数比， d 为注采井距(反九点法时指最小注采井距，单位为m)，并设 ψ 是面积校正系数，其定义参见图6。把单向连通、双向连通和多向连通均视为连通，利用图中连通概率 P 与横坐标的关系，把各种注水方式综合找出一个近似表达式。其工作步骤如下：先建立一个

新坐标系， $\frac{1-\lambda}{\sqrt{e}}$ 为纵坐标，以 $S/\psi d^2$ 为

横坐标，并把图3上的数据绘于半对数坐标

纸上。此后，我们发现了一个很好的直线关系(图6)，此图说明单个砂体的水驱控制程度可用下式近似：

$$\lambda = 1 - \sqrt{e} e^{-C_0 \cdot 10^5 / (\psi d^2)} \quad (2)$$

(2)式中 e 和 ψ 表示注水方式影响， C_0 为与砂体大小有关的常数。设 $F(C_0)$ 是砂体大小累积分布函数，油田水驱控制程度可通过积分后获得：

$$\bar{\lambda} = \int_0^{\infty} \lambda dF(C_0) \quad (3)$$

因累积分布函数 $F(C_0)$ 是连续而有界的，由积分中值定理，约在分布密度峰值附近总可找到一个 C_0^*

$$\bar{\lambda} = 1 - \sqrt{e} e^{-C_0^* \cdot 10^5 / (\psi d^2)} \quad (4)$$

因而完成了油田水驱控制程度近似式的推导。至于式(4)中 C_0^* 值的确定方法，可有两个途径。一个是在开发设计时，从已统计的油田水驱控制程度中找一个平均数值，然后用它来反求 C_0^* ；另一途径是从已投入开发的油田动态数据中识别它。已知 C_0^* 之后，公式(4)是很实用的，其计算精度足以满足生产的需要。公式(4)就是图6和公式(1)的近似表达式。式(4)的形成，建立了研究合理井网的地质基础。

四、合理井网研究中的系统理论

文献[1]中把谢嘉乔夫关于最终采收率与井网密度关系的经验公式同每口井的投资总额联系起来，建立了净收益与井网密度关系式，表达了因井距缩小，采收率提高，收入增加，和因

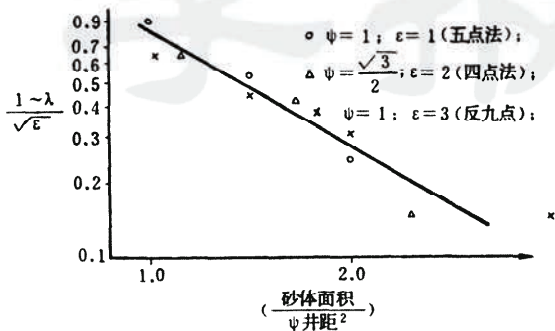


图6 水驱控制程度与砂体相对面积

Fig. 6 Degree of waterflooding controlled and relative area of various sand facies

打井数目增多而投资增加之间的差值关系。文献[1]还利用求无约束极值的方法确定合理井距。这是研究合理井网数值的好方法。文献[7]着眼另一角度，它把注水方式（通过注采井数比）与渗流阻力（通过采油指数）联系起来，寻找在一定压差下（或称单位能耗下）产量最大的注水方式，揭示了合理井网在降低能耗方面的特性。这两篇文章都是从对立双方相互作用的效果中考察问题，即是从系统观点出发去研究改善系统功能的途径，应该说是井网系统理论在一定阶段上的成果。然而实际问题本身并不这样简单，注水方式不仅是影响渗流阻力的因素，也是影响采收率的因素。此外，井网影响生产过程，生产过程又要求地面基建规模与之相协同，要求采油工艺技术所支持，要求油水井工作制度配合合理、供电能力允许等，由此看来，合理井网的解决与一个复杂系统研究相联系。通过建立系统模型，借助现代科学方法，运用计算机，自动地确定改善系统功能的途径，这就是完善的井网系统理论。这方面的工作在文献[8]中已进行了初步报导，它是解决合理井距、合理注水方式、合理工作制度以及其他合理协同关系问题的正确方法。本文是它的一些补充，特别是把文献[8]中所提供的方法在孤东油田中的应用效果补充进来。应申明，文献[8]中所提出的系统模型，是为油田开发设计的需要而建立的，即是说，在人们对于油层参数只获得分层平均数值的前提下进行工作，这时，计算生产指标的公式也只能做相应地简化，以能否满足开发设计要求为准，对油田生产动态只要求了解到分层综合数据。

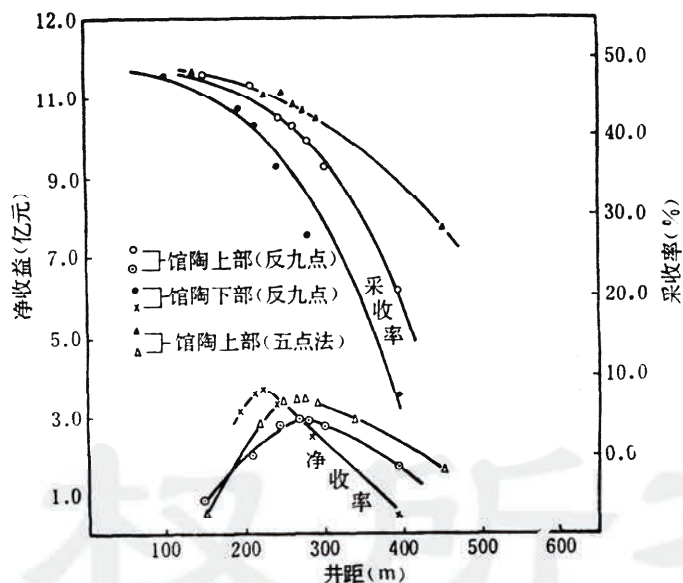


图7 合理井距（孤东油田中区）

Fig. 7 Proper distance between wells (middle area in Gutong Oil Field)

图7右边纵坐标为油田最终采收率，是用公式（4）乘上单层最终采收率求得，它同井距的关系一目了然。“○”和“▲”两条曲线都是采用馆陶组上部油层数据计算的，在稀井网密度下，这两条曲线的差别则很显著，原因是由于注水方式不同而造成。孤东油田各开发层系均属河流相沉积，砂体比较小，在此前提下，五点法的水驱控制程度明显高于反九点

法及其他注水方式, 这个观点上述理论研究中已经指出, 而从孤东油田应用效果的实例研究中, 也进一步得到检验。

图7下部曲线的纵坐标在左边, 表示净收益(即扣除各项投资后的采油收入)。标有“△”, “⊙”, “×”符号的三条曲线, 分别表示不同的注水方式及不同开发层系。每条曲线都出现一个高峰值, 应以净收益最多相应的井距为合理井距。“⊙”曲线是采用馆陶组上部油层参数计算而得到的, 峰值处的井距近似于300m, 在此井距下所获得的最终采收率为42%左右(此值并非最高值, 只是再加密井距时, 最终采收率值所增加的幅度就不大了)。当然, 合理井距还同原油的价格有关, 图7中所用的原油价格为100元/吨, 若提高油价, 合理井距还可缩小。“△”和“⊙”两条曲线所用的计算参数相同, 唯注水方式不同, 由此所获得的峰高值竟相差0.6亿元, 直接显示出选用五点法经济效益的优越性, 相应地, 最终采收率值也提高2%多一些。“×”曲线是馆陶组下部油层参数计算得到的, 合理井距仅为220m, 对应的净收益峰值最高, 原因是下部油层储量高, 倘若注水方式由反九点法改为五点法之后, 其效果还将会更好一些。这些结论, 在孤东油田开发设计中均作为新观点已被采用。五点法不但提高采收率, 同时也减少能耗提高经济效益。

五、结 论

1. 继文献[8]之后, 本文提出了井网系统理论, 并得到了矿场实践的检验, 发挥了很好的效益。在它的指导下, 不仅可提高油田最终采收率, 同时还可提高经济效益, 现已发展到了成熟阶段。

2. 在含油砂体多且砂体小的情况下, 选用五点法注水方式比其它注水方式要优越得多, 特别应说明, 反九点法开发效果最差。

3. 文中所建立的关于水驱控制程度的理论公式, 把前人的工作加以深化和理论化, 并经过实践的检验是正确的。

(本文收到日期1989年7月6日)

附 录

1. 反九点法 ($\xi = 1$)

$$(1) \text{ 当 } 0 < \eta \leq \frac{\pi}{4} \text{ 时, } P = P_2 = P_3 = P_4 = 0$$

$$(2) \text{ 当 } \frac{\pi}{4} < \eta \leq \frac{\pi}{2} \text{ 时, } P_3 = P_4 = 0,$$

$$P = P_2 = \frac{2}{\pi} \cdot \eta \cdot \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\eta}{\pi} - 1}$$

$$(3) \text{ 当 } \frac{\pi}{2} < \eta \leq \pi \text{ 时, } P_4 = 1 + \frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} -$$

$$\frac{2}{\pi}\eta \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{4\eta}} - \sqrt{\frac{4\eta}{\pi}} - 1;$$

$$P_3 = \frac{3}{\pi}\eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} - \frac{3}{2}\sqrt{\frac{2\eta}{\pi}} - 1 - \frac{3}{2}P_4;$$

$$P_2 = \frac{2}{\pi}\eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{4\eta}{\pi}} - 1 - 2P_4 - \frac{4}{3}P_3;$$

$$P = P_2 + P_3 + P_4$$

(4) 当 $\pi < \eta \leq \frac{5}{4}\pi$ 时, $P_2 = 2 - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{4\eta}{\pi}} - 1 - 2\sqrt{\frac{\eta}{\pi}} - 1 -$

$$\frac{2}{\pi}\eta \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} + \frac{2}{\pi}\eta \cdot \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}},$$

$$P_3 = \frac{3}{\pi}\eta (\text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} - \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} +$$

$$\text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{4\eta}}) - \frac{3}{2}\sqrt{\frac{2\eta}{\pi}} - 1 + \frac{3}{2}\sqrt{\frac{4\eta}{\pi}} - 1 - \frac{3}{2} -$$

$$\frac{6}{\pi}\eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}} + 6\sqrt{\frac{\eta}{\pi}} - 1,$$

$$P_4 = \frac{1}{2\pi}\eta (\text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} - \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}})$$

$$+ \sqrt{\frac{\eta}{\pi}} - 1 - P_3 - P_2, P = P_2 + P_3 + P_4$$

(5) 当 $\frac{5\pi}{4} < \eta \leq \frac{25}{18}\pi$ 时, $P_2 = 0$, $P_3 = \frac{3}{\pi}\eta (\text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} +$

$$\text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} + \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{4\eta}}) + \frac{6}{\pi}\eta (\text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{5\pi}{4\eta}} -$$

$$\text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}} - \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}}) + \frac{9}{2} - \frac{3}{2}\sqrt{\frac{2\eta}{\pi}} - 1 -$$

$$3\frac{\sqrt{5}}{2}\sqrt{\frac{4\eta}{\pi}} - 5, P_4 = \frac{\eta}{2\pi} (\text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} - \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}}) +$$

$$\sqrt{\frac{\eta}{\pi}} - 1 - P_3, P = P_3 + P_4$$

(6) 当 $\frac{25}{18}\pi < \eta \leq 2\pi$ 时, $P_2 = P_3 = 0$,

$$P = P_4 = \sqrt{\frac{\eta}{\pi} - 1} + \frac{\eta}{2\pi} \left(\text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} - \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}} \right)$$

(7) 当 $\eta > 2\pi$ 时, $P_2 = P_3 = 0$; $P = P_4 = 1$

2. 五点法 ($\xi = \frac{1}{2}$)

(1) 当 $0 < \eta \leq \frac{\pi}{4}$ 时, $P = P_2 = P_3 = P_4 = 0$

(2) 当 $\frac{\pi}{4} < \eta \leq \frac{\pi}{2}$, $P_3 = P_4 = 0$,

$$P = P_2 = \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} - \sqrt{\frac{4\eta}{\pi} - 1}$$

(3) 当 $\frac{\pi}{2} < \eta \leq \pi$ 时, $P_4 = 2 - 4\beta + 4 \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - \left(\beta - \frac{1}{2} \right)^2} +$

$$\frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \left[\left(\beta - \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right] - 4\beta \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - \beta^2} - \frac{2\eta}{\pi} \text{ARCSIN} \left(\beta \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right) + \eta$$

$$\text{式中 } \beta = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{4\eta}{\pi} - 1}, P_3 = \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} -$$

$$2 \sqrt{\frac{2\eta}{\pi} - 1} - 2P_4, P_2 = \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4\eta}} - \sqrt{\frac{4\eta}{\pi} - 1} -$$

$$\frac{8}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} + 4 \sqrt{\frac{2\eta}{\pi} - 1}, P = P_2 + P_3 + P_4$$

(4) 当 $\pi < \eta \leq \frac{5}{4}\pi$, $P_4 = -4\beta + 4 \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - \left(\beta - \frac{1}{2} \right)^2} +$

$$\frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \left[\left(\beta - \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right] - 4\beta \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - \beta^2} -$$

$$\frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \left(\beta \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right) + \eta + \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{\eta}} - 4 \sqrt{\frac{\eta}{\pi} - 1} +$$

$$2 \sqrt{\frac{2\eta}{\pi} - 1} - \frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{1 - \frac{\pi}{2\eta}} + \frac{2}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{2\eta}},$$

$$P_3 = \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{2\eta}} + 2 \sqrt{\frac{2\eta}{\pi} - 1} - 4 - 2P_4, P_2 = 1 - P_3 - P_4, P = 1$$

(5) 当 $\frac{5}{4}\pi < \eta \leq \frac{25}{18}\pi$ 时, $P_2 = 0$, $P_3 = 24(1 - \gamma) +$

$$8(\gamma - 1) \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - (\gamma - 1)^2} + \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \left[(\gamma - 1) \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right] -$$

$$2 \sqrt{\frac{2\eta}{\pi} - 1} - \frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \sqrt{\frac{\pi}{2\eta}} + 8 \left(\gamma - \frac{1}{2}\right) \sqrt{\frac{\eta}{2\pi} - \left(\gamma - \frac{1}{2}\right)^2} +$$

$$\frac{4}{\pi} \eta \text{ARCSIN} \left[\left(\gamma - \frac{1}{2}\right) \sqrt{\frac{2\pi}{\eta}} \right], \text{ 式中, } \gamma = \frac{3}{4} \left(1 + \sqrt{\frac{4\eta}{5\pi} - 1}\right),$$

$$P_4 = 1 - P_3; P = 1。$$

$$(6) \text{ 当 } \eta > \frac{25}{18} \pi \text{ 时, } P_2 = P_3 = 0; P = P_4 = 1$$

参 考 文 献

- [1] 俞启泰, 计算水驱砂岩油藏合理井网密度与极限井网密度的一种方法, 石油勘探与开发, 1986年, 13卷, 第4期
- [2] 刘留宁译, 地下水力学, 中国工业出版社, 1964年
- [3] A. B. Dyes, B. H. Caudle and R. A. Erickson Oil Production after Breakthroughs Influenced by Mobility Ratio. Trans. AIME 1954, 201, 81
- [4] 苏·克磊洛夫著, 油田开发科学原理, 石油工业出版社, 1956年
- [5] В. Н. Шелкачев, Влияние на Нефтеотдачу Плотности Сетки Скважий и их Размещения. Нефтяное Хозяйство. 1974, No. 6, С. 26~30
- [6] М. Х. Хуснулин, Э. П. ХалаБуда, Метод Оптимизации Плотности Сетки Скважин, Нефтяное Хозяйство, 1983, No. 11, С. 31-35
- [7] 童宪章, 从注采平衡角度出发比较不同面积注水井网的特征和适应性, 国际石油工程会议论文集, 中国 1982年3月
- [8] 齐与峰等, 油田开发总体设计的最优控制法, 石油学报, 1987年, 第1期

SOME THEORITICAL CONSIDERATIONS ON OPTIMAL WELL PATTERN ANALYSIS IN A WATER FLOODING SANDY OIL RESERVOIR

Qi Yufeng

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development in China)

Abstract

After reviewing the works reported in the history of oilfield development, several theoretical consideration which should still be studied further in well pattern analysis, were proposed and solved in this paper. In the case of a reservoir composed of numerous disconnected or badly interconnected sandbodies essential formulas are derived to express the effect of well pattern on oil recovery by water flooding. Based on these a method of system science in pattern studies is proposed by integrating these results with those from other related aspects. This paper gives the effectiveness of its applications, indicates the existence of an optimal solution and its method of determination. Finally, some useful viewpoints are outlined, especially on the advantages of 5-spot method.