

基于生产动态数据的井间储层连通性识别方法

王任一

(浙江海洋大学 石化与能源工程学院, 浙江 舟山, 316022)

摘要:井间储层连通性认识是注水开发油田最重要的基础性研究工作,而目前常用的油藏工程法、数值模拟法和地球化学法,对认识结论可靠性的影响因素较多,尤其对地质资料依赖性较大,且周期长成本高。由注水井、采油井和油水井井间储层组成了一个复杂的非线性注采系统,反映该系统某一侧面的油水井生产动态数据中,隐含着油水井井间储层连通性信息。利用油水井多变量生产动态数据,基于多变量相空间重构方法,可重构这一注采系统动力学特征,通过求取重构注采系统吸引子的关联维,就有可能提取出井间储层连通性信息。使用该方法工作量小,在WR油田应用效果好,得出结论与实际生产相符,且理论清晰算法简单,不需要复杂的数学模型和地质静态模型参数,并可以实现定量解释,为井间储层连通性认识开辟了一条新思路。

关键词:井间连通性;生产数据;相空间重构;关联维;定量解释;储层;油田注水开发

中图分类号:TE341

文献标识码:A

An approach to recognize interwell reservoir connectivity based on production data

Wang Renyi

(School of Petrochemical & Energy Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract: Characterization of interwell reservoir connectivity is the most important and fundamental research work to understand water flooding oilfield. Although the commonly used reservoir engineering, numerical simulation and geochemical methods may improve the reliability of interwell reservoir connectivity characterization, they are heavily dependent on extensive collection of geological data and long period observation of well performance through production cycle, which are either expensive or time consuming. The interaction between injectors, producers, and interwell reservoir is a complex nonlinear dynamic system. The production data of oil and water reflect certain aspect of the system, which may hint into the characters of interwell reservoir connectivity. The multivariable facies distribution reconstruction can be applied to resolve the dynamic characteristics of the system based on the multivariable production data of oil and water wells. Thus the reservoir connectivity can be characterized by calculating correlation dimensions of chaotic attractor of the injection-production dynamic system. The amount of work required by this approach is small, and it works well in the application to WR oilfield, with conclusion being consistent with actual production. The approach is clear and simple both in theory and in algorithm. Without complicated mathematical models or parameters of static geological models, it has initiated a new way to quantitatively characterize interwell reservoir connectivity.

Key words: interwell connectivity, production datum, phase space reconstruction, correlation dimension, quantitative interpretation, reservoir, water flooding oilfield development

目前注水开发仍是油田开采的最主要方式,而井间储层连通性认识,则是油田注水开发工程大厦的基石。井间储层连通性识别方法主要有3类:①数值模拟方法,所考虑的因素比较全面,所得结果比较直观,但由于考虑的因素较多,对所需资料的依赖性较大,尤

其是对地质资料的要求较高,其预测结果可靠性,很大程度上取决于基于地质工程师小层对比及测井工程师储层参数解释结果所建立的三维地质模型可靠程度,并且周期长成本高;②油藏工程方法,主要有油水井生产动态资料相关分析法、试井法和示踪剂等方法。

收稿日期:2018-02-21;修订日期:2018-12-09。

作者简介:王任一(1968—),男,博士,高级工程师,油气田开发。E-mail:wry2898@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05072005)。

这些方法如果要想实现定量化解释,一般都需建立一个理想化的复杂理论数学模型(与地下实际情况相差较大),还需要提供一个依赖于油藏静态认识成果的地质油藏参数(例如,小层对比成果和油藏参数解释结果等),一般均需要较长研究时间和较高实施成本费用;③地球化学方法,主要有矿化度分析法和原油气相色谱指纹技术等。矿化度分析法,影响因素较多,不确定性较大。而气相色谱指纹技术也存在着一些自身难以克服的不足^[1]。笔者提出一种利用油水井生产动态数据资料,通过多变量相空间重构方法,重构注采系统动力学特征,求取重构注采系统吸引子的关联维,可直接对井间储层连通性进行定量识别的方法。

1 方法原理

具有非线性渗流特征的低渗透油藏注水开发系统,是一个复杂的非线性多相流时变系统,油水井生产动态特征受多因素综合影响^[2-3]。在现场生产上,一般简单通过注水井的注水量,与采油井的产液量(产水量或产油量等)之间的相关情况,可以大致判断油水井井间储层连通状况,也就是依据油水井之间哪个方向是增注增油,哪个方向是增注增水,哪个方向是既增油又增水,哪个方向是增注不增油等状况,为油田后续调整方案制定提供参考^[4]。可见,在油水井注采系统的生产动态数据中,隐含着油水井井间储层连通性信息。

可以将油水井注采系统,简单视为由注水井、采油井和油水井井间储层,这三者组成的一个非线性多相流系统。多相流系统是一个非线性能量耗散动力学系统,它表现为一系列混沌运动特征^[5]。根据 Takens 嵌入定理,系统中任一分量变化都是由与之相互作用着的其它分量所决定,单一变量时间序列隐含整个系统的运动规律^[6]。可在不清楚影响这一注采系统各因素间相互作用机理的情况下,利用油水井生产动态数据,通过相空间重构方法,重构这一注采系统动力学特征,并与原注采系统动力学特征及吸引子拓扑结构完全相同,并可通过求取重构注采系统吸引子的关联维,来认识这一注采系统动力学特征^[7-8]。因此,利用油水井生产动态数据,采用多变量相空间重构方法,就有可能从隐含着井间储层连通性的多变量生产动态数据中,提取出井间储层连通性信息。

1.1 注采系统的多变量相空间重构

依据 Takens 嵌入定理,对于无干扰噪音的足够长时间序列,只要时间延迟(τ)与嵌入维数(m)选择合

适,单变量时间序列就足以重建注采系统的动力学特征。但在实际应用中,情况却不完全是这样,不能肯定基于特定观测变量一定可以正确地重构相空间。例如,对于 Lorenz 方程^[9],基于 z 轴输出数据进行采样形成的时间序列,不能重构 Lorenz 系统动力学特征。因为系统 x 轴与 y 轴之间的对称关系无法反映到 z 轴数据列中。可见,对于任何给定的一维时间序列就可以重建动力学系统的看法并不总是正确^[10]。由采油厂录取的油水井生产动态数据往往受多因素影响,数据波动很大,且生产动态数据长度有限。例如,每次修井或检泵周期的不确定性,或不同时间段注采压差等生产参数确定的人为经验性,或为了阶段性生产任务完成,人为性地加大措施强度等。如果仅仅通过油水井单变量生产动态数据(采油量或注水量),重构油水井注采系统动力学特征,有可能会产生一定误差。但是在多变量生产动态数据中,则包含了更多的反映注采系统动力学特征信息,采用多变量生产动态数据进行相空间重构,可以提高重构注采系统动力学特征的精度及可靠性。

作为注采系统输入端的注水井生产动态数据变量有注入压力和注水量等,作为注采系统输出端的采油井生产动态数据变量有生产压差、产油量、产水量和产液量等。目前多变量时间序列相空间重构方法,多为经典 G-P 算法推广^[11-12],本文采用文献[13]的重构方法。假设油水井多变量生产动态数据为 $x_{ij}, i=1,2,\dots,r$, 表示有 r 个变量生产动态数据; $j=1,2,\dots,n,n$ 为生产数据长度(时间)。

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{r1} & x_{r2} & \cdots & x_{rn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于多变量生产动态数据(x_{ij}),取时间延迟 $\tau = \max(\tau_i), i=1,2,\dots,r$ 。 τ 为满足 Takens 嵌入定理共同时间延迟量。假定选择适当的嵌入维数为 m ,可重建 $r \times m$ 阶矩阵为

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{1i} & x_{1i+\tau} & \cdots & x_{1i+(m-1)\tau} \\ x_{2i} & x_{2i+\tau} & \cdots & x_{2i+(m-1)\tau} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{ri} & x_{ri+\tau} & \cdots & x_{ri+(m-1)\tau} \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式(2)中, $i=1,2,\dots,M; M=n-(m-1)\tau$, 为相空间中相点数。当 $r=1$ 时,公式(2)就变成单变量时间序列相空间重构公式。由于任意两个 $r \times m$ 阶矩阵之差,仍然是一个 $r \times m$ 阶矩阵,则用多变量时间序列联合计算关联积分为:

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^M \theta(\varepsilon - d_{ij}) \quad (3)$$

其中

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中 $\theta(x)$ 称为单位阶跃函数或 Heaviside 函数, ε 为测量尺度。 $d_{ij} = \|x_i - x_j\|$, 表示任意两个 $r \times m$ 阶矩阵之差的范数, 则利用油水井多变量生产动态数据, 重构油水井注采系统吸引子的关联维表达式为

$$D_2(x_{r,n}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (5)$$

依据公式(5), 在实际计算关联维 D_2 时, 由于注采系统动力学特征的复杂性, 一般使用局部斜率方法, 也即在某些尺度区间上, 局部曲线段相对平滑, 对应斜率也相对稳定的, 这一局部尺度范围区间也称为无标度区。在 $m \geq 2D + 1$ (D 为系统维数) 时, 使得重构相空间中的“轨线”与原系统在微分同胚意义下是等价的^[14], 由此重构油水井注采系统与原系统具有相同动力学特征及吸引子拓扑结构。因此, 通过求取反映注采系统吸引子特征不变量的关联维, 就可提取出油水井井间储层连通性复杂程度的信息。

1.2 延迟时间与嵌入维数确定

相空间重构的思想是将一维时间序列变换到多维相空间, 使原系统几何不变量保持不变^[15]。相空间重构关键是确定嵌入维数(m)和时间延迟量(τ)。如果时间延迟量太小, 则 x_i 和 $x_{i+\tau}$ 很靠近, 相图运动轨迹压缩在对角线附近信息冗余, 反之如果时间延迟量太大, 相图吸引子则发生折叠产生几何畸变^[16]。对于时间延迟量(τ)确定方法很多, 本文采用互信息法确定。

互信息可以度量两个变量间相互依赖程度或两个变量间共有信息。不仅可以反映变量间线性相关性, 也可以反映变量间的非线性相关性。对于确定的两个时间序列变量 $s = x_i$ 和 $q = x_{i+\tau}$, 二者互信息表达式为:

$$I(s, q) = H(s) + H(q) - H(s, q) \quad (6)$$

式中: $I(s, q)$ 为 s 和 q 这两个变量间互信息, $H(s)$ 和 $H(q)$ 分别为时间序列 s 和 q 的信息熵, $H(s, q)$ 为二者联合信息熵。当 s 与 q 完全相关时互信息值最大, 当 s 与 q 完全不相关时互信息值为零, 本文互信息计算采用等间距格子算法^[17]。通常取第一个互信息极小值点所在位置作为最佳延迟时间(τ)^[18]。图1为利用研究区采油井 WR531 井 76 个月产油量数据(以月为计量单位, 以下相同), 求得在不同延迟时间 τ 下, $I(s, q)$ 互信息值变化关系曲线。从图中可看出, 相空间重构最佳延迟时间为 3 个月($\tau = 3$)。

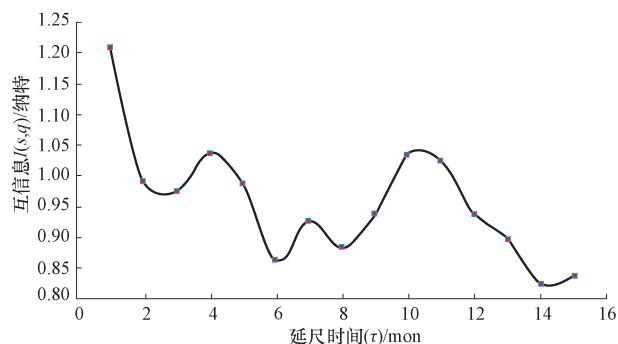


图1 WR 油田 WR531 井月产油量生产数据延迟时间与互信息关系

Fig. 1 Correlation between delay time and mutual information of monthly oil production data of Well WR531

嵌入维数(m)是相空间重构的另一个关键参数, 本文采用比较成熟的 CAO 方法来确定嵌入维数(m)^[19-20]。对于时间数据列 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, 在 m 维相空间中重构向量为 $x_i(m) = x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}$, 它们都存在一个距离最近向量 $x^N(i), N = 1, 2, \dots, n - m\tau$ 。令

$$a(i, m) = \frac{\|x_{m+1}(i) - x^N_{m+1}(i)\|}{\|x_m(i) - x^N_m(i)\|} \quad (7)$$

定义 $a(i, m)$ 的平均值为:

$$E(m) = \frac{1}{n - m\tau} \sum_{i=1}^{n-m\tau} a(i, m) \quad (8)$$

为了确定 $a(i, m)$ 平均值 $E(m)$ 随 m 变化情况, 定义

$$E_1(m) = \frac{E(m+1)}{E(m)} \quad (9)$$

如果时间序列具有非线性特征时, 则 m 大于某个 m_0 值时, $E_1(m)$ 就趋于不变, 相空间重构的最小嵌入维数就是 m_0 。图2也是利用 WR531 井月产油量数据, 按 CAO 方法计算求得的 $E_1(m)$ 值随嵌入维数(m)变化曲线图($\tau = 3$)。从图2中可看出, 当嵌入维数(m)大致大于 15 时, $E_1(m)$ 基本趋于不变。也说明 WR531 井产油量数据具有很强非线性特征。

实际上根据经典 G-P 关联维算法^[11], 也可求得最小嵌入维数。对于非线性时间序列而言, 一般随着嵌入维数 m 增大, $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线簇变化差异变小。如图3所示, 当 $m > 15$ 时, $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线簇变化趋于重叠不变。稳定直线段区间(无标度区)的斜率, 即为关联维数 D_2 也趋于稳定值。这时所对应的嵌入维数(m), 就是最小嵌入维数(m_0)。图3也表明, 利用 WR531 井月产油量数据, 进行相空间重构合适嵌入维数为 15 ($m = 15, \tau = 3$)。

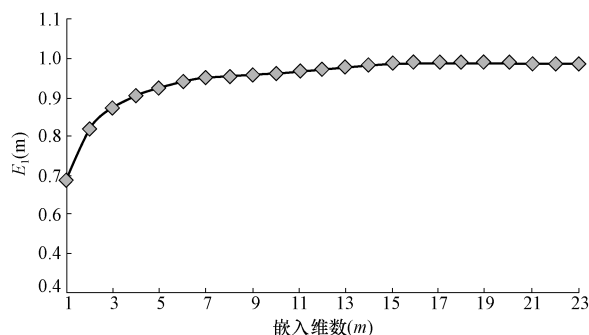


图2 WR油田WR531井月产油量数据 $E_1(m)$ 值随嵌入维数 (m) 变化曲线

Fig. 2 Plot showing the variation of monthly oil production data of Well WR531 $E_1(m)$ value with the change of embedding dimensions (m)

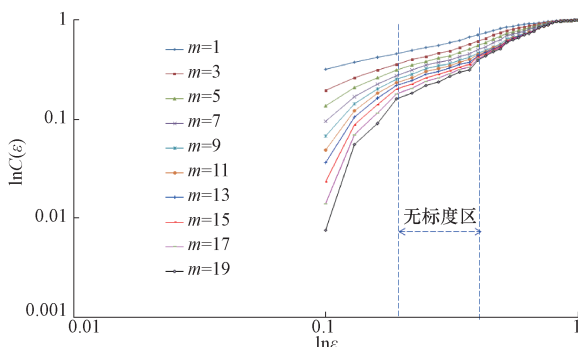


图3 WR油田WR531井月产油量数据的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线图 ($\tau = 3$ 个月)

Fig. 3 Plot showing the $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ of monthly oil production data of Well WR531 ($\tau = 3$ months)

1.3 井间储层连通程度的确定

如果反映非线性动力学系统某一侧面的二变量时间序列为 x_a 和 x_b , 则可通过3种方式进行相空间重构, 重建这一非线性动力学系统。与之相对应, 也可分别求出3种不同方式所重构这一非线性动力学系统吸引子的关联维。也就是根据公式(5), 可分别求出联合利用二变量时间序列(x_a 和 x_b)所重构动力学系统吸引子的关联维 $D_2(x_a, x_b)$ 、利用单变量时间序列(x_a)所重构动力学系统吸引子的关联维 $D_2(x_a)$, 以及利用单变量时间序列(x_b)所重构动力学系统吸引子的关联维 $D_2(x_b)$ 。文献[21]已经证明, 如果 $D_2(x_a, x_b) \approx D_2(x_a) \approx D_2(x_b)$, 则变量 x_a 和 x_b 时间序列来源于同一非线性动力学系统。如果 $D_2(x_a, x_b) = D_2(x_a) + D_2(x_b)$, 则变量 x_a 和 x_b 时间序列来源于不同的非线性动力学系统, 变量 x_a 和 x_b 属于非线性无关, 彼此不能提供任何信息。

对于由水井、油井以及二者间未知连通性的储层, 这三者组成注采系统而言, 假定有二变量生产动态数据序列, 例如注水井注水量(x_a)和采油井产水量(x_b)。则可通过3种方式进行相空间重构, 重建这一注采系统动力学特征。与之相对应, 也可分别求出这3种不同方式重构注采系统吸引子的关联维。如果利用注水井注水量单变量生产动态数据(x_a), 所重构注采系统吸引子的关联维为 $D_2(x_a)$; 利用采油井产水量单变量生产动态数据(x_b), 所重构注采系统吸引子的关联维为 $D_2(x_b)$; 联合利用注水井注水量和采油井产水量二变量生产动态数据(x_a, x_b), 所重构注采系统吸引子的关联维为 $D_2(x_a, x_b)$, 则油水井井间储层连通性可通过如下方法确定:

1) $D_2(x_a, x_b) \approx D_2(x_a) \approx D_2(x_b)$ 。说明注水井注水量(x_a)和采油井产水量(x_b)来自同一注采系统, 二者具有很强的非线性相关性。3种不同方式所重构注采系统, 具有相同动力学特征及吸引子拓扑结构。也说明油水井井间储层完全连通, 具有同一个注采系统的动力学响应特征。

2) $D_2(x_a, x_b) \approx D_2(x_a) + D_2(x_b)$ 。说明注水井注水量(x_a)和采油井产水量(x_b)来自完全不同的注采系统, 二者非线性无关, 彼此间不能提供任何信息。3种不同方式所重构注采系统, 具有完全不同的动力学特征及吸引子拓扑结构, 没有任何相似性, 油水井井间储层是完全不连通的, 具有不同注采系统的动力学响应特征。

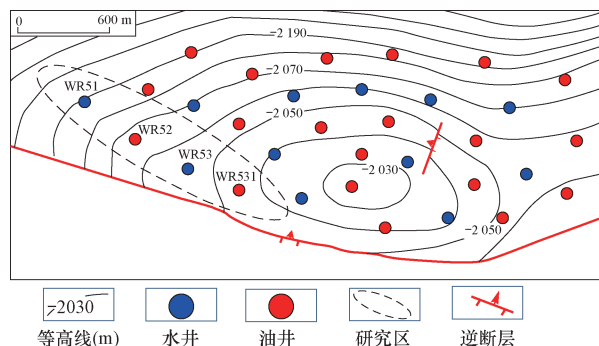
3) 对于介于上述两者之间的情况, 可以通过定义归一化指标来确定

$$R = \frac{|M(x_a, x_b)|}{D_2(x_a, x_b)} \quad (10)$$

其中, $M(x_a, x_b) = D_2(x_a) + D_2(x_b) - D_2(x_a, x_b)$ 。R称为井间储层连通性系数。当油水井间储层为完全连通时, $R = 1$; 当油水井间储层为完全不连通时, $R = 0$; 当连通性处于二者之间情况, $R = 1 \sim 0$ 。这样就可以利用公式(10), 对油水井间储层连通性进行定量解释与评价。

2 应用实例

如图4所示, WR油田为一简单断背斜边水砂岩油藏, 储层为一套扇三角洲前缘沉积体, 含油层段为三间房组(J_2s)。主力油层单一($J_2s^{2(3)}$), 平均孔隙度为16%, 渗透率为 $33.4 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。油田采用注水开发方式, 共有油水井32口, 其中油井20口, 注水井12

图4 WR油田 $J_2s^{2(3)}$ 油层注采井网构造图Fig. 4 Structural map showing the injection-production pattern of $J_2s^{2(3)}$ oil layer in WR oilfield

口,综合含水达到48.7%。在油田西南部,靠近南部断层高部位黑色虚线标注的长椭圆形区域,为实例研究区。将利用上述方法,对研究区内2口采油井(WR52和WR531井)与2口注水井(WR51和WR53)之间储层连通情况进行分析。原综合油藏数值模拟结果和生产动态资料,对这4口井井间储层连通性认识结论为:①注水井WR53井和采油井WR531井之间不连通;②注水井WR53井和采油井WR52井之间连通;③注水井WR51和采油WR52井之间不连通。下面利用上述新方法,对这3组油水井井间储层连通性进行分析。

1) WR53井和WR531井井间储层连通性

从注水井WR53井注水量和采油井WR531井产水量随时间变化曲线可看出(图5a):①在前31个月,WR53井注水量呈持续快速单边下降的趋势,而采油井WR531的产水量较为稳定,波动不大,但整体处于较低水平。WR53井注水量和采油井WR531的产水量间没有相关性;②在第31~51个月区间段,WR53井注水量整体仍呈继续快速下降的趋势,而采油井WR531井产水量也随之下降,二者呈正相关性;③在第51个月时,在对WR53井进行提压增注措施之后,WR53井注水量得到明显恢复,WR531井产水量也随之相应增加,似乎井间储层具有一定的连通性。

图5b为WR53注水量与WR531井产水量 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线图(说明:为了图中显示简洁明了,在 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线簇叠合图中,仅显示 $\tau=3, m=15$ 时曲线,以下相同)。从图5b可看出,利用WR53井注水量、WR531井产水量,以及联合利用WR53注水量与WR531井产水量二变量生产动态数据,通过这3种不同生产动态数据相空间重构方法,所重构这一注采系统动力学特征完全一致。相空间重构 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线非常相似,三者几乎粘合在一起,所重构注采系统吸

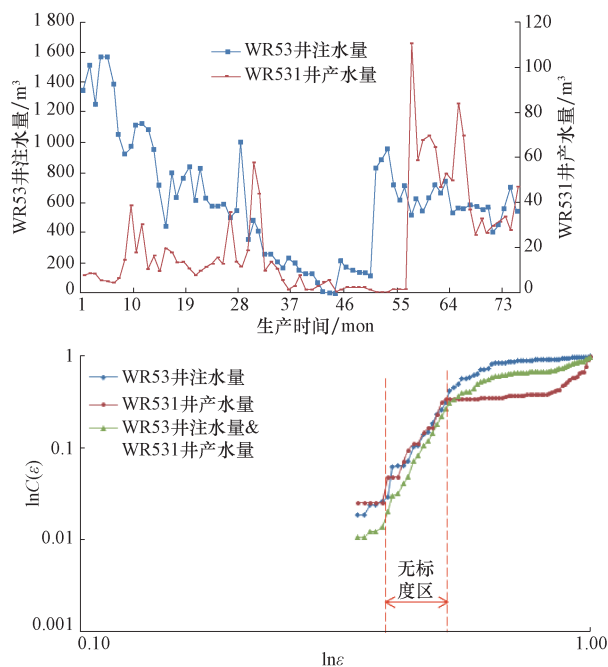


图5 WR油田WR53井和WR531井井间储层连通关系

Fig. 5 Analysis of the interwell reservoir connectivity between Well WR53 and Well WR531

a. WR53井注水量与WR531井产水量随时间变化曲线;b. WR53井注水量和WR531井产水量的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线

引子的关联维,即无标度区间三者的斜率基本一致,在 $\tan(45^\circ)$ 左右,即 $D_2(x_a) \approx D_2(x_b) \approx D_2(x_a, x_b) \approx 1$ 。因此,无论利用WR53井注水量、WR531井产水量单变量生产动态数据,还是联合利用WR53井注水量和WR531井产水量二变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子均具有相同的拓扑结构,属于同一注采系统的动力学响应特征。根据公式(10),WR53井和WR531井井间储层连通性系数 R 为1,连通性很好,而原认识结论却是不连通的。

2) WR53井和WR52井井间储层连通性

从注水井WR53井注水量和采油井WR52井产水量随时间变化曲线可看出(图6a):①在前44个月,WR53井注水量呈持续快速单边下降的趋势,而WR52井产水量整体却呈显著上升趋势,二者呈明显负相关性;②在第44~51个月区间段,WR53井注水量很低,注入能力大幅下降。而采油井WR52产水量也随之明显下降;③在注水第51个月时,在对WR53井进行提压增注措施之后,注水井WR53井注水量得到明显恢复,并与采油井WR52产水量间整体呈较好正相关性,显示井间储层具有较好的连通性。

图6b为WR53注水量和WR52井产水量的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线图,从图6b可看出,利用WR53注水井注水量、WR52采油井产水量,以及联合WR53注水量和

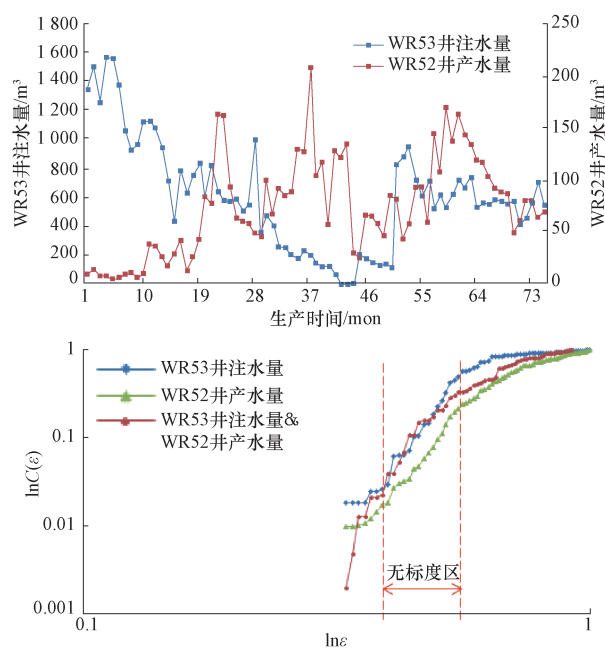


图6 WR油田WR53井和WR52井井间
储层连通关系分析

Fig. 6 Analysis of the interwell reservoir connectivity between
Well WR53 and Well WR52

a. WR53井注水量与WR52井产水量随时间变化曲线;b. WR53井注水量和WR52井产水量的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 关系曲线

WR52井产水量二变量生产动态数据,通过这3种不同生产动态数据相空间重构方法,所重构这一注采系统动力学特征完全一致,相空间重构 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线也非常相似,三者近乎平行,所重构注采系统吸引子的关联维,即在无标度区间三者的斜率基本一致,在 $\tan 42^\circ$ 左右,也即 $D_2(x_a) \approx D_2(x_b) \approx D_2(x_a, x_b) \approx 0.9$ 。

因此,无论利用WR53井注水量、WR52油井产水量单变量生产动态数据,还是联合利用WR53井注水量和WR52井产水量二变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子均具有相同的拓扑结构,属于同一注采系统动力学响应特征。根据公式(10),WR53井和WR52井井间储层连通性系数 R 为1,井间连通性很好,并与原认识结论一致。

另外,由于实例(2)中所重构注采系统吸引子的关联维为0.9,要小于前面实例(1)关联维1.0,也说明井间储层连通性的复杂程度可能要略小于前者。

3) WR51井和WR52井井间储层连通性

从注水井WR51井注水量和采油井WR52井产水量随时间变化曲线可看出(图7a),在前6个月,WR51井注水量处于高位运行,第7个月之后,WR51井注水量大幅下降,处于低位运行,并且整体一直保持相对稳

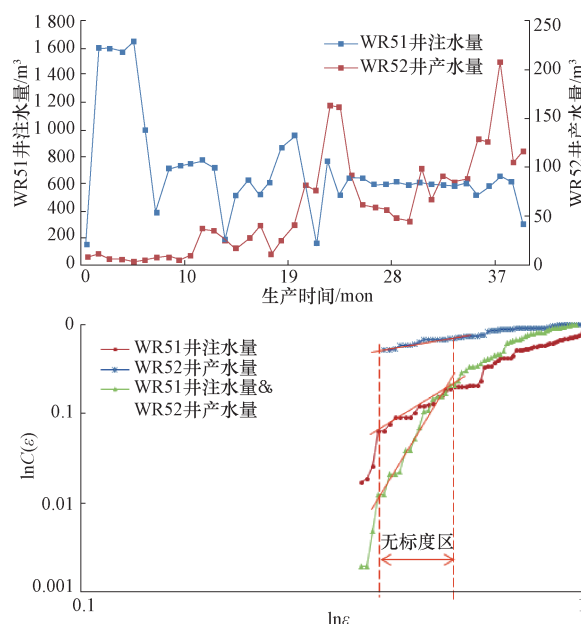


图7 WR油田WR51井和WR52井井间储层连通关系

Fig. 7 Analysis of the interwell reservoir connectivity
between Well WR51 and Well WR52

a. WR51井注水量与WR52井产水量随时间变化曲线;
b. WR51井注水量和WR52井产水量的
 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 关系曲线

定不变状态。而采油井WR52井产水量整体却呈明显逐渐上升趋势,二者间没有任何相关性。

图7b为WR51注水量和WR52井产水量的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线图,从图7b可看出,利用WR51注水井注水量、WR52采油井产水量,以及联合WR51注水量与WR52井产水量二变量生产动态数据,通过这3种不同生产动态数据相空间重构方法,所重构这一注采系统动力学特征完全不同,相空间重构的 $\ln \varepsilon - \ln C(\varepsilon)$ 曲线间相差很大,三者各不相同。利用注水井WR51井注水量单变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子的关联维,即无标度区间斜率 $D_2(x_a)$ 为1.74;利用采油井WR52井产水量单变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子的关联维,即无标度区间斜率 $D_2(x_b)$ 为0.27;联合利用WR51注水量与WR52井产水量二变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子的关联维,即无标度区间斜率 $D_2(x_a, x_b)$ 为2.04。由于 $D_2(x_a) + D_2(x_b) \approx D_2(x_a, x_b)$ ($1.74 + 0.27 \approx 2.04$),因此,无论利用WR51井注水量、WR52井产水量单变量生产动态数据,还是联合利用WR51井注水量和WR52油井产水量二变量生产动态数据,所重构注采系统吸引子均具有完全不同的拓扑结构,不属于同一注采系统的动力学响应特征。根据公式(10),WR51井和WR52井井间储层连通性系

数 R 接近零(0.014),二者为非线性不相关,彼此间不能提供任何信息,井间储层完全不连通,与原认识结论一致。

3 结论

1) 油藏注水开发系统是一个复杂的非线性多相流时变系统,油水井生产动态特征受多因素综合影响。在油水井的生产动态数据中,隐含着油水井井间储层连通性信息。

2) 基于有限长度的油水井多变量生产动态数据,可在不清楚系统各因素间相互作用机理的情况下,通过相空间重构方法,重构这一注采系统动力学特征,求取注采系统吸引子关联维,就有可能从生产动态数据中,提取出井间储层连通性信息。

3) 油水井多变量生产动态数据中,包含了更多的反映注采系统动力学特征信息,采用多变量生产动态数据进行相空间重构,不仅可以提高重构注采系统动力学特征的精度及可靠性,而且避免通过单变量生产动态数据重构注采动力学系统,有可能会产生一定误差的问题。

4) 实际资料处理与应用效果表明,采用多变量相空间重构技术,从油水井生产动态数据中,提取井间储层连通性信息的方法是有效的、可行的。该方法使用起来比较简单、省时,尤其适合于油田现场使用。

参 考 文 献

- [1] 逯晓喻,黄志龙,陈践发,等. 原油中含氮化合物分布特征与储层连通性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):19-24.
- Lu Xiaoyu, Huang Zhilong, Cheng Jianfa, et al. Distribution features of nitrogen compounds in crude oil and reservoir connectivity[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 19-24.
- [2] 姜瑞忠,李林凯,徐建春,等. 低渗透油藏非线性渗流新模型及试井分析[J]. 石油学报,2012,33(2):264-268.
- Jiang Ruizhong, Li Linkai, Xu Jianchun, et al. A nonlinear mathematical model for low-permeability reservoirs and well-testing analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 264-268.
- [3] 刘志斌,任宝生,赵明. 基于时变系统的油田产量功能模拟预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(4):181-184.
- Liu Zhibin, Ren Baoshen, Zhao Ming. A functional simulation for oil-field output forecast based on time-varying system[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 181-184.
- [4] 曾玉强,李晓平,黎彬,等. 一种简易的注入水流动方向识别方法[J]. 新疆石油地质,2007,28(2):238-241.
- Zeng Yuqiang, Li Xiaoping, Li Bin, et al. A simple method for identification of injected water flow direction[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(2): 238-241.
- [5] 赵俊英. 基于混沌吸引子形态特征的多相流动力学特性研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- Zhao Junying. Dynamics characteristics of multiphase flow based on attractor morphology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [6] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence[C]. Dynamical systems and turbulence, Lecture Notes in Mathematics. New York: Springer-Verlag, 1981:366-381.
- [7] 赵峰,孙波,张承慧. 基于多变量相空间重构和卡尔曼滤波的冷热电联供系统负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):399-406.
- Zhao Feng, Sun Bo, Zhang Chenghui. Cooling, heating and electrical load forecasting method for CCHP system based on multivariate phase space reconstruction and Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 399-406.
- [8] 黄发明,殷坤龙,张桂荣,等. 基于相空间重构和小波分析-粒子群向量机的滑坡地下水位预测[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2015(7):1254-1265.
- Huang Faming, Yin Kunlong, Zhang Guirong, et al. Landslide ground-water level time series prediction based on phase space reconstruction and wavelet analysis-support vector machine optimized by PSO algorithm[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015(7): 1254-1265.
- [9] Hastings S P, Troy W C. A shooting approach to chaos in the Lorenz equations[J]. Journal of Differential Equations, 1996, 127(1):41-53.
- [10] 岳毅宏,韩文秀,程国平. 多变量时间序列相空间重构中参数的确定[J]. 控制与决策,2005,20(3):290-293.
- Yue Yihong, Han Wenxiu, Cheng Guoping. Determination of parameters in the phase-space reconstruction of multivariate time series[J]. Control and Decision, 2005, 20(3): 290-293.
- [11] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(5):346.
- [12] 付强,李晨溪,张朝曦. 关于 G-P 算法计算混沌关联维的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2014(3):275-282.
- Fu Qiang, Li chengxi, Zhang Zhaoxi. G-P algorithm for evaluating the correlation dimension in chaos[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014(3): 275-282.
- [13] 吴云,周硕恩. 多时间序列求关联维 D_2 [J]. 大地测量与地球动力学,1995(1):20-25.
- Wu Yun Zhou Shuoyu. Determining correlation dimension from multiple time sequences D_2 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 1995 (1): 20-25.
- [14] 张春涛,马千里,彭宏. 基于信息熵优化相空间重构参数的混沌时间序列预测[J]. 物理学报,2010,59(11):7623-7629.
- Zhang Chuntao, Ma Qianli, Peng Hong. Chaotic time series prediction based on information entropy optimized parameters of phase space reconstruction[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(11): 7623-7629.
- [15] 张艳兰,栾元重,尹燕运,等. 混沌时间序列相空间重构及特性识

- 别[J]. 测绘科学, 2016, 41(4): 15-18.
- Zhang Yanlan, Luan Yuanchong, Yin Yanyun, et al. The deformation monitoring of chaotic time series phase space reconstruction and feature recognition [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(4): 15-18.
- [16] 王振洲, 宁新宝. 同步十二导联心电图信号的关联维分布[J]. 科学通报, 2000, 45(8): 873-877.
- Wang Zhengzhou, Ning Xinbao. The distribution of the correlation dimension of the synchronous 12-lead ecg signals [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(8): 873-877.
- [17] 杨志安. 用等间距分格子法计算互信息函数确定延迟时间[J]. 计算物理, 1995, 12(4): 442-448.
- Yang Zhian. Determination of delay time by calculating mutual information with equally distant space cells [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1995, 12(4): 442-448.
- [18] 杜柳青, 殷国富, 余永维. 基于混沌相空间重构的数控机床运动精度预测[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 397-402.
- Du Liqing, Yin Guofu, Yu Yongwei. Prediction of numerical control machine's motion precision based on chaotic phase space reconstruction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 397-402.
- [19] 刘艳辉, 王芳, 朱文超, 等. 用Cao方法探讨ENSO可预报性的年代际变化[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(2): 49-54.
- Liu Yanhui, Wang Fang, Zhu Wenchao, et al. Research on decadal variability of ENSO predictability with Cao method [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2013, 30(2): 49-54.
- [20] 于江龙, 彭跃华. 应用互信息法和Cao方法探讨ENSO的可预报性[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 9-12.
- Yu Jianglong, Peng Yuehua. Predictability study of ENSO with mutual information and Cao methods [J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(1): 9-12.
- [21] 樊重俊. 多个动态序列之间非线性相关性度量方法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(4): 433-473.
- Fan Chongjun. Measuring approach for nonlinear dependence among time series [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(4): 433-473.

(编辑 张玉银)

(上接第442页)

- Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development-taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [4] 惠健, 刘学利, 汪洋, 等. 塔河油田缝洞型油藏单井注氮气采油机理及实践[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 75-77.
- Hui Jian, Liu Xueli, Wang Yang, et al. Mechanism and practice and nitrogen injection for EOR in Fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 75-77.
- [5] 黄江涛, 周洪涛, 张莹, 等. 塔河油田单井注氮气采油技术现场应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 103-105.
- Huang Jiangtao, Zhou Hongtao, Zhang Ying, et al. Field application of oil recovery technique by nitrogen injection in single-well in Tahe oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 103-105.
- [6] 杨敏, 靳佩. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏储层分类评价技术[J]. 石油与天然气地质, 2011, 25(1): 14-18.
- Yang Min, Jin Pei. Reserve classification and evaluation of the Ordovician fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 25(1): 14-18.
- [7] 张希明, 杨坚, 杨秋来等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评价技术[J]. 石油学报, 2004, 32(4): 625-630.
- Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai, et al. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 32(4): 625-630.
- [8] SY/T 6366, 油田开发主要生产技术指标及计算方法[S]. SY/T 6366. Main production technical index and calculation method of oilfield development [S].
- [9] 张锐. 油田注水开发效果评价方法[M]. 石油工业出版社, 2010, 101-103.
- Zhang Rui. Oilfield waterflood development effect evaluation method [M]. Petroleum Industry Press, 2010, 101-103.
- [10] 朱桂良, 刘中春, 康志江. 缝洞型碳酸盐岩油藏大尺度试井新方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(13): 172-175.
- Zhu Guiliang, Liu Zhongchun, Kang Zhijiang. The new method of large scale well test in fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(13): 172-175.
- [11] Fetkovich M J. Decline curve analysis using type curves [J]. JPT, 1980, 32(6): 1065-1077.
- [12] Blasingame, Lee W J. Variable-rate reservoir limits testing [R]. SPE15028, 1986.
- [13] Blasingame T A, Johnston J L, Lee W J. Type curve analysis using the pressure integral method [R]. SPE 18799, 1989.
- [14] Blasingame, T A, McCray, etc. Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flowrate systems [J]. SPE21513, 1991.
- [15] 姜汉桥, 姚军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 中国石油大学出版社, 2006, 29-35.
- Jiang Hanqiao, Yao Jun, Jiang Ruizhong. Principles and methods of reservoir engineering [M]. China University of Petroleum Press, 2006, 29-35.

(编辑 张玉银)