

引用格式:罗宪波,常会江,雷源,等.注水井优化配注方法应用现状及发展方向[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):223-232.

LUO Xianbo, CHANG Huijiang, LEI Yuan, et al. Application status and development direction of optimal injection allocation method for water injection wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 223-232.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.011

注水井优化配注方法应用现状及发展方向

罗宪波,常会江,雷源,翟上奇,孙广义

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:针对现有注水井优化配注方法缺乏统一性和规范性的问题,以注水井优化配注涉及的关键参数纵向劈分系数、平面劈分系数和注采比3个方面为切入点,对国内外学者在注水井优化配注方面的研究进行总结和归纳,得到了适用于不同场合下的注水井优化配注计算方法。在此基础上以采油井为中心,提出了注水井优化配注新方法。新方法重点强调了注水井的优化配注应根据不同地质油藏特征、油田开发阶段、配注精度需求等因素选择不同的优化配注参数计算方法,从而使油田优化注水效果最佳。并将优化配注新思路在矿场进行试验,实现区块日增油幅度高达10%(日增油 20 m^3)的良好开发效果。最后指出了未来优化注水方向必然是基于人工智能的注水方案设计、智能优化和同步调整为核心的油藏和采油工程一体化。以上注水井优化配注方法,对不同类型不同开发阶段油田的注水工作具有指导意义。

关键词:配注方法;层段;纵向劈分系数;平面劈分系数;注采比

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Application status and development direction of optimal injection allocation method for water injection wells

LUO Xianbo, CHANG Huijiang, LEI Yuan, ZHAI Shangqi, SUN Guangyi

(Bohai Petroleum Research Institute, CNOOC China Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

Abstract: There is a lack of uniformity and standardization of the existing optimal injection allocation method. Therefore, three key parameters involved in the optimization of water injection well allocation, which are longitudinal splitting coefficient, plane splitting coefficient and injection-production ratio, are taking as the breakthrough point. And then, the research on the allocation optimization of injection wells by the scholars at home and abroad is summarized. Finally, the calculation method of injection well allocation suitable for different occasions is obtained. On this basis, a new idea of optimizing injection allocation for water injection wells is proposed with the oil production wells as the center. This new idea emphasizes that for the optimal injection allocation of the water injection wells, the optimal injection parameter calculation method should be selected according to different geological reservoir characteristics, oilfield development stages, injection accuracy and other factors, so that to make the oilfield optimized water injection effect best. After this method is applied to the field test, a good development effect is achieved with a daily oil increase of up to 10% (daily oil increase of 20 m^3) in the block. In general, the optimization of water injection direction in the future must be the integration of reservoir and oil production engineering with the water injection scheme design, intelligent optimization and synchronous adjustment are the core based on artificial intelligence. The proposed optimized injection well allocation method has guiding significance for the water injection work of different types of oilfields at different stages of development.

Keywords: injection allocation method; interval; longitudinal splitting coefficient; plane splitting coefficient; injection-production ratio

收稿日期:2021-04-15。

第一作者简介:罗宪波(1975—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事油气田开发工程方面的研究。地址:天津市滨海新区海川路2121号海洋石油大厦B座,邮政编码:300459。E-mail:luoxb@cnooc.com.cn

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整油藏工程技术研究”(2016ZX05025-001-007)。

中国大多数油田为砂岩油田,为实现油田高产稳产和提高采收率的目的,油田一般采用注水开发^[1-4],而在油田注水开发过程中如何实现注水井优化配注仍是一个难题,注水量过大会使得含水率上升过快,容易引起水窜、水淹;而注水量过小会使得地层能量补充不足,两种情况都会导致油田开发效果变差。因此,在油田开发过程中需要通过科学的计算指导优化注水解决这些矛盾。到目前为止,国内外学者针对注水某一方面进行研究,主要分为纵向劈分系数研究^[5-8]、平面劈分系数研究^[9-15]、合理注采比研究^[16-17]等,这些注水井优化配注方法缺乏统一性和规范性,这对矿场注水设计及优化极为不利。为解决该问题,在现有注水井优化配注技术的基础上,以油井为中心,基于“以液定注、按需分配、均衡压力”的核心思想提出了注水井优化配注新方法,并建立了优化配注“五清楚”理念,即:合理产量清楚、纵向劈分清楚、平面劈分清楚、注采比清楚、配注量及对比清楚。新方法重点强调了注水井的优化配注应根据不同地质油藏特征、油田开发阶段、配注精度需求等因素选择不同的优化配注参数计算方法,从而使油田优化注水效果最佳。该方法可以方便科研工作人员对注水井配注方法的查阅参考,又利于注水井合理配注方法的发展和完善。最后,随着计算机发展和网络技术的发展,优化注水也将进入智能化时代,分析智能优化调配等相关核心

技术,凝练发展路线,对优化注水智能化发展趋势进行展望。

1 注水井优化配注方法研究

1.1 优化配注新方法

在现有注水井优化配注技术的基础上,以油井为中心,基于“以液定注、按需分配、均衡压力”为核心思想提出了注水井优化配注新方法。首先以油井为中心先进行纵向产量劈分,如图1a所示;其次在进行平面产量劈分,如图1b所示。

所有油井按照上述原则进行劈分完毕之后,则注水井的配注量为:

$$Q_i = \sum_{k=1}^m \left[R \sum_{j=1}^n F_{hj} \alpha_{vk} (Q_{oj} + Q_{wj}) \right] \quad (1)$$

式中: Q_i 为注水井*i*的日配注水量, m^3 ; R 为注采比; F_{hj} 为油井*j*与注水井*i*之间在第*k*层的平面劈分系数; α_{vk} 为油井*j*在与注水井*i*第*k*层相对应的纵向劈分系数; Q_{oj} 为某一口油井*j*的日产量, m^3 ; Q_{wj} 为某一口油井*j*的日产水量, m^3 ; n 为注水井*i*在第*k*层周围受益所有油井井数; m 为油井*j*与注水井*i*在纵向上有注采连通关系的层数。

由式(1)可以看出,注水井的配注量主要受油井产量(日产量、日产水量)、平面劈分系数、纵向劈分系数及注采比4个方面的影响,因此注水井的优化

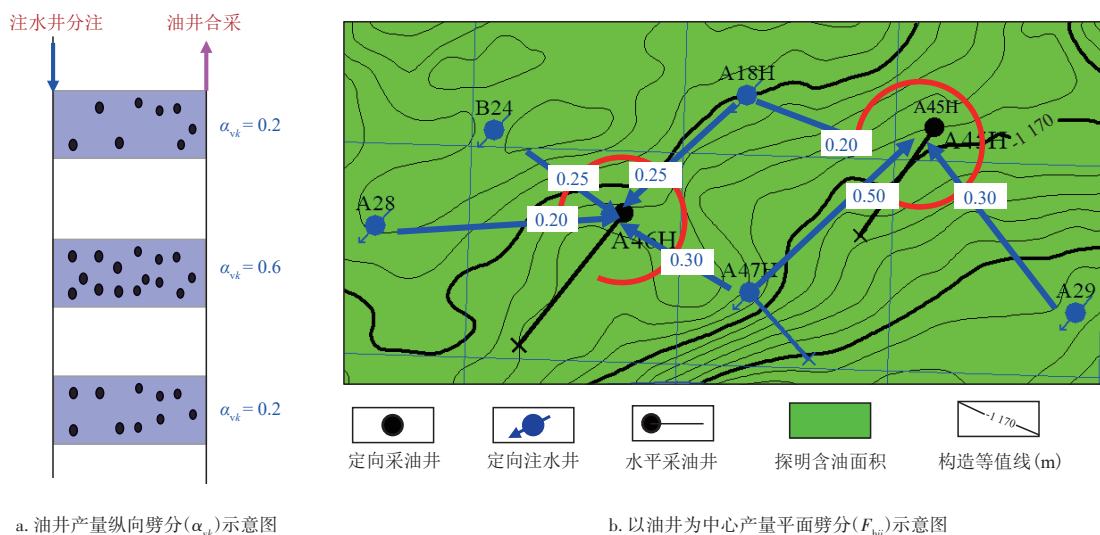


图1 以采油井为中心产量劈分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of production split centered on oil production wells

配注量就是从这4个方面进行说明,为此提出优化配注“五清楚”理念,即:合理产量清楚、纵向劈分清楚、平面劈分清楚、注采比清楚、配注量及对比清楚。优化配注新方法具体流程如图2所示。

优化配注新方法里关键点就是优化配注关键参数确定,而关键参数的确定需要根据油田地质油藏特征、油田开发阶段及优化配注精度及时间需求选择合适的方法计算得到。其中“五清楚”理念里面纵向劈分系数、平面劈分系数及注采比3个参数最为关键,该文主要围绕这3个参数展开相关研究分析。

1.2 纵向劈分系数研究

对于纵向劈分系数,目前油田开发中常使用的方法主要有两大类,即静态法和动态法。静态法包括地层系数法(KH)和油层厚度法(H),但该类方法确定的劈分系数在油田整个开发阶段不变,明显不符合油田实际生产情况。动态法有含水饱和度劈分法、剩余油法、驱替通量PA法,该类方法重点考虑到油田在不同的开发阶段中油水之间的变化带来的动态响应,更符合实际生产规律。由于静态法比较简单,该文重点分析几种动态法原理及优缺点。

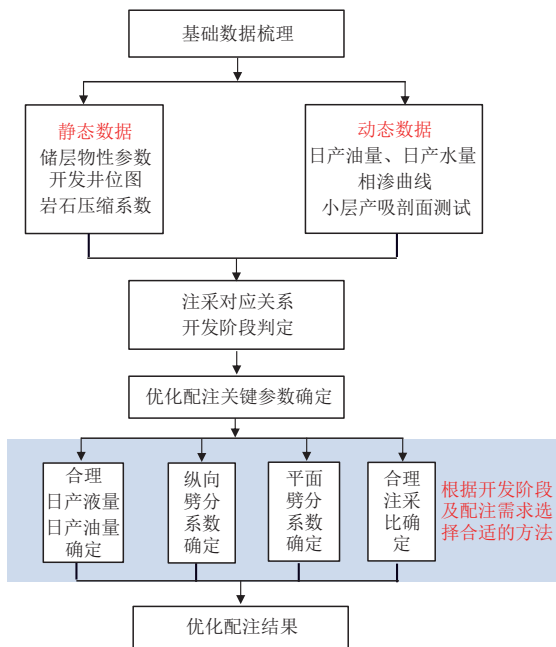


图2 注水井优化配注新方法流程

Fig. 2 Flow of a new method for optimal injection allocation of water injection wells

1.2.1 含水饱和度劈分法

张继成等^[5]在地层系数法(KH)基础上,考虑了小层含水饱和度这一反映生产过程的因素。根据含水率情况,分为无水采油期和见水采油期两个阶段,综合考虑单个生产层位的油层厚度、渗透率、含水率及实施的储层改造措施,并结合产液剖面测试资料对产量劈分结果进行修正,使劈分结果更准确。

油井在各个小层见水后,随着含水率的不断变化,油水相渗透率也会随之而变化。通过各个小层的相渗曲线可以得到油相相对渗透率、水相相对渗透率与含水率之间的函数关系,在此基础上可以将油井产油量和产水量分别进行劈分,劈分系数为:

$$\alpha_{\text{vok}} = \frac{R_k k_k \sigma_{ko}(f_{wk}) h_k}{\sum_{k=1}^m R_k k_k \sigma_{ko}(f_{wk}) h_k} \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{vwk}} = \frac{R_k k_k \sigma_{wk}(f_{wk}) h_k}{\sum_{k=1}^m R_k k_k \sigma_{wk}(f_{wk}) h_k} \quad (3)$$

式(2)一式(3)中: α_{vok} 为油井第 k 小层的产油量劈分系数; α_{vwk} 为油井第 k 小层的产水量劈分系数; $\sigma_{ko}(f_{wk})$ 为油井第 k 小层的油相相对渗透率; $\sigma_{wk}(f_{wk})$ 为油井第 k 小层的水相相对渗透率; f_{wk} 为油井第 k 小层的分层含水率; R_k 为油井第 k 小层的储层改造系数; h_k 为第 k 层的油层厚度, m 。

含水饱和度劈分法在地层系数(KH)法基础上,考虑了小层含水饱和度这一反映生产过程的因素,使得纵向劈分更为合理,通过产液剖面测试对劈分结果进行验证,劈分精度达到83%,同时该方法需要的参数(渗透率、储层厚度、含水率)容易获得,方便现场应用。

1.2.2 剩余油法

贾晓飞等^[6]在研究各个小层剩余技术可采储量分布状况的基础上,提出了以剩余油分布为基础的某一注水井每一个小层合理配注量的计算方法,该方法纵向劈分系数为:

$$\alpha_{vk} = \frac{N_k}{\sum_{k=1}^r N_k} \quad (4)$$

式中: α_{vk} 为纵向劈分系数; N_k 为第 k 小层的技术可采储量, 10^4 m^3 ; r 为油井总生产层数。

剩余油法充分考虑了注水和采油系统之间的储量分布情况,而且剩余油可以通过油藏工程方法和数值模拟法均可得到,可以快速得到更具有接近真实流动规律的纵向劈分系数。在渤海SZ油田B1H井组中含水阶段采用该方法优化调配,实现了平均井组累增油 10 022 m³,平均日净增油 32 m³的良好优化调配效果。

1.2.3 驱替通量PA法

孙召勃等^[7]基于驱替通量(累计驱替流体的体积与驱替断面的孔隙面积之比,图3所示)均衡化思想指导分层配注优化,该方法的纵向劈分系数为:

$$\alpha_{vk} = \frac{h_k \varphi_k}{\sum_{k=1}^r h_k \varphi_k} + \frac{1}{q \Delta t} \left(\frac{h_k \varphi_k}{\sum_{k=1}^r h_k \varphi_k} Q - Q_k \right) \quad (5)$$

式中: φ_k 为第k层的孔隙度; q 为注水井日注水量,m³; Δt 为调控时间,d; Q 为注水井累计注水量,m³; Q_k 为第k层累计注水量,m³。

含水饱和度劈分法在地层系数法(KH)基础上,考虑了小层含水饱和度这一反映生产过程的因素,使得纵向劈分更为合理。剩余油法充分考虑了注水

和采油系统之间的储量分布情况,而且剩余油可以通过油藏工程方法和数值模拟法均可得到,可以快速得到更具有接近真实流动规律的纵向劈分系数。驱替通量PA法主要针对高含水阶段,多层合采油藏由于纵向各层的储层物性差异,各层的吸水能力不同,导致驱替不均衡,即使剩余油相同,但也存驱替通量(累计驱替流体体积与驱替截断面的孔隙面积之比)不同的情况,此时采用该方法可以较好解决该问题。由于该方法综合考虑储层厚度、孔隙度、注水历史、调控周期等因素的影响,优化调配效果更佳。作者将该方法在渤海BZ油田X1井组高含水阶段采用该方法优化调配,调整后井组平均含水率下降4%,日增油 117 m³,降水增油效果明显。

综上所述,无水采油期水驱相对均衡推荐采用地层系数(KH)法;含水率小于40%推荐采用含水饱和度劈分法;含水率介于40%~80%,各层剩余油差异大,推荐采用剩余油法;含水率介于80%~95%,驱替不均衡加剧,无效水循环严重,推荐采用驱替通量PA法。各个方法的优缺点对比如表1所示。

1.3 平面劈分系数研究

对于平面劈分系数,目前油田开发中常使用的方法主要有两大类,即静态法和动态法。静态法主要为几何法,该方法仅仅考虑周围油井受益注水井井数,没有考虑储层非均质性、井网、井型等开发生产因素。动态法有灰色关联分析法、渗流阻力系数法、容阻模型法及流线数值模拟法,动态方法可以较好地考虑开发生产因素,劈分相对比较合理。由于静态法比较简单,该文重点分析几种动态法原理及优缺点。

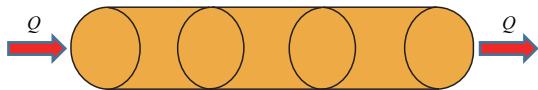


图3 一维驱替岩心均等划分网格示意图
Fig. 3 Schematic diagram of equally divided grids of one-dimensional flooding cores

表1 纵向劈分系数各个方法对比
Table 1 Comparison of various methods of longitudinal split

方法	优点	缺点	使用范围
地层系数法(KH)	简单、高效	无法考虑开发阶段、数据一致不变	无水采油期
油层厚度法(H)	简单、高效	无法考虑开发阶段及储层物性影响、数据一致不变	无水采油期
含水饱和度劈分法	考虑含水率变化引起相对渗透率变化对劈分的影响	小层含水率测试数据少	中低含水期($f_w < 40\%$)
剩余油法	考虑剩余油对劈分系数的影响	小层剩余油计算过程复杂	中高含水期($40\% < f_w < 80\%$)
驱替通量PA法	考虑累计注水量对劈分系数的影响	小层累计注水量计算过程复杂	高含水期($f_w > 80\%$)

注: f_w 为含水率。

1.3.1 渗流阻力法

渗流阻力法是杜庆龙等^[8]以达西公式为基础并经过变形,以水电相似原理为基础,取开发井中的油井作为中心加以研究,根据渗流理论推导得出。该方法主要考虑了井底流压、渗流阻力及改造措施系数对注水劈分影响。同一小层内油井生产受周边若干口注水井影响,油井的平面劈分系数取决于油井和注水井的渗流阻力系数及油井流压。

油井与周边注水井间的渗流阻力系数为:

$$R_{ij} = \mu_0 \frac{L_{ij}}{K_{ij} H_{ij}} \quad (6)$$

式中: R_{ij} 为渗流阻力系数; μ_0 为地层原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; L_{ij} 为油井 j 和注水井 i 之间的注采井距, m ; K_{ij} 为油井 j 和注水井 i 之间的油层空气渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; H_{ij} 为油井 j 和注水井 i 之间的油层厚度, m 。

在此基础上得到油井与注水井之间的平面劈分系数为:

$$F_{hij} = \frac{p - p_j}{R_{ij} \sum_{j=1}^n (p - p_j) / R_{ij}} \quad (7)$$

式中: p 为油井 j 在第 k 层的储层的静压力, MPa ; p_j 为油井 j 在第 k 层井底流动压力, MPa 。

渗流阻力法把油、水井作为一个统一的油水运动系统,采用动静结合的方法,综合考虑注水井和其影响到油井的地质油藏条件(油层厚度、渗透率、原油黏度、注采井距、生产压差),克服几何法平面产量劈分不精确的缺陷。将该方法在大庆葡北油田某区块进行验证,该方法的劈分结果与测试结果误差在5%以内。

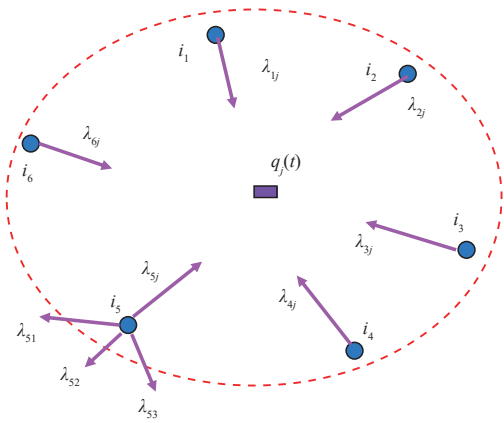
1.3.2 容阻模型法

YOUSEF等^[10-11]首次提出的电容模型方法,这个模型以物质平衡原理为基础,通过建立井组内生产井与注入井之间的连通关系,实现实际的动态参数反演出模型里面的传导率、连通体积。许多学者基于此对电容模型进行改进,使得这一模型更加满足油田开发过程中的计算要求。赵辉等^[12-13]不区分油水井,建立了多井耦合下的INSIM模型,可用于计算油水两相流的井间连通模型(图4)。该方法认为油井 j 对一系列注入信号 I_{ik} 存在如下关系:

$$Q_{jt} = Q_{j1} e^{-\frac{t-1}{\tau_j}} + \sum_{k=2}^N \left[e^{-\frac{t-1}{\tau_j}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_j}} \right) \sum_{i=1}^{N_i} F_{hij} I_{ik} \right] \quad (8)$$

式中: Q_{jt} 为油井 j 在第 t 时刻的产出量, m^3/s ; Q_{j1} 为油井 j 初始时刻的产出量, m^3/s ; t 为时间序号; τ_j 为时间常数, s ; N 为生产数据个数; I_{ik} 为注水井 i 在 k 时刻的注入量, m^3/s 。

容阻模型法基于物质平衡方程、储层物性及生产动态数据反演平面劈分系数,实现了对油藏特征、井间连通性关系、瞬时油水流动的定量认识,并且该方法具有精度高、速度快两大特点,该方法计算的平面劈分系数与示踪剂的结果吻合程度高,整体吻合程度高于85%。



注: $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$ 分别为注入井1、2、3、4、5、6; $\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \lambda_{3j}, \lambda_{4j}, \lambda_{5j}, \lambda_{6j}$ 为注入井1、2、3、4、5、6分别于油井 j 的影响权重系数; $q_j(t)$ 表示 t 时刻油井 j 的日产液量。

图4 以生产井 j 为中心连通关系示意图
Fig. 4 Schematic diagram of interwell connectivity centered on Well- j (production well)

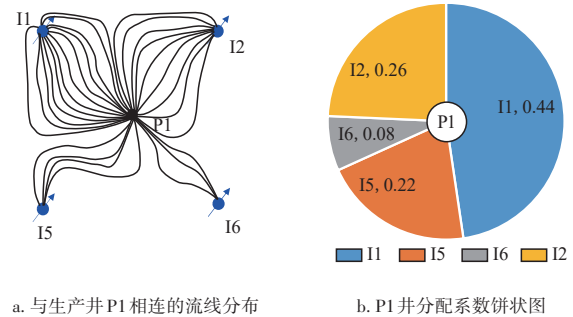


图5 与生产井P1相连的流线分布及P1井分配系数饼状图
Fig. 5 Distribution of streamlines connected with Well-P1 (production well) and pie chart of allocation factors of Well-P1

1.3.3 流线数值模拟法

孙致学等^[14]、黄勇等^[15]采用加拿大 Streamsim 公司开发的 3DSL 流线模拟器^[16]进行的流线数值模拟方法为基础,确定了注水井*i*到油井*j*之间的劈分系数(图5),其具体计算公式为:

$$F_{ij} = \left(\sum_{j=1}^{n_p} \sum_{k=1}^{n_{sl}} \frac{q_{jil}^k}{q_i^w} \right) \times 100 \quad (9)$$

式中: n_p 为流体相数; n_{sl} 为两口井之间的流线条数; q_i^w 为注水井*i*的总流量, m^3/d ; q_{jil}^k 为在注水井*i*和油井*j*之间流线*k*中流体相*j*的流量, m^3/d 。

灰色关联法仅仅依靠油、水井动态数据,分析其之间的关联关系,简单实用,适用于日产动态分析,但缺乏一定的物理意义。渗流阻力法基于水电相似原理并考虑储层物性,平面劈分系数精度有所提高。容阻模型法基于物质平衡方程、储层物性及生产动态数据反演平面劈分系数,具有精度高、速度快两大特点。流线数值模拟法建立在精细数值模拟基础上,考虑的因素最全面,得到的平面劈分系数精度也最高,同时也建立了可视化的流动井网,使得地下流动情况更直观。作者基于流线数值模拟法进行了注水配注优化,并在新疆油田高含水 H3 区块进行应用,实现区块 3 年累增油量 12 400 m^3 的良好开发效果。但是该方法存在耗时长、不太适合日产动态优化配注工作。

综上所述,从平面劈分系数精度要求从高到低来看,依次推荐采用流线数值模拟法、容阻模型法、渗流阻力法、灰色关联法、几何法。另外根据平面劈

分系数研究耗时角度考虑,耗时由低到高依次为几何法、灰色关联法、渗流阻力法、容阻模型法及流线数值模拟法。各个方法的优缺点对比如表2所示。

1.4 合理注采比研究

油田的开发过程中,合理的注采比的确定是油田开发的关键,是保持油田具有合理地层压力水平,从而使油田具有较强供液能力,获得较高的原油采收率的重要基础。目前确定合理注采比的方法主要用数值模拟法、物质平衡方法和水驱特征曲线方法等,而油藏数值模拟方法对模型拟合精度要求比较高。

1.4.1 数值模拟法

张俊等^[17]通过数值模拟方法,在精细历史拟合的基础上,通过对不同的注采比条件下研究了油藏中部深度的地层压力恢复速度、含水率上升速度以及对应的油田采收率值,通过不同方案对比研究,取得了推荐的恢复地层压力的注采比值。现场应用证明该注采比能够达到油田开发对地层压力恢复速度的需要,同时也取得了控制含水率上升速度,提高采收率的矿场应用成效。利用该方法指导渤海 JX 油田的地层压力恢复方案制定,使得油田地层压力恢复 1.0 MPa,受益油井取得日增油 10 m^3 的良好效果。数值模拟法考虑因素全面,得到的注采比最为合理,但是该方法存在工作量大、耗时长、不太合适日产动态优化配注工作。

1.4.2 水驱特征曲线法

那雪芳等^[18]根据经验分析方法,建立不同水驱

表2 平面劈分系数各方法对比
Table 2 Comparison of various methods of plane split

方法	优点	缺点	使用范围
几何法	简单、高效	没有考虑动态数据,也没有考虑储层非均质性及井型影响	相对均质油藏、规则定向井开发油田
灰色关联法	简单、高效并考虑动态数据	缺乏物理意义,纯数据驱动	日产动态分析
渗流阻力法	一定程度上考虑储层非均质性及动态数据	无法考虑井型影响	定向井开发油田
容阻模型法	考虑储层非均质性及井型、井网及动态数据;计算速度快	地质油藏等效模型建立时间长	劈分系数高精度分析
流线数值模拟法	考虑所有地质油藏信息 计算精度高	耗时尤其长	劈分系数高精度分析

曲线与注采比的关系,注采比关系(甲型水驱曲线)为:

$$\lg R = C + D \left(\lg \frac{f_w}{1-f_w} - \lg 2.303b_1 - a_1 \right) / b_1 + \lg 2.303D + \lg(1-f_w) \quad (10)$$

注采比关系(乙型水驱曲线)为:

$$\lg R = C + D \left(\lg \frac{f_w}{1-f_w} - a_2 \right) / b_2 + \lg 2.303D + \lg(1-f_w) \quad (11)$$

注采比关系(丙型水驱曲线)为:

$$\lg R = C + D \frac{1 - \sqrt{a_3(1-f_w)}}{b_3} + \lg 2.303D + \lg(1-f_w) \quad (12)$$

注采比关系(丁型水驱曲线)为:

$$\lg R = C + D \left[1 - \sqrt{\frac{(a_4-1)(1-f_w)}{f_w}} \right] / b_4 + \lg 2.303D + \lg(1-f_w) \quad (13)$$

式(10)一式(13)中: f_w 为含水率; C 、 D 、 a_1 、 a_4 、 b_1 、 b_4 为待定系数。

拟合现场生产数据,计算得到式(9)一式(12)中系数 C 、 D 、 a_1 、 a_4 、 b_1 、 b_4 ,因此可以采用综合含水率计算所需要的合理注采比值。

数值模拟法考虑因素全面,得到的注采比最为合理,但是耗时长;物质平衡方法可根据产液量和注采比的关系直观快速地得到计算结果,是一种计算简单、行之有效的方法;水驱特征曲线法可建立含水率变化与注采比的关系,更加直观了解注采比与含水率的联系。可以根据油田含水阶段快速制定合理的注采比。但是该方法的计算精度受系数影响较大,并且对于注水开发初期和无水采油期并不适用,在高含水阶段适用性较好。

综上所述,从合理注采比精度要求从高到低来看,依次推荐采用数值模拟法、水驱特征曲线法、物

质平衡法。另外,根据合理注采比研究耗时角度考虑,耗时由低到高依次为物质平衡法、水驱特征法、数值模拟法。因此,对于日常动态分析中,首先推荐采用水驱特征曲线法,其次推荐采用数值模拟法。各个方法的优缺点对比如表3所示。

1.5 注水井优化配注新方法矿场应用

渤海BZ油田X区块原油地质储量 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前有2口定向注水井,2口水平生产井,1口定向生产井,目前区块日产液量 1370 m^3 ,日注水量 1507 m^3 ,采出程度18.0%,而目前综合含水率85.5%。数值模拟结果表明,该区域部分区域存在无效注水,导致区块开发效果差。该区块之前对于注水井配注量确定3个核心参数(纵向劈分系数、平面劈分系数和注采比)比较简单,定向生产井每个层的产出(即纵向劈分系数)根据KH占比劈分,生产井与周围注水井的平面劈分系数采用几何法(即根据周围受益注水井数平分),注采比确定主要依据物质平衡方法。由于该区块目前进入高含水阶段,而且根据先前的配注方法开发效果持续变差,有必要通过优化配注改善区块开发效果,最终实现提高采收率的目的。

根据区块开发阶段及精细注水的需求,纵向劈分系数、平面劈分系数及注采比分别采用前面提及的驱替通量法、流线数值模拟法和数值模拟法确定。其中对于纵向劈分系数,在梳理区块地质参数(油层厚度、孔隙度、渗透率)的基础上,并梳理该区块所有井动态生产数据(日产油量、日产水量、日注水量),采用1.2.3提到的驱替通量PA法进行求得生产井各个层的纵向劈分系数。对于平面劈分系数,在该区块油藏数值模拟及历史拟合的基础上,借助油藏数值模拟tNavigator软件的流线模拟模块求得生产井各个方面的平面劈分系数。对于注采比,在该区块油藏数值模拟及历史拟合的基础上,通过油藏数值模拟软件eclipse模拟不同注采比地层压力恢复速度,

表3 注采比各个方法对比

Table 3 Comparison of injection production ratio methods

方法	优点	缺点	使用范围
物质平衡法	简单、高效	模型简单,计算精度低	油田整个开发周期
数值模拟法	虑因素全面,得到的注采比最为合理	耗时长	油田整个开发周期
水驱特征曲线法	直观了解注采比与含水的联系	计算精度受拟合系数影响较大	中高含水阶段

表4 注水井优化配注新老方法结果对比

Table 4 Comparison of results of new and old methods for optimal injection allocation of water injection wells

注水井	分注段	生产井	日 产油量 (m ³)	日 产水量 (m ³)	纵向劈分系数		平面劈分系数		注采比		日注水量(m ³)	
					老方法	新方法	老方法	新方法	老方法	新方法	老方法	新方法
A29	X1	A32H	120	580	1.00	1.00	0.50	0.60	1.10	1.10	478	528
		A14	77	165	0.70	0.78	0.50	0.32	1.10	1.10		
	X2	A45H	78	350	1.00	1.00	0.50	0.63	1.15	1.10	288	327
		A14	77	165	0.30	0.22	0.50	0.52	1.15	1.10		
A18	X1	A32H	120	580	1.00	1.00	0.50	0.40	1.10	1.10	478	449
		A14	77	165	0.70	0.78	0.50	0.68	1.10	1.10		
	X2	A45H	78	350	1.00	1.00	0.50	0.37	1.15	1.10	288	202
		A14	77	165	0.30	0.22	0.50	0.48	1.15	1.10		
合计			275	1 095							1 532	1 507

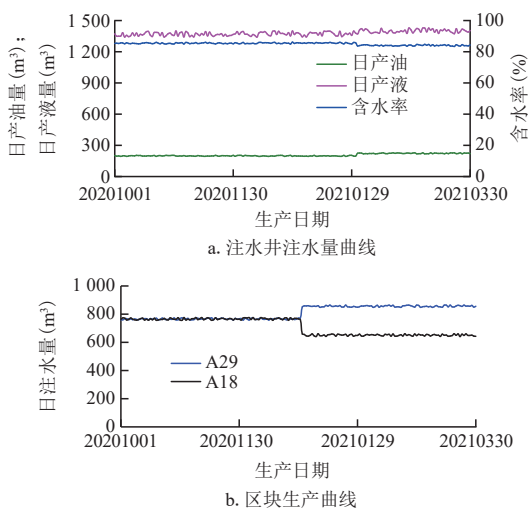


图6 X1区块优化注水调整效果

Fig. 6 Optimization of water injection adjustment effect in block X1

最终确定最合理的注采比。基于此对注水井进行优化配注,配注结果如表4所示。

2021年1月矿场基于最新注水井优化配注结果进行调整,对A29井增注、A18井限注。实施后两个月区块开发效果逐步变好,实现区块日增油20 m³,累增油0.25×10⁴ m³,具体效果如图6所示。从应用效果来看,上述优化配注方法具有较好的适应性和有效性。

2 注水井优化配注展望

近年来,在石油行业里人工智能的应用研究已

经逐步开展,石油开发人员的工作成效得到较大的改善,进而提高了油田开发的经济效益。受新冠疫情影响在全球油气开发长期处于低油价条件下,人工智能在油气田开发过程中得到了广泛应用,为石油行业降本增效提供了很好的工具。因此,油气开发行业的智能化是大势所趋^[18-23]。关于优化注水发展趋势主要有下面几个方面。

2.1 大数据挖掘技术

油田开发大数据分析是随电子计算机技术的高速发展、数据分析处理应运而生的。通过大数据挖掘分析,探寻数据之间隐含的规律。贾德利等^[24]在传统的数值模拟及优化算法基础上,结合分层注采实时监测与自动控制工艺技术所监测的“硬数据”,提出一种大数据驱动下的老油田精细注水优化方法。首先利用数据同化算法对地质模型进行自动历史拟合,然后在此基础上通过机器学习算法量化和评价井组(层段)注水的效果指标,分析注水调整方向,最终形成了多井分层的优化注水方案(图7)。结合油田试验,初步实现了以注水方案设计、智能优化和同步调整为核心的油藏和采油工程一体化。

2.2 人工智能技术

人工智能是用来研究利用高性能电子计算机等新技术模拟人类智能行为。人工智能的关键技术包括机器学习、数据挖掘、自然语言处理、模式识别、计算机视觉、知识图谱等。近年来,随着大数据的增长

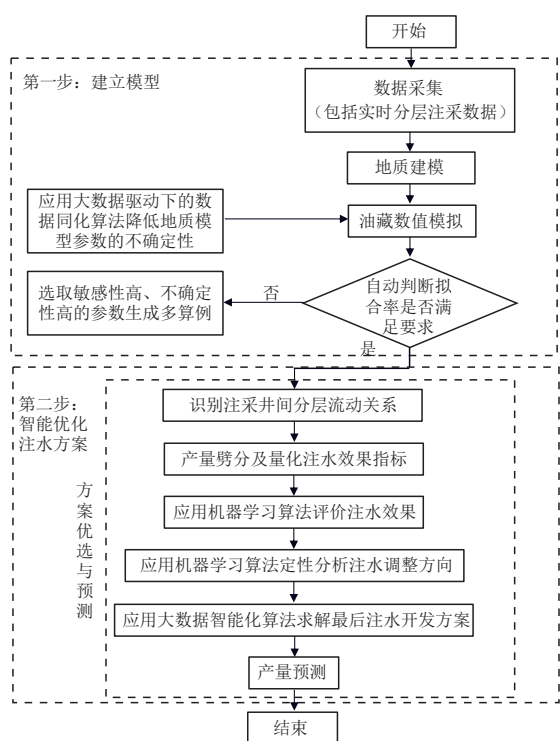


图7 大数据驱动下注水优化模拟流程

Fig. 7 Water injection optimization simulation process based on big data

的出现及高性能计算机的使用,人工智能已经成井喷式发展。未来可在智能诊断技术、系统能耗、系统配注等方面,通过人工智能技术给出解决方案。

尽管人工智能技术迅猛发展,未来在优化注水方面一定要构建数据与油藏工程方法深度融合的油田大数据人工智能分析技术,形成数据与模型双驱动的智能优化注水技术体系。同时大力发展分层配注配套采油工艺技术,满足高频率调配、耐高压、耐高温等复杂地质油藏优化注水需求。

3 结论

1) 以采油井为中心,提出了注水井优化配注新方法,在此基础上进一步明确了优化配注“五清楚”理念,即:合理产量清楚、纵向劈分清楚、平面劈分清楚、注采比清楚、配注量及对比清楚。

2) 围绕注水井配注的3个参数,分别从纵向劈分系数、平面劈分系数及合理注采比进行了文献调研与分析,评价了研究人员提出的计算公式的优缺点,现有注水井优化配注方法主要基于油田某一开

发阶段或者优化配注精细需求程度进行分析,缺乏系统性,难以满足越来越精细优化注水的需求。

3) 油田开发人员应根据油田所处的开发阶段、优化配注精确度需求及优化配注调整频率等条件选择合适的方法指导注水井优化配注。基于油田开发阶段划分:低含水阶段主要采用静态法,中高含水阶段采用动态法;根据优化配注精确程度划分:精细化配注建议纵向劈分系数计算采用驱替通量PA法、平面劈分系数计算采用流线数值模拟,注采比计算采用数值模拟法;基于优化配注调整率划分,高频率调整建议纵向劈分系数采用含水饱和度法、平面劈分系数计算采用渗流阻力法、注采比计算采用物质平衡法。

4) 在常规方法的基础上,指出了人工智能等新技术将在优化配注方面发挥越来越重要的作用,基于人工智能的注水方案设计、智能优化和同步调整为核心的油藏和采油工程一体化是优化配注未来发展的新方向。

参考文献

- [1] 黄昌武. 2012年中国石油十大科技进展[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 208.
HUANG Changwu. Top ten scientific and technological progress of PetroChina in 2012[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 208.
- [2] 刘合, 裴晓含, 罗凯, 等. 中国油气田开发分层注水工艺技术现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 733-737.
LIU He, PEI Xiaohan, LUO kai, et al. Current status and trend of separated layer water flooding in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 733-737.
- [3] 王桐, 金心岫, 陈雅彤. 青平川油区长2油藏水驱采收率计算及评价[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(6): 67-71.
WANG Tong, JIN Xinxu, CHEN Yatong. Water drive recovery calculation [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(6): 67-71.
- [4] 谭文斌. 油田注水开发的决策部署研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
TAN Wenbin. Study on decision-making and deployment of oilfield water injection development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [5] 张继成, 王潇悦. 考虑含水饱和度的产量劈分方法及应用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(5): 626-630.
ZHANG Jicheng, WANG Xiaoyue. The method of oil production splitting based on water saturation and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2015, 42(5): 626-630.
- [6] 贾晓飞, 李其正, 杨静, 等. 基于剩余油分布的分层调配注水井注入量的方法[J]. 中国海上油气, 2012, 24(3): 38-40.
JIA Xiaofei, LI Qizheng, YANG Jing, et al. A method to allocate injection volume for separate layers in a water-injection well

- based on the remaining oil distribution[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(3): 38-40.
- [7] 孙召勃, 李云鹏, 贾晓飞, 等. 基于驱替定量表征的高含水油田注水井分层配注量确定方法[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(2): 87-91.
SUN Zhaobo, LI Yunpeng, JIA Xiaofei, et al. A method to determine the layered injection allocation rates for water injection wells in high water cut oilfield based on displacement quantitative Characterization[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(2): 87-91.
- [8] 杜庆龙, 朱丽红. 油、水井分层动用状况研究新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(5): 96-98.
DU Qinglong, ZHU Lihong. A new approach to study layered producing performance of oil and water wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 96-98.
- [9] 陈建华, 晏庆辉, 骆逸婷, 等. 基于历史生产数据的多层合采井产量劈分新方法[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(1): 110-116.
CHEN Jianhua, YAN Qinghui, LUO Yiting, et al. A historical production data based method for production splitting of multi-layer commingled gas wells[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(1): 110-116.
- [10] YOUSEF A A, GENTIL P H, Jensen J L, et al. A capacitance model to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2006, 9(6): 630-646.
- [11] JAMALI Ali, ETTEHADTAVAKKOL Amin. 应用电容电阻模型研究大型成熟油田井间连通性[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 130-136.
JAMALI Ali, ETTEHADTAVAKKOL Amin. Application of capacitance resistance models to interwell connectivity of large-scale mature oil fields[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 130-136.
- [12] ZHAO H, KANG Z J, ZHANG X S, et al. A physics-based data-driven numerical model for reservoir history matching and prediction with a field application[J]. *SPE Journal*, 2016, 21(6): 2175-2194.
- [13] 赵辉, 康志江, 孙海涛, 等. 水驱开发多层油藏井间连通性反演模型[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 99-106.
ZHAO Hui, KANG Zhijiang, SUN Haitao, et al. An interwell connectivity inversion model for waterflooded multilayer reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 99-106.
- [14] 孙致学, 黄勇, 王业飞, 等. 基于流线模拟的水井配注量优化方法[J]. *断块油气田*, 2016, 23(6): 753-757.
SUN Zhixue, HUANG Yong, WANG Yefei, et al. Optimization of water injection allocation based on streamline simulation[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(6): 753-757.
- [15] 黄勇, 王业飞, 孙致学, 等. 基于流线模拟的高含水油田注水效率优化[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(2): 53-58.
HUANG Yong, WANG Yefei, SUN Zhixue, et al. Optimization of water injection efficiency based on streamline simulation in high water cut stage[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2017, 32(2): 53-58.
- [16] BLUT M J, LIU K R, THILE M R. A generalized streamline method to predict reservoir flow[J]. *Petroleum Geosciences*, 1996, 2: 259-269.
- [17] 张俊, 黄琴, 杨静, 等. 海上半衰竭式水驱开发稠油油藏地层压力恢复研究与应用[J]. *石油地质与工程*, 2013, 27(6): 127-129.
ZHANG Jun, HUANG Qin, YANG Jing, et al. Research and application of formation pressure recovery in offshore semi-depleted waterflooding development of heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2013, 27(6): 127-129.
- [18] 那雪芳, 姚尚空, 孙晨曦. 大庆油田中区西部合理注采比的确定[J]. *北京石油化工学院学报*, 2019, 27(2): 44-48.
NA Xuefang, YAO Shangkong, SUN Chenxi. Study of the reasonable injection-production ratio in the west part of central block in saertu of Daqing Oilfield[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2019, 27(2): 44-48.
- [19] 林伯韬, 郭建成. 人工智能在石油工业中的应用现状探讨[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(4): 403-413.
LIN Botao, GUO Jiancheng. Discussion on current application of artificial intelligence in petroleum industry[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(4): 403-413.
- [20] 李阳, 廉培庆, 薛兆杰, 等. 大数据及人工智能在油气田开发中的应用现状及展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 1-11.
LI Yang, LIAN Peiqing, XUE Zhaojie, et al. Application status and prospect of big data and artificial intelligence in oil and gas field development[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2020, 44(4): 1-11.
- [21] 张凯, 赵兴刚, 张黎明, 等. 智能油田开发中的大数据及智能优化理论和方法研究现状及展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 28-38.
ZHANG Kai, ZHAO Xinggang, ZHANG Liming, et al. Current status and prospect for the research and application of big data and intelligent optimization methods in oilfield development[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2020, 44(4): 28-38.
- [22] 冯硕, 张艺耀, 李进, 等. 渤海油田远程无线智能注水工艺技术及应用[J]. *石油机械*, 2021, 49(11): 79-83.
FENG Shuo, ZHANG Yiyao, LI Jin, et al. Remote Wireless Intelligent Water Injection Technology and its Application in Bohai Oilfield[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(11): 79-83.
- [23] 叶勤友, 刘亚珍, 孙伟, 等. 智能化多管分层注水技术研究与应用[J]. *石油机械*, 2021, 49(6): 82-87.
YE Qinyou, LIU Yazhen, SUN Wei, et al. Research of Intelligent Multi-pipe Separate Zone Injection Technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(6): 82-87.
- [24] 贾德利, 刘合, 张吉群, 等. 大数据驱动下的老油田精细注水优化方法[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 629-636.
JIA Deli, LIU He, ZHANG Jiqun, et al. Data-driven optimization for fine water injection in a mature oil field[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 629-636.

(编辑 常燕)