

# 基于半解析方法的多分支水平井模型试井解释研究

刘玉龙

长城钻探工程有限公司录井公司, 辽宁 盘锦

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月15日

## 摘要

针对多分支水平井复杂结构渗流表征难题, 本文提出一种基于线源离散与拉普拉斯变换的半解析试井模型。通过Newman乘积原理将任意构型的多分支井筒离散为有限线源段, 结合拉普拉斯域叠加求解方法, 建立了盒状储层中复杂分支结构的瞬态渗流数学模型。该模型突破传统点源方法的几何限制, 能够实现任意结构多分支水平井的建模求解。采用Starfest数值反演技术实现井底压力的高效求解, 并以双分支井为例, 识别出八个典型流动阶段。在此基础上, 通过对储层基本参数和井筒基本参数的敏感性分析, 总结了不同因素对流动阶段特征的影响规律。该模型为任意结构多分支井的试井解释与优化设计提供了普适性理论工具。

## 关键词

水平井, 多分支水平井, 瞬态压力分析, 试井解释, 半解析模型

# Semi-Analytical Modeling for Pressure Transient Analysis of Multilateral Horizontal Well

Yulong Liu

GWDC Mud Logging Company, Panjin Liaoning

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The challenge of seepage characterization for complex structures of multi-branch horizontal wells is addressed in this paper through a semi-analytical well testing model based on line-source discreti-

zation and Laplace transform. Newman's product principle enables the discretization of multi-branch wellbores with arbitrary configurations into finite line-source segments, which, combined with the superposition solution method in the Laplace domain, establishes a transient seepage mathematical model for complex branch structures in box-shaped reservoirs. This model overcomes the geometric limitations of traditional point-source methods, facilitating the modeling and solution of multi-branch horizontal wells with arbitrary configurations. The Stehfest numerical inversion technique ensures efficient calculation of bottom-hole pressure, and case studies on dual-branch wells identify eight typical flow stages. Sensitivity analyses of basic reservoir and wellbore parameters summarize the influence laws of different factors on flow stage characteristics. This model provides a universal theoretical tool for well testing interpretation and optimization design of multi-branch wells with arbitrary structures.

## Keywords

Horizontal Well, Multi-Branch Horizontal Well, Transient Pressure Analysis, Well-Test Interpretation, Semi-Analytical Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着常规油气资源逐渐衰竭,低渗、致密及非均质油气藏成为当前油气勘探开发的重要方向。多分支水平井技术因其具备扩大井筒与储层接触面积、提高采收率、降低单位产量成本等优势,已广泛应用于复杂油藏的高效开发[1]。相比传统直井或单段水平井,多分支结构不仅可增强储层连通性,拓展开采区域,同时具备节省平台数量、适用于空间受限或海上环境等优势[2],在中东、北海、东南亚及我国辽河、长庆等油田中均取得了显著开发成效[3]。

国内外学者在多分支水平井试井解释理论与产能预测方法研究方面已取得了一系列重要进展。

在试井解释方面,Gringarten 与 Ramey [4]首次以格林函数为核心,提出通用源函数叠加框架,为水平井及多分支井渗流分析奠定理论基础。Kuchuk 等[5]将井筒储集与表皮效应引入水平井试井解释,完善了不稳定压力分析方法为克服现有模型在适应复杂井型与储层各向异性方面的局限,Karakas 等[6]构建了多条水平侧钻井段的试井模型,研究了分支间干扰特征;Ouyang 与 Aziz [7]进一步将瞬时点源与 Newman 乘积原理相结合,实现了非对称分支结构的灵活建模,显著提升了计算效率与精度,已广泛应用于现场试井解释。孔祥言[8]基于源函数方法和 Newman 乘积原理,建立了各向异性地层中多分支水平井的瞬态压力解析解,并通过拉氏变换和数值反演获得了含井储和表皮效应的井底压力样板曲线,为国内试井实践奠定了基础。随后,王丽娟[9] [10]利用拉普拉斯数值反演与有限差分,完善了半解析计算流程,显著提高了多分支井试井曲线拟合效率。李树松[11]-[13]基于点源函数理论,建立了水平井和多分支井的不稳态渗流数学模型,并研究和分析了鱼骨形多分支井渗流特征。李道伦等人[14]基于 PEBI 网格和 SRV 渗透率扩增模型,建立了致密油多段压裂水平井试井分析方法。针对超低渗与致密油藏,史文洋等建立了双分支断溶体储层水平合采井压力响应模型,分析了断溶体储层分支特征与压力导数曲线形态的关联性。

产能评价方面,Salas 等[15]采用综合流动阻力模型,揭示了分支长度与主干井径对产能的耦合作用机制。在此基础上,范玉平等[16]针对鱼骨井的特点,建立了半解析方法的产能预测模型。姚志良等[17]

进一步提出建立油藏-井筒耦合的多分支井产能预测模型,系统阐明了分支井几何参数对产能的影响规律,并提出分支非对称布局优化方法,为海上油田高效开发提供了理论支撑。王晓冬[18]则通过压降叠加原理和拟稳态当量井径模型,建立了复杂分支水平井三维渗流产能预测理论体系,为分支井优化设计奠定了理论基础。针对低渗储层,赵静[19]基于水电相似原理和等值渗流阻力法,建立了低渗透油藏分支井井网产能预测模型,明确了井网点数、穿透比和启动压力梯度对产能比的影响。

本研究在前人研究基础上,针对现有模型在复杂井型适应性方面的不足,提出了一种改进的多分支水平井半解析试井模型。与传统的点源方法不同,本模型采用线段源离散方法,可实现对任意形态多分支井筒的精确建模。通过整合井筒储集效应、表皮效应及储层各向异性特征,该模型能够更准确地表征复杂多分支结构的瞬态渗流行为。基于压力瞬时变化曲线的多阶段流动特征分析,结合多参数敏感性研究,为多分支井试井解释与完井优化设计提供了可靠的理论依据和技术支撑。相较于现有模型,本研究在计算精度、适用范围和工程实用性等方面均取得了显著提升,为复杂油气藏的高效开发提供了新的理论工具和方法指导。

## 2. 多分支水平井模型

### 2.1. 条件假设

为了对多分支水平井系统进行瞬态压力动态分析,构建了一种基于源函数理论的半解析模型。为简化问题、便于求解,模型建立过程中作如下基本假设:

多分支水平井位于一个封闭的六面体均质油藏中心,油藏边界为无流边界,主井筒沿  $x$  轴方向布置,分支从主井筒延伸,如图 1 所示;

储层可为各向同性或各向异性介质;

地层流体为单相流体,且具有均质性和弱可压缩性;

储层流动过程忽略重力与毛细管力影响;

流体流动遵循达西定律;

不考虑地层温度变化对压力响应的影响。

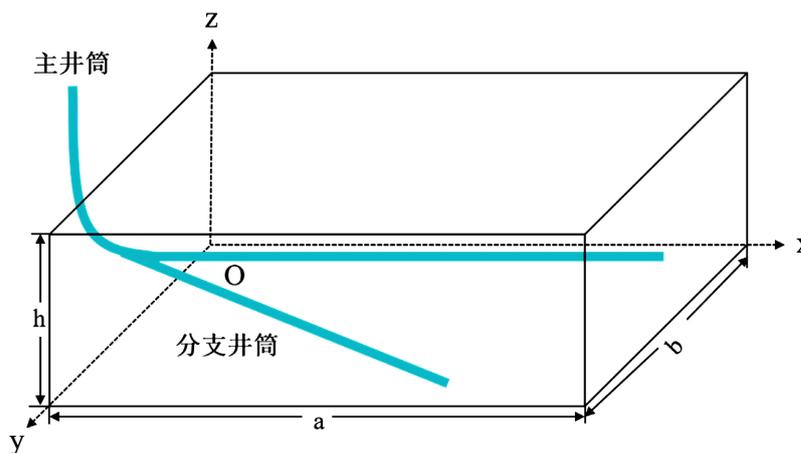


Figure 1. Schematic of a multi-branch horizontal well in a box-shaped reservoir

图 1. 多分支水平井模型示意图

### 2.2. 方法原理

多分支水平井非稳态渗流模型是在水平井非稳态渗流模型的基础上建立的,在构建水平井不稳态渗

流模型过程中，其求解方法往往依赖于点源解。

对各向异性、单相、弱可压缩流体，采用三维扩散方程作为控制方程：

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_x}{\mu\phi C_i} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\mu\phi C_i} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{k_z}{\mu\phi C_i} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (1)$$

引入参考长度  $L_r$ 、参考渗透率  $k_r$  及参考时间：

$$t_r = \frac{\mu\phi C_i L_r^2}{k_r} \quad (2)$$

定义无量纲量：

$$x_D = \frac{x}{L_r}, y_D = \frac{y}{L_r}, z_D = \frac{z}{L_r} \quad (3)$$

$$t_D = \frac{t}{t_r} \quad (4)$$

$$p_D = \frac{p - p_i}{q\mu/(2\pi k_r h)} \quad (5)$$

则式转化为

$$\frac{\partial p_D}{\partial t_D} = \alpha_x \frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + \alpha_z \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} \quad (6)$$

其中

$$\alpha_x = \frac{k_x}{k_r}, \alpha_y = \frac{k_y}{k_r}, \alpha_z = \frac{k_z}{k_r} \quad (7)$$

假设油藏在三个方向均为无流边界(封闭六面体)，先分离变量：

$$p_D(x_D, y_D, z_D, t_D) = p_{x_D}(x_D, t_D) p_{y_D}(y_D, t_D) p_{z_D}(z_D, t_D) \quad (8)$$

分别得到三个一维扩散子方程

$$\frac{\partial p_{x_D}}{\partial t_D} = \alpha_x \frac{\partial^2 p_{x_D}}{\partial x_D^2}, \frac{\partial p_{y_D}}{\partial t_D} = \alpha_y \frac{\partial^2 p_{y_D}}{\partial y_D^2}, \frac{\partial p_{z_D}}{\partial t_D} = \alpha_z \frac{\partial^2 p_{z_D}}{\partial z_D^2} \quad (9)$$

(1) 无限大板源(x 方向)

在无流边界  $x_D = \pm b_D$  条件下，其瞬时板源函数为：

$$\text{NISF}(x_D, t_D) = \frac{x_D^+ - x_D^-}{b_D} \left[ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 (t_D - \tau_D)}{b_D^2}\right) \sin\left(\frac{n\pi(x_D - x_D')}{2b_D}\right) \right] \quad (10)$$

(2) 无限大面源(y/z 方向)

$$\text{NIPF}(y_D, t_D) = \frac{k_y}{2L_r \sqrt{\pi(t_D - \tau_D)}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y_D - y_D' + 2na_D)^2}{4(t_D - \tau_D)}\right) \quad (11)$$

z 方向形式同理，仅替换  $y_D \rightarrow z_D, k_y \rightarrow k_z$ 。

按照 Newman 乘积原理，多维解可由若干一维解相乘获得[20]，如图 2 所示。

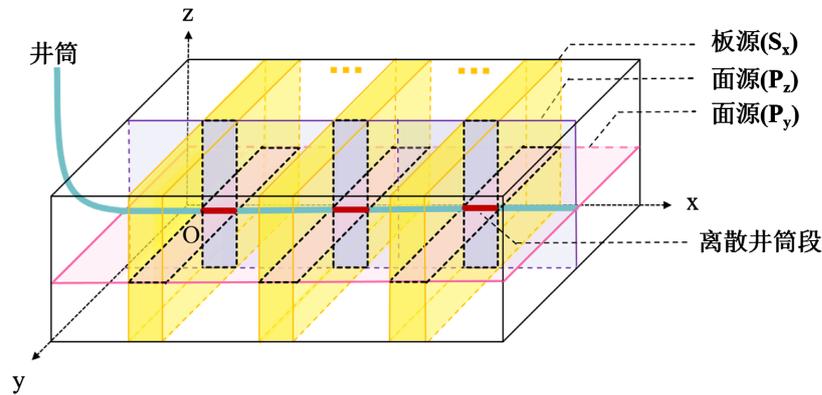


Figure 2. Diagram of the wellbore discretized into line source  
图 2. 井筒线段源离散模型示意图

将(10)与面源(11)在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向相乘, 可得无限长线源(line-source)瞬时压力响应:

$$\Delta p_D = \text{NISF}(x_D, t_D) \text{NIPF}(y_D, t_D) \text{NIPF}(z_D, t_D) \quad (12)$$

对于有限长度线段  $[x_D^-, x_D^+][x_D^-, x_D^+][x_D^-, x_D^+]$ , 沿段长积分可转化为线源段压力函数; 多分支水平井可进而离散为  $m$  个线源段并叠加。

设第  $j$  段线源长  $L_{sj}$ , 瞬时无量纲产率  $q_{Dj}$ , 其源强度

$$S_{sj} = \frac{2\pi h L_r^2}{L_{sj}} q_{Dj}(t_D) \quad (13)$$

对井内任一点  $(x_D, y_D, z_D)$  的压力响应为

$$p_D(x_D, y_D, z_D, t_D) = \sum_{j=1}^m \int_0^{t_D} S_{sj}(\tau_D) \text{NISF}_{x,j} \text{NIPF}_{y,j} \text{NIPF}_{z,j} d\tau_D \quad (14)$$

其中  $\text{NISF}_{x,j}$ ,  $\text{NIPF}_{y,j}$ ,  $\text{NIPF}_{z,j}$  均以线段中心坐标代入式(10)~(11)计算。

卷积积分(3~11)在时域计算耗时且可能振荡。对时间卷积核施行拉普拉斯变换:

$$\bar{p}_D(u) = \sum_{j=1}^m \frac{2\pi h L_r^2}{L_{sj}} \bar{q}_{Dj}(u) \text{NISF}_{x,j}(u) \text{NIPF}_{y,j}(u) \text{NIPF}_{z,j}(u) \quad (15)$$

式中  $u$  为拉普拉斯变量,  $\bar{q}_{Dj}(u)$  为产率的拉普拉斯像。由于三类线源解在  $t_D$  上均呈指数形式, 其拉普拉斯像可写为简单的有理函数, 极大地提高了数值稳定性与叠加效率。

求得  $\bar{p}_D(u)$  后, 选用 Stehfest 数值反演(或 Gaver-Stehfest、de Hoog 算法)恢复时域压力与压力导数:

$$p_D(t_D) \approx \frac{\ln 2}{t_D} \sum_{k=1}^N V_k \bar{p}_D\left(\frac{k \ln 2}{t_D}\right) \quad (16)$$

$V_k$  为反演系数,  $N=8$  时已满足工程精度。压力导数  $\frac{\partial p_D}{\partial \ln t_D}$  的计算可采用对数尺度下等距采样的三点拉格朗日插值公式, 以更清晰地反映早期、中期阶段压力瞬态变化的趋势。

### 3. 模型求解

为准确刻画多分支水平井在三维油藏中的瞬态压力变化过程, 本文将井筒进行线性离散处理。根据

主干段长度、分支长度、分支间距及方位角等参数，计算出井筒各节点空间坐标，并将其划分为若干线段单元。任意相邻节点  $(x_i, y_i, z_i)$  与  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ 。

之间的线段长度计算公式为：

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (17)$$

各线段的中心点坐标采用三维线性插值确定：

$$x_{i,j} = x_{i-1} + \left(j + \frac{1}{2}\right) \Delta x_i, \quad y_{i,j} = y_{i-1} + \left(j + \frac{1}{2}\right) \Delta y_i, \quad z_{i,j} = z_{i-1} + \left(j + \frac{1}{2}\right) \Delta z_i \quad (18)$$

在此基础上，构建拉普拉斯域下的线源压力响应模型。根据源函数叠加原理，每一离散线段的压力由所有其他线段的叠加影响决定。设第  $j$  段对第  $i$  段的影响系数为  $NF_{ij}$ ，其计算公式为：

$$NF_{ij} = \frac{2\pi h L_r^2}{L_s} \int_0^\infty \text{NISF}(x_{ij}^D) \cdot \text{NIPF}(y_{ij}^D) \cdot \text{NIPF}(z_{ij}^D) \cdot e^{-u\tau_D} d\tau_D \quad (19)$$

由于该积分上限为无穷，本文引入切比雪夫数值积分法进行近似，以提升计算稳定性和精度。

对所有线段建立线性方程组，表示为：

$$\bar{p}_i = \sum_{j=1}^{n-1} NF_{ij} Q_j \quad (20)$$

其中  $Q_j$  为第  $j$  段的无量纲产率。加入质量守恒条件  $\sum_j Q_j = 1$  后，构建完整方程组，采用高斯消元法求解各线段的流量分布。

求得流量后，可进一步计算拉普拉斯域中的压力。为获取时间域响应，本文采用 Stehfest 数值反演算法：

$$p_D(t_D) \approx \frac{\ln 2}{t_D} \sum_{k=1}^N V_k \cdot \bar{p}_D \left( \frac{k \ln 2}{t_D} \right) \quad (21)$$

反演后，采用对数均匀采样下的三点拉格朗日插值公式计算压力导数：

$$\frac{dp_D}{d \ln t_D} \approx a_0 p_0 + a_1 p_1 + a_2 p_2 \quad (22)$$

其中系数  $a_0, a_1, a_2$  根据时间点  $\ln t_{D,i}$  的位置自动调整(前向差分、中心差分或后向差分)。

## 4. 模型分析与验证

### 4.1. 模型验证

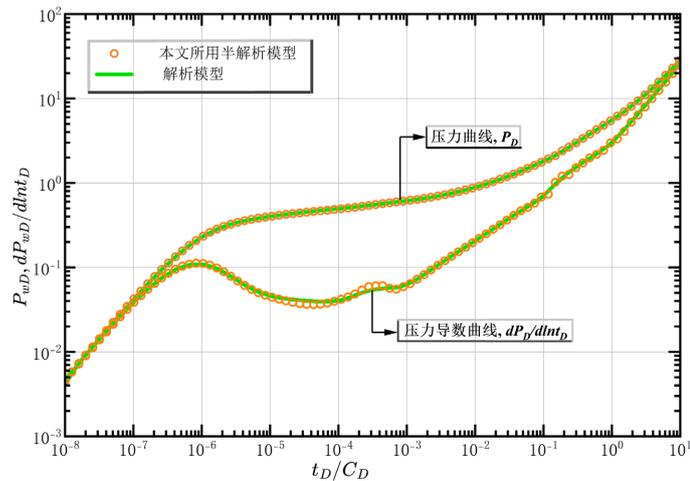
为验证所建立半解析模型的准确性，本文选取典型多分支水平井工况，通过计算其无量纲压力与压力导数曲线，并与商业软件中已有解析模型的计算结果进行对比分析。两组模型在相同储层与井筒参数条件下进行模拟，其基本参数如表 1 所示。

在上述参数设定下，模拟构建了一个双分支的水平井系统，分支与主井筒夹角为  $120^\circ$ 。储层为各向异性的封闭均质油藏，地层流体为中等粘度原油。

通过对比本文所构建半解析模型与商业软件中解析解所计算得到的无量纲压力与压力导数曲线，结果显示两者在整个时间尺度上均具有良好一致性，验证了本文模型在处理此类多分支结构下瞬态渗流问题的准确性与适用性。相关对比结果见图 3 所示。

**Table 1.** Reservoir and well basic parameters used for model validation  
**表 1.** 模型验证所用储层与井筒参数

类型	参数	V 值	单位
油藏参数	X 方向渗透率	0.4	md
	Y 方向渗透率	0.4	md
	Z 方向渗透率	0.1	md
	孔隙度	0.2	—
	油藏长度	5000	m
	油藏宽度	1000	m
	油藏高度	30	m
	油藏类型	均质	—
	流体粘度	4	cp
	综合压缩系数	0.001	1/MPa
	流体体积系数	1.08	—
	初始压力	28	MPa
	额定产量	10	m <sup>3</sup> /d
	多分支井参数	井筒储集系数	$1 \times 10^{-7}$
表皮因子		0.1	—
分支数		2	—
分支井筒长度		500	m
分支角度		120	°



**Figure 3.** Comparison of dimensionless pressure and pressure derivative curves between the proposed model and the analytical solution

**图 3.** 本文模型与解析解的无量纲压力及压力导数曲线对比

#### 4.2. 参数敏感性分析

图 4 展示了双分支水平井压力瞬态响应的典型双对数特征曲线。基于压力导数曲线形态特征，可将

流动过程划分为 8 个典型阶段：

- (1) 纯井储阶段：压力及其导数曲线呈单位斜率直线，反映井筒流体弹性膨胀主导的流动特征；
- (2) 过渡流阶段：井储效应减弱后，导数曲线出现显著驼峰特征；
- (3) 早期径向流阶段：各分支独立生产，导数曲线呈现水平或微凹特征，近井地带流体径向流动；
- (4) 垂向边界线性流阶段(z 轴方向)：压力导数曲线呈现 0.5 斜率特征，流体受垂向边界影响形成线性流动；
- (5) 流动再分配阶段：压力导数曲线出现明显拐点，主要流动模式由垂向线性流向平面过渡；
- (6) 纵向边界线性流阶段(y 轴方向)：压力导数曲线斜率显著增大，流动状态同时受纵向边界约束和分支间干扰的双重影响；
- (7) 横向边界线性流阶段(x 轴方向)：压力导数曲线变化反映纵向边界对流动的约束作用；
- (8) 拟稳态流阶段：晚期导数曲线呈单位斜率上升，压力扰动已波及全部封闭边界。

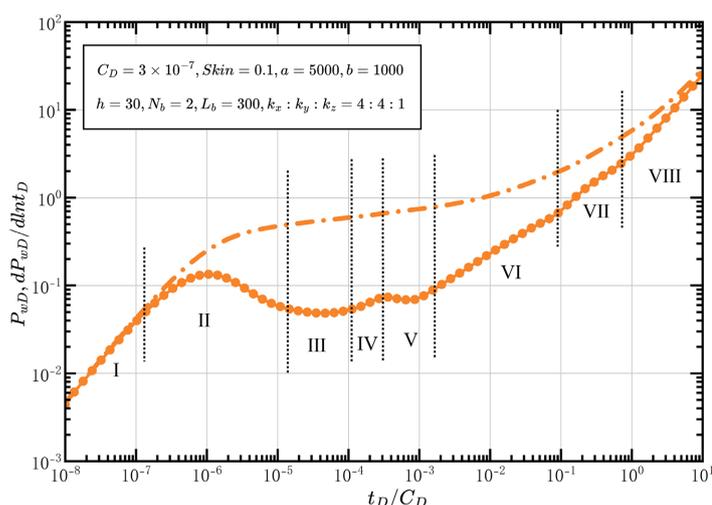


Figure 4. Flow regime zoning of pressure/derivative log-log curves for dual-branch horizontal well

图 4. 双分支水平井压力及导数双对数曲线流态阶段划分图

图 5 给出了双分支水平井井筒储集变化对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。在其他参数不变时，随着井筒储集系数增大，压力 - 压力导数曲线整体右移：纯井储段显著加长，驼峰延后且幅度减小；当储集系数较高时，第一径向流及随后的垂向、纵向线性流阶段依次推迟，而拟稳态段几乎重合。其原因在于井筒可压缩体积越大，早期产量更多依赖井内流体弹性释放，削弱了近井 - 储层的瞬时耦合，从而推迟了压力扰动向储层的传递。

图 6 为双分支水平井表皮系数变化曲线图。在保持其他参数不变的条件下，表皮系数增大仅在近井区增加附加压降，导致过渡流阶段的驼峰显著抬升，而压力扰动向储层扩散的时序几乎不受影响，后续各典型流动阶段的出现时间基本维持不变。

图 7 给出了分支长度对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。随着分支长度增大，曲线整体下移，且纵向边界线性流阶段显著延长。这是因为较长分支扩大了泄流面积，增强了流体的补给能力，使两分支间压力波更早相遇形成干扰，同时降低了近井压降，使得压力及压力导数曲线位置更低。

图 8 给出了分支数量对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。随着分支数量的增加，曲线整体沿纵向下移，压力导数平台显著降低。这是因为分支数量增加扩大了井筒与储层的泄油面积，提高流体补给能力与排泄效率，降低近井压降，从而使导数曲线维持在更低水平，整体开发效果得到增强。然而，

当分支数继续增加时，曲线下降幅度趋于减缓，泄流面积的边际增益逐渐减小。

图 9 给出了储层径向与垂向渗透率比值变化对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。当径向渗透率比值逐渐增大时，早期径向流阶段导数曲线位置明显上抬，压力波在水平面内扩散加速，使纵向边界线性流阶段更早出现且持续时间缩短。

图 10 给出了储层长度变化对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。当储层长度增加时，压力扰动需沿  $x$  轴传播更长距离方能抵达横向封闭边界，使得边界效应延后，致使横向线性流阶段维持时间增大。同时长程传播导致能量耗散加剧，进一步削减了该阶段导数曲线的斜率。

图 11 给出了储层宽度变化对双分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。随着储层宽度的增加，压力波到达纵向边界所需时间更长，纵向边界受控线性流阶段显著拉长，并且能量耗散过程延长，进而降低该阶段导数陡度并延续线性流状态。

图 12 给出了储层高度变化对上分支水平井压力 - 压力导数曲线的影响。随着储层高度的增加，压力波需更长时间才能触及顶底封闭面，因此垂向边界线性流阶段出现的时间延后，同时更大的储层高度提升了近井压降，压力及压力导数曲线整体抬升。

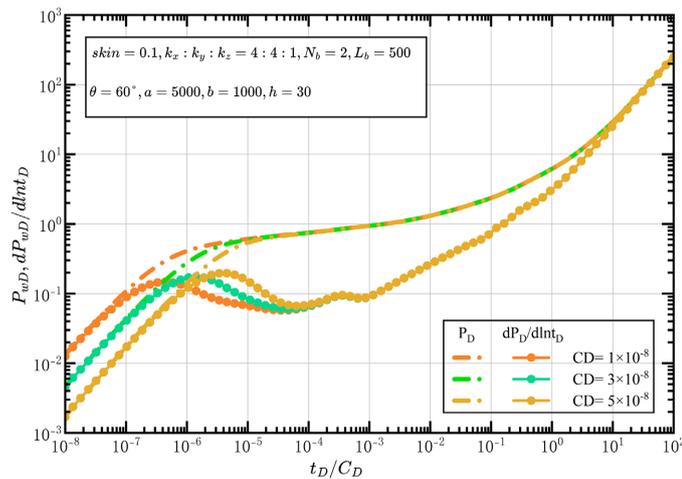


Figure 5. Wellbore storage effect in dual-branch horizontal wells

图 5. 双分支水平井井筒储集变化曲线图

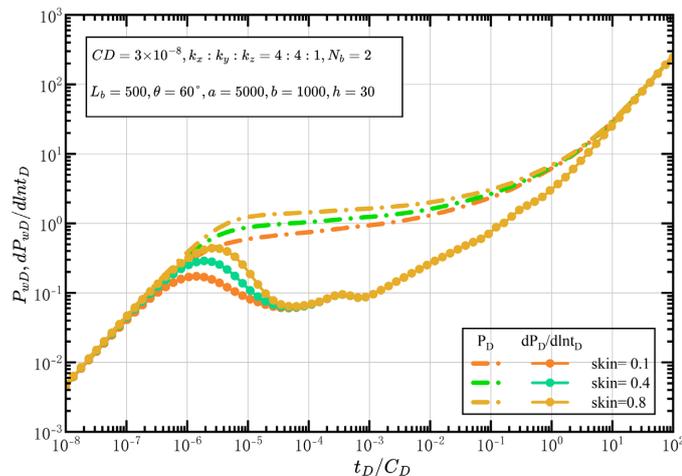
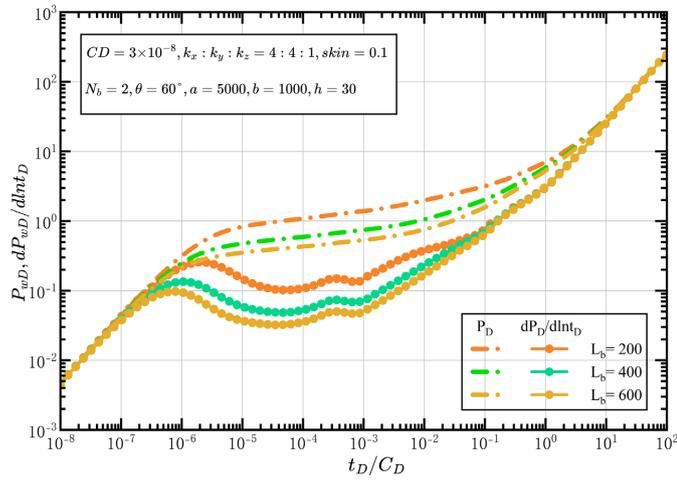
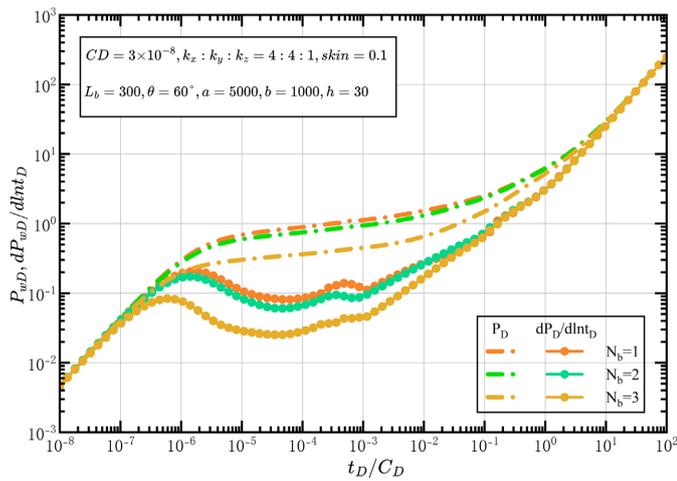


Figure 6. Skin factor effect in dual-branch horizontal wells

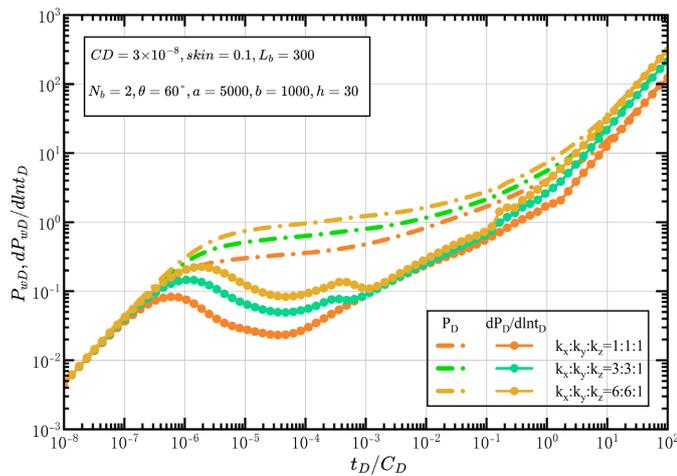
图 6. 双分支水平井表皮系数变化曲线图



**Figure 7.** Branch length sensitivity in dual-branch horizontal wells  
**图 7.** 双分支水平井分支长度变化曲线图



**Figure 8.** Branch quantity impact in dual-branch horizontal wells  
**图 8.** 双分支水平井分支数量变化曲线图



**Figure 9.** Horizontal-to-vertical permeability ratio in dual-branch horizontal wells  
**图 9.** 双分支水平井 - 垂向渗透率比变化曲线图

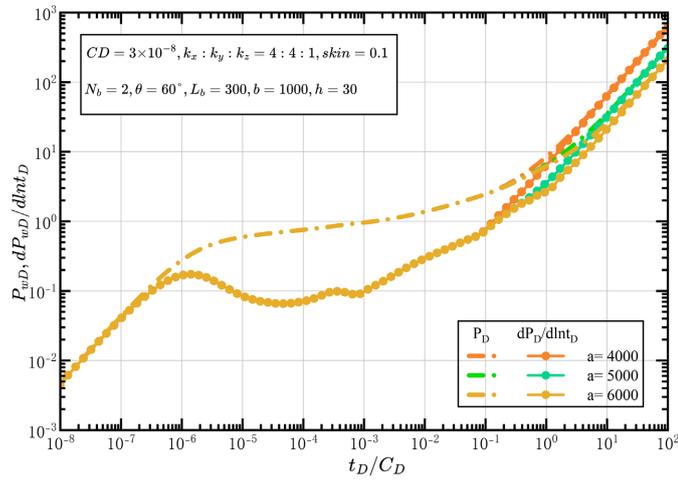


Figure 10. Reservoir length effect in dual-branch horizontal wells  
 图 10. 双分支水平井储层长度变化曲线图

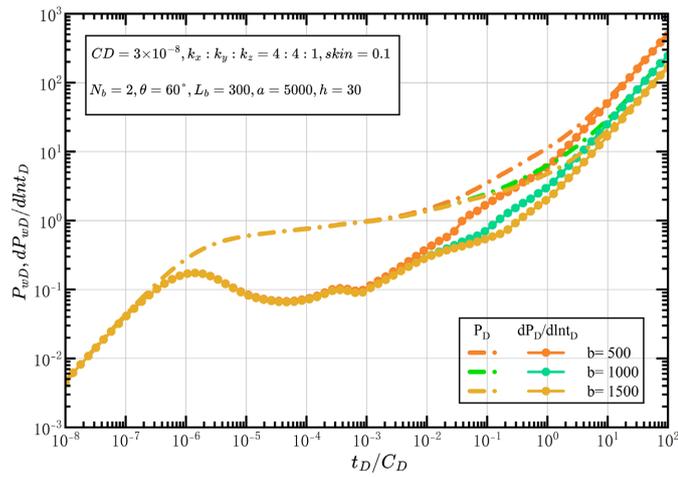


Figure 11. Reservoir width effect in dual-branch horizontal wells  
 图 11. 双分支水平井储层宽度变化曲线图

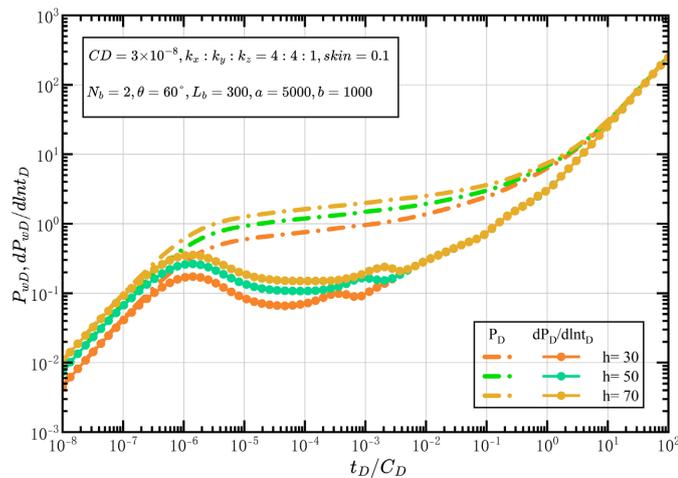


Figure 12. Reservoir height effect in dual-branch horizontal wells  
 图 12. 双分支水平井储层高度变化曲线图

## 5. 结论

本研究针对多分支水平井在封闭盒状储层中的瞬态渗流行为,建立了井筒线源离散-拉普拉斯反演的半解析模型,并系统开展参数敏感性分析,得到如下主要结论:

(1) 所建模型通过将不同分支数量的水平井筒离散为有限线源,可对任意分支长度、分支数量等参数与方位组合的多分支水平井进行建模求解,为复杂多分支井试井解释提供了高效而通用的计算框架。

(2) 双分支井可划分八个典型流动阶段:纯井储、过渡流、早期径向流、垂向边界线性流、流动再分配、纵向边界线性流、横向边界线性流和拟稳态流。阶段判别充分体现了压力波到达各个边界的先后次序及分支间干扰机制。

(3) 井筒储集系数增大使曲线整体右移,纯井储段显著延长,随后各阶段依次推迟;表皮系数升高主要抬高过渡流及径向流导数平台,对阶段时序影响有限;分支长度越长,曲线整体下移且纵向线性流段延长,分支数量增加则导数整体下降但呈边际递减;储层长度、宽度、高度分别延后或延长对应方向的边界受控线性流段;径-垂渗透率比增大抬高早期和末期导数,并使纵向线性流提前出现。

## 参考文献

- [1] 周福建, 苏航, 梁星原, 等. 致密油储集层高效缝网改造与提高采收率一体化技术[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 1007-1014.
- [2] 李根生, 田守增, 张逸群. 空化射流钻径向井开采天然气水合物关键技术研究进展[J]. 石油科学通报, 2020, 5(3): 349-365.
- [3] 孙焕泉, 蔡勋育, 胡德高, 等. 页岩气立体开发理论技术与实践——以四川盆地涪陵页岩气田为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 573-584.
- [4] Gringarten, A.C. and Ramey, H.J. (1973) The Use of Source and Green's Functions in Solving Unsteady-Flow Problems in Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **13**, 285-296. <https://doi.org/10.2118/3818-pa>
- [5] Kuchuk, F.J. (1995) Well Testing and Interpretation for Horizontal Wells. *Journal of Petroleum Technology*, **47**, 36-41. <https://doi.org/10.2118/25232-pa>
- [6] Karakas, M., Yokoyama, Y.M. and Arima, E.M. (1991) Well Test Analysis of a Well with Multiple Horizontal Drain-holes. Middle East Oil Show, Bahrain, 16-19 November 1991, 715-721. <https://doi.org/10.2118/21424-ms>
- [7] Ouyang, L. and Aziz, K. (2001) A General Single-Phase Wellbore/Reservoir Coupling Model for Multilateral Wells. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **4**, 327-335. <https://doi.org/10.2118/72467-pa>
- [8] 孔祥言, 徐献芝, 卢德唐. 分支水平井的样板曲线和试井分析[J]. 石油学报, 1997, 18(3): 98-104.
- [9] 王丽娟. 多分支井试井解释模型和数值计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- [10] 王丽娟, 吴小庆, 房国庆, 等. 多分支井试井模型及求解[J]. 西部探矿工程, 2012, 24(2): 97-98.
- [11] 李树松. 水平井及多分支井的试井解释方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2006.
- [12] 李树松, 陈伟, 段永刚, 等. 点源函数在水平井及多分支井试井理论中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 56-60+64.
- [13] 李树松, 段永刚, 陈伟, 等. 压裂水平井的试井解释理论和方法[J]. 油气井测试, 2005, 14(5): 5-8.
- [14] 李道伦, 杨景海, 闫术, 等. 致密油大规模多段压裂水平试井解释及外区渗透率对试井曲线的影响[J]. 地球科学, 2017, 42(8): 1324-1332.
- [15] Rosa, A.J. and Carvalho, R.d.S. (1989) A Mathematical Model for Pressure Evaluation in an Infinite-Conductivity Horizontal Well. *SPE Formation Evaluation*, **4**, 559-566. <https://doi.org/10.2118/15967-pa>
- [16] 范玉平, 韩国庆, 杨长春. 鱼骨井产能预测及分支井形态优化[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 101-104.
- [17] 姚志良, 曹飞, 丁士东, 等. 分支井产能预测模型及分支形态优化[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 56-59.
- [18] 王晓冬, 于国栋, 李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. 石油勘探与开发, 2006(6): 729-733.
- [19] 赵静, 赵泉. 低渗透分支井井网产能预测及参数敏感性分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(1): 112-116.

- 
- [20] Yao, S., Zeng, F., Liu, H. and Zhao, G. (2012) A Semi-Analytical Model for Multi-Stage Fractured Horizontal Wells. SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, 30 October-1 November 2012, 201-212.  
<https://doi.org/10.2118/162784-ms>