

第二十四期：离散井模型-理论

用渗流等效管流的方法

在 STARS 软件中，有三种模型可以用于井计算，分别是源汇井模型、离散井模型（DW）和灵活井模型（FW）。这个三种模型适用的模拟功能列表如下：

	源汇井 (Sink/Source)	离散井 (DW)	灵活井 (Flex Well)
重力计算	显式 (head)	隐式	隐式
摩阻计算	GRAV-FRIC-HLOS	●	●
窜流	X-FLOW	●	●
井身轨迹	LAYERXYZ		LAYERXYZ
分支井	LAYERXYZ		LAYERXYZ
不稳定特征模拟 (Transient)		TRANSIENT on	●
流体分离 (Fluid segregation)		●	●
油管模拟 (Tubing)		最多一个可以模拟 一根油管	最多可以模拟 三根油管
SAM	PHWELLBORE	PHWELLBORE	Not yet
限流射孔模拟 (LEP A-R)	LEP	LEP	Not yet
限流射孔模拟 (LEP T-A)			Not yet
堵塞模拟 (plugging)		PERMSLD	SOLID_BLOCK

●表示可以模拟此功能

从本期开始，将分为三期内容介绍离散化井筒模型的理论、关键字以及实例。

离散井模型是全耦合的井筒计算模型。该模型用来模拟井筒以内及井筒与油藏/上覆岩层间的流体流动及热传导。每段井筒（射孔）的质量及热量守恒方程与油藏方程一起求解。

1、井筒流动（Wellbore Flow）

为了能够同步求解井筒及油藏方程，需要将管流方程转变成为渗流的达西方程。这就意味着，将计算多孔介质油藏的达西方程用于计算井筒的管流，井筒也就有了相应的渗流属性，例如孔隙度、渗透率等。比如，渗透率是通过将管流速度与渗流速度等效获得。

多孔介质中 x-方向速度方程为：

$$v = -\frac{kk_r}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{A7.1})$$

k – 渗透率

k_r – 相对渗透率

$\frac{\partial \phi}{\partial x}$ – 势梯度

μ – 粘度

管流中匀速流动速度方程：

$$v^2 = \frac{r_w}{f\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{A7.2})$$

r_w – 井筒半径

f – 范宁摩擦系数

ρ – 质量密度

假定管柱中相对渗透率曲线为直线，相对渗透率值从 0 到 1，那么对单相流动 $kr = 1$ ，而多相流动 kr 等于饱和度的值。对层流而言， $f = 16/Re$ ，而

$$Re = \frac{2v\rho r_w}{\mu} \quad (\text{A7.3})$$

将这些值代入到(A7.2)中，将得到层流模型中的渗透率：

$$\frac{r_w^2}{8} \quad (\text{A7.4})$$

紊流中渗透率表达式较为复杂，取决于摩擦因子、流体粘度和密度。并可以通过方程式(A7.1) 和 (A7.2) 表示

$$k = \mu \left[\frac{r_w}{\rho f} \frac{\partial x}{\partial \phi} \right]^{1/2} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{A7.5})$$

渗透率在每一个时间步更新，渗透率的值将取决于流动类型和流体组成。势梯度 $\partial\Phi/\partial x$ 为摩擦力、重力和粘性力之和。对于紊流，单相流动摩擦因子通过 Colebrook 方程计算：

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \ln \frac{1}{2\varepsilon} + 3.48 - 4 \ln \left[1 + \frac{9.35}{2\varepsilon \text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (\text{A7.6})$$

ε – 相对粗糙度

当井筒内有两相流动（气-液），需要在摩阻压降中考虑持液量。持液量代表液体和气体之间有滑脱效应。持液量大小取决于流态，比如每相持液量的大小也就是每相的速率。持液量 R_g 通过 Bankoff 关系式得到：

$$\frac{1}{Y} = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_g} \left[1 - \frac{k}{R_g} \right] \quad (\text{A7.7})$$

关系式中参数 K 为雷诺数、弗劳德数以及流动质量空隙率 Y 的方程。 K 的取区间为 0.185 至 1。气相流度的变化代表液相流速与气相流速的差值，比如气相相对渗透率随着气相饱和度与空隙率 R_g 比值增大而增大。**这样，管流方程中液体持液量的计算等效于多孔介质中饱和度的计算。**

由于持液量关系式选择不同，可分别用于向上流动或水平流动。

2、环空流动（Annulus Flow）

在某些井中，需要同时考虑油管和环空流动。油管流动与井筒流动类似处理。对层流而言，环空内渗透率计算式如下：

$$k_a = \frac{1}{8} \left[r_a^2 + r_t^2 - \frac{r_a^2 - r_t^2}{\ln \frac{r_a}{r_t}} \right] \quad (\text{A7.8})$$

r_a – 环空半径

r_i – 油管半径

紊流的速度和渗透率与环空水力直径一起计算。上述关系式也用于计算摩阻压降及气液相滑脱效应。需要正确的面积以及水力直径。

3、油管-环空流动 (Tubing-Annulus Flow)

沿着油管，在油管与环空之间只有热传导。流体从油管尾部（趾端）流入到环空中。可采用与上述同样的方程，但是计算采用的是等效排液半径为：

$$r_T = r_i \exp\left[\frac{\alpha^2}{\alpha^2 - 1} \ln \alpha - \frac{1}{2}\right] \quad (\text{A7.9})$$

$$\alpha = \frac{r_a}{r_i} \quad (\text{A7.10})$$

4、井筒-油藏流动 (Wellbore-Reservoir Flow)

井筒与油藏网格之间采用与油藏网格之间同样的流体流动和能量交换方式。采用 Peaceman 方程来计算井筒和油藏间的传导率。

$$T_j = \frac{2\pi\Delta x \bar{k}}{\ln \frac{r_o}{r_k}} \left(\frac{k_{rj}}{\mu_j r_j} \right) \quad (\text{A7.11})$$

r_k – 井筒或环空半径

$$\bar{k} = \sqrt{k_x k_y} \quad (\text{A7.12})$$

等效排液半径 r_0 ：

$$r_0 = 0.28 \frac{\left[(k_z / k_y)^{1/2} \Delta y^2 + (k_y / k_z)^{1/2} \Delta z^2 \right]}{(k_z / k_y)^{1/4} + (k_y / k_z)^{1/4}} \quad (\text{A7.13})$$

井筒与油藏之间的传导率是软件内部计算获得，如果需要，用户可以采用关键字*TRANSWB 来修改内部计算该值。

能量的流动项由对流传热和热传导组成。对流传热采用与组分流动方程同样的相传导率 T_j 。而热传导的传导率为：

$$K_0 = \frac{2\pi\Delta x k}{\ln \frac{r_T}{r_k}} \quad (\text{A7.14})$$

等效排液半径

$$r_T = 0.14\sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (\text{A7.15})$$

由于所有井筒守恒方程均为隐式求解，所以每个射孔段流体的流入和流出都改变其所对应井筒段的属性。因此，离散井模型能够正确处理油藏与井筒之间的回流（窜流）。

5、井筒初始化与不稳定特征（Wellbore Initialization and Transient Behavior）

井筒的初始条件决定近井地带油藏的短期特性以及不稳定状态的时间。当流体初始与注入/产出时的压力、温度和组分差别较大，不稳定特性将会持续几天的时间。在提高采收率模拟过程，不稳定特性并不会影响长时段的最终物理结果。然而，在吞吐过程中不稳定特性十分重要，因为吞吐的周期与不稳定状态持续的时间在同一个数量级。一般注入井不稳定状态持续时间更长。当注入低流度流体或井筒中原来就有低流度流体时，不稳定特征持续时间将会增加。不稳定流动特征在试井分析的重要原理之一。

在重油或沥青油藏，由于油相流度较低，井筒不稳定状态（瞬态）对数值模拟的影响将比常规油藏更大。同样，注入井也比生产井影响更大。除此之外，与源汇模型相比，采用模拟不稳定特征的离散井模型的数值计算性能将发生较大变化，因为在源汇模型中假定了拟稳态方法。较小井筒体积会导致压力、温度和饱和度变化过大。即使采用隐式算法，时间步长也会非常小（ $10\text{e-}3$ 至 $10\text{e-}4$ 天，流速较高情况下可能更小）。举例，最坏的情形是常温原油井筒中注入蒸汽，通常发生在一次采油之后。因此，井的类型可以立即改变，但是离散井部分的状态还需要时间来转变，也就是采与注之间的转变。

如果用户并不关心井筒不稳定特性，可以假定初始状态为拟稳态，以避免较

长的平衡周期。可以通过省略关键字*TRANSIENT 或者使用关键字*TRANSIENT OFF 来实现。这个关键字也可用于动态数据部分。当不需要瞬态特性时，STARS 将自动在数模开始时和操作条件改变的每个时间步对离散化井筒进行拟稳态初始化。在拟稳态初始化时，需要考虑操作条件例如压力、产量、组份等。

6、离散井模型的应用

什么时候使用离散化井筒（DW）模型？这个问题并不容易回答，但是如下几点可作为参考。当出现情形时采用简单的源/汇井模型，否则需要考虑离散井模型：

- 1) 源/汇井适用于注入能力较强的油藏，井筒与油藏间的热传导可以忽略。没有底水的重油或沥青油藏注入能力较差，只有通过热传导油才能流动起来，这样不能通过源汇模型来实现。
- 2) 源/汇井适用于流动速度较慢或者管线直径较大，摩阻压降几乎不存在。
- 3) 源/汇井适用于较短的水平井，沿井筒流体性质相同。
- 4) 源/汇井适用于均质油藏，井筒-油藏连同均匀。
- 5) 源/汇井适用于流体分离较少的垂直井。
- 6) 源/汇井适用于生产压差（油藏与井筒之间压力差）大大超过摩阻压降的油藏。用户需要注意的是，井筒内摩阻压降与油藏内压降的比值要比摩阻压降的绝对值重要。举例来说，对于 SAGD 方式开采的渗透率较高且较薄油藏，较低的摩阻压降会对结果有影响；但对较低渗透率的厚油层则没有很大的影响。

离散化井筒模型也可用于其它条件。然而，用户需要注意极端的 PVT 相态和非线性导致的模拟问题。井筒不含岩石不能缓冲温度的影响。当压力和温度接近饱和状态，这些值很小的改变都会导致相态的生成或消失。在油藏，岩石将会吸收不重要的波动热量，从而使相态直接的转变更加平滑。有时，通过定义油管壁并采用关键字*ROCKCP 输入油管壁的热容，会改善这种情况。

下述情况下使用离散井模型会产生收敛性问题：

- 井筒内或井筒与油藏网格之间的流体流动方向不一致。例如，当你已经定义井底关井，而井筒和底层之间仍然存在连通。当已经关井时，采用 `TRANSWB WELBORE CON 0.0` 将井筒与油藏分离开，这样可以克服 90% 的时间步问题。开井时再将 `TRANSWB` 设定到初始值。当井筒与油藏分开时井筒的属性将不正确，因此这种处理收敛问题的方法不能与 `*TRANSIENT ON` 关键字同时使用。当采用 `*TRANSIENT OFF` 关键字，并且处于开井状态，不正确的井筒属性将被拟稳态值覆盖掉。
- 气体渗入到井筒的顶部，在生产井中更加明显。这种情况之下，饱和度和摩尔分数可能改变很大，并且很难再进行下一个时间步的计算。这种情况通常发生在蒸汽（气）突破。解决这个问题的方法是：检查摩尔分数和饱和度的 `*NORM` 值，这些值用于确定下一个时间步的大小，对较大的改变（输出中 `dsmax`, `dymax`, 等）这些值可能太小并不允许时间步长增大。STARS 在离散井模型时，需要将 `*NORM` 值加倍赋值，以克服此问题。如果用放大 `NORM` 值的方法还不奏效，则可以根据井筒的方向尝试修改 `*TRANSI` 或 `*TRANSJ` 或 `*TRANSK` 的值，以降低井筒内流动速度。用户要非常小心地调整传导率乘积因子的数值，因为这个值会影响产量。我们调整参数的目标是在尽量少改变实际结果的情况下可克服收敛性问题。

参考：

Peaceman, D.W., "Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation with Non-Square Grid Blocks and Anisotropic Permeability," SPEJ, June 1983, pp. 531.