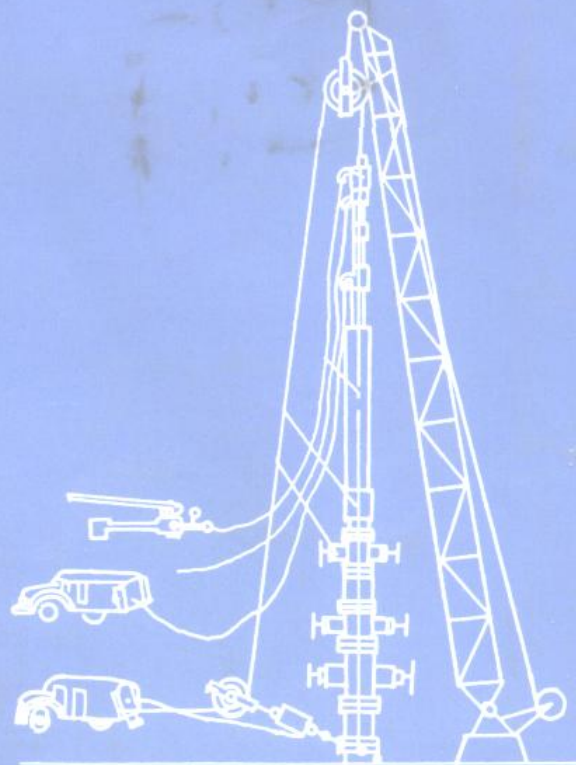


试井理论与实践

中国石油天然气总公司开发生产局 编



石油工业出版社

登录号	126568
分类号	T E 353-53
种次号	002

试井理论与实践

中国石油天然气总公司开发生产局 编



石油0121761

石油工业出版社

内 容 提 要

本书汇编了我国试井方面近几年来发表的有典型意义的论文。从水平井、气井、多层油藏、复合油藏的试井，以及干扰试井、分形油藏压力特征、试井的人工神经网络等各个方面，全方位地总结了我国试井工作在理论和实践上所取得的重要进展。

本书对油田现场和科研部门从事油藏工程方面的技术人员及有关院校师生来说，是一本极为有用的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

试井理论与实践/中国石油天然气总公司开发生产局编.
北京:石油工业出版社,1996.6

ISBN 7-5021-1653-2

I. 试…

II. 中…

III. 试井-研究-文集

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 23091 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开 18¹/₂ 印张 464 千字 印 1-1500

1996 年 6 月北京第 1 版 1996 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-1653-2/TE·1409

精装定价: 36.00 元

平装定价: 26.00 元

前 言

最近十多年来，试井技术在国外有了较快的发展，目前已经形成了较完整的现代试井理论和试井技术体系，在油—气田的实际应用范围越来越广。

80年代以来，随着我国石油、天然气工业的蓬勃发展，我国试井技术无论在理论上或者在实际应用上都有了长足的进步。试井技术在油、气矿场的应用，为确定油、气藏参数，研究油、气藏特性，从而正确确定开发部署发挥了重要的作用。

为了迎接第十五届世界石油大会在北京的召开，进一步推动我国现代试井技术的发展，特编辑“试井理论与实践”一书。

本书选编了最近十年来在试井理论与实践方面有代表性的论文共26篇，内容涉及到各种现代试井方法及其在不同类型油气藏中的应用实例。其中极大多数文章是在国内外刊物中已经发表过的。限于篇幅，有不少好文章没有收集进去。

本书的出版将对国内从事试井理论研究的研究人员和实际应用的工程技术人员有所帮助。本书译成英语出版也有助于国外同行加深了解中国现代试井技术的发展现状，从而进一步促进技术交流。

由于编辑时间紧迫，编者水平有限，有错误和不当之外，欢迎读者批评指正。

全书由周成勋负责主审，参加编审工作的还有：张嘉祥、冉新权、刘尉宁、陈钦雷等。

周成勋

1995年12月23日

目 录

分枝水平井、多井底水平井和径向水平井的压力动态分析·····	(1)
在双重孔隙介质中有限导流水平井的试井分析方法·····	(14)
双重介质封闭油藏水平井压力动态特征分析·····	(26)
井底具有水平裂缝的试井分析理论·····	(34)
气井层间压力平衡的计算·····	(40)
陕甘宁中部气田干扰试井研究·····	(55)
气井井口压力恢复曲线异常处理方法研究·····	(66)
矿场气井早期压力恢复异常分析方法及应用·····	(77)
多层油藏中导压系数引起的压力变化及层间越流·····	(89)
利用不稳定试井确定多层油藏的分层参数·····	(117)
多层压力恢复曲线形态理论和应用研究·····	(158)
层状油藏注水井试井分析方法的研究及应用·····	(167)
地层参数早期识别的试井分析方法·····	(176)
早期试井分析的新方法·····	(183)
多相复合驱替条件下的试井分析方法·····	(188)
组合模型油藏中无因次压降的精确解·····	(197)
考虑前缘有超复的复合油藏模型理论研究·····	(209)
非牛顿和牛顿流体复合油藏瞬态压力解·····	(222)
复合油藏干扰试井分析方法·····	(230)
串漏垂向干扰试井的特征及解释方法·····	(236)
应用脉冲试井资料对非均质油藏进行定量描述的新方法·····	(247)
井筒储存对用脉冲试井识别裂缝方位的影响·····	(254)
油气两相渗流的试井解释方法·····	(261)
试井分析的人工神经网络(ANN)方法·····	(267)
用生产测试资料求取地层参数的优化拟合分析方法·····	(275)
分形油藏压力动态特征·····	(283)

分枝水平井、多井底水平井和径向水平井的压力动态分析

姚 军 李爱芬
(石油大学)

一、引言

随着钻井技术的日臻完善,近几年针对一些特殊类型的油藏开发提出了一些新的钻井方法,如分枝水平井、多井底水平井、径向水平井等,以适应地层的特点和最大限度地发挥油藏的潜能。这类井与油藏的接触面积较大,从根本上改变了流体在地下,尤其是在近井地带的流动情况,可大幅度提高油井的产量,具有广阔的前景。

众多国内外学者对水平井的诸多油藏工程方面的问题进行了大量研究,提出了一些求解水平井压力动态的方法,主要有格林函数及源函数方法、积分变换方法。但是由于分枝水平井、多井底水平井和径向水平井的井身结构复杂,给其压力求解带来了一定的困难,国内外学者在这方面研究的较少。本文采用点源函数方法、镜象映射方法及叠加原理推导了无限大板状油藏中任一条线源的不稳态压力解,由此公式组合出了分枝水平井、多井底水平井及径向水平井的不稳态压力公式,并分析了分枝水平井、多井底水平井及径向水平井的压力动态,为“九五”期间该类型井的重点攻关课题的研究奠定了坚实的理论基础。

二、分枝水平井、多井底水平井及径向水平井的压力求解方法

在求解不稳定渗流问题时,广泛应用格林函数,而点源函数作为一种特殊的格林函数在求解一些特殊问题时具有应用方便、物理意义明确的优点。

1. 点源函数

Gringarten^[1]给出了无限大油藏(平面上、纵向上均是无限大的)瞬时点源的压力表达式:

$$\Delta p(M, \tau) = \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{1/2} \phi C} \exp \left\{ -\frac{1}{4\tau} \left[\frac{r_1^2 + r^2 + 2rr_1 \cos(\theta - \theta_1)}{\eta_r} + \frac{(z - z_2)^2}{\eta_z} \right] \right\} \quad (1)$$

式中 (r, θ, z) ——任意点 M 的柱坐标;
 $\Delta p(M, \tau)$ ——点 M 处的瞬时压力降, MPa;
 q ——点源 P 的强度, m^3/d ;
 η_r ——油藏平面上的导压系数, m^2/s ;

η_z ——油藏纵向上的导压系数, m^2/s ;

ϕ ——油藏岩石的孔隙度, 小数;

C ——油藏岩石的综合压缩系数, $1/\text{MPa}$ 。

(1) 式的物理意义为: P 点处强度为 q 的点源在 τ 时刻 M 点处产生的瞬时压力降为 $\Delta p(M, \tau)$ 。根据这一物理意义, 可根据镜像映射方法及叠加原理来求得任意形状的油藏和源在任意点产生的压力降。

2. 无限大板状油藏中任一线源的压力求解方法

如图 1 所示, 无限大板状油藏中任一线源的平面和剖面示意图。

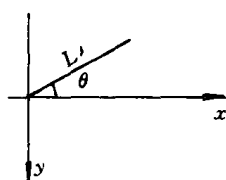
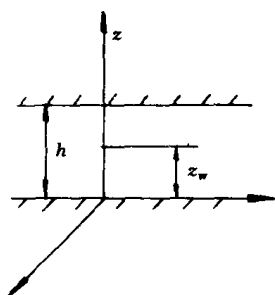


图 1 无限大板状油藏中任一线源的平面和剖面示意图

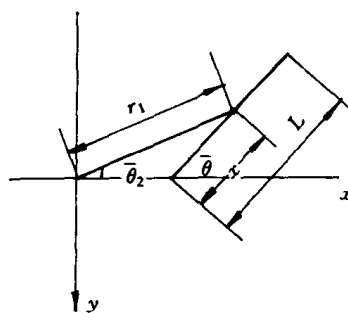


图 2 任意线源在 r —平面上的示意图

源与油藏的相对位置由图中 a 、 L 、 $\bar{\theta}$ 和 z_w 确定。由于所研究的问题在纵向上不是无限大的, 不能应用 (1) 式的无限空间点源函数。具体的推导过程如下:

(1) 应用镜像映射方法消除边界的影响, 使其在纵向上成为无限大空间油藏。由于上下边界是不渗透的, 因此, 映射出的虚拟线源的性质 (源强度和长度) 均与原来的线源相同。但由于线源在纵向上是偏心的, 映射出的虚拟线源离 y —平面的距离 z_w 可分为两大类: $-(z_w + z_w)$ 和 $-(z_w - z_w)$;

(2) 任意一条线源 τ 时刻在 $M(r, \theta, z)$ 处产生的压力降推导。线源可看成由无限点源组成的, 图 2 为任意线源在 r —平面上的示意图。

由图 2 可看出, 在线源上点的坐标由下式计算:

$$r_1 = \sqrt{a^2 + x^2 + 2ax\cos(\pi - \theta)} \quad (2)$$

$$\bar{\theta}_1 = \arctg \frac{x\sin\bar{\theta}}{a + x\cos\bar{\theta}} \quad (3)$$

由 (1) 式可得到线源上的任一点源在 $M(r, \theta, z)$ 处的瞬时压力降:

$$\Delta p'(M, \tau) = \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{1/2} \phi C} \exp \left\{ -\frac{1}{4\tau} \left[\frac{(z - z_1)^2}{\eta_z} + \frac{r_1^2 + r^2 + 2rr_1 \cos(\theta - \bar{\theta}_1)}{\eta_r} \right] \right\} \quad (4)$$

对 (4) 式从 0 到 L 对 x 进行积分, 即可得到一条线源在 $M(r, \theta, z)$ 处的瞬时压力降:

$$\Delta p''(M, \tau) = \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{1/2} \phi C} \exp \left[-\frac{(z - z_1)^2}{4\tau \eta_z} \right] \cdot \int_0^L \exp \left[-\frac{r_1^2 + r^2 + 2rr_1 \cos(\theta - \bar{\theta}_1)}{4\tau \eta_r} \right] dx \quad (5)$$

式中 r_1 和 $\bar{\theta}_1$ 均为 x 的函数。

(3) 所有线源 τ 时刻在 $M(r, \theta, z)$ 处产生的瞬时压力降推导。由叠加原理可得到所有线源在 $M(r, \theta, z)$ 处的压力降:

$$\Delta p'''(M, \tau) = \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{1/2} \phi C} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(z + zn h + z_w)^2}{4\eta_z \tau} \right] + \exp \left[-\frac{(z + zn h - z_w)^2}{4\eta_z \tau} \right] \right\} \cdot \int_0^L \exp \left[-\frac{r_1^2 + r^2 + 2r_1 r \cos(\theta - \bar{\theta}_1)}{4\eta_r \tau} \right] dx \quad (6)$$

(4) 所有线源在 0 到 t 时间内在 M 点产生的总压降推导。由于这些源在 $0 \sim t$ 时间内是连续作用的, 故 (6) 式对时间进行积分即可得到所有线源 $0 \sim t$ 时间内在 M 点处产生的总压降:

$$\Delta p(M, a, L, \bar{\theta}, z_w) = \int_0^t \frac{q}{8(\pi^3 \eta_r^2 \eta_z \tau^3)^{1/2} \phi C} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(z + zn h + z_w)^2}{4\eta_z \tau} \right] + \exp \left[-\frac{(z + zn h - z_w)^2}{4\eta_z \tau} \right] \right\} \cdot \int_0^L \exp \left[-\frac{r_1^2 + r^2 + 2r_1 r \cos(\theta - \bar{\theta}_1)}{4\eta_r \tau} \right] dx d\tau \quad (7)$$

为应用方便，将 (7) 式无因次化，为此定义一组无因次参数：

$$p_D = \frac{K_r h [p_i - p]}{1.842 \times 10^{-4} q L \mu} \quad (8)$$

$$t_D = \frac{3.6 K_r t}{\phi \mu C_t h^2} \quad (9)$$

$$x_D = x/h \quad (10)$$

$$L_D = L/h \quad (11)$$

$$z_D = z/h \quad (12)$$

$$a_D = a/h \quad (13)$$

$$r_D = r/h \quad (14)$$

$$\alpha = K_z/K_r \quad (15)$$

式中 K_r ——油藏水平方向的渗透率， μm^2 ；
 K_z ——油藏纵向上的渗透率， μm^2 ；
 h ——油层厚度，m；
 q ——单位长度上的源强度， $\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$ ；
 L ——源长度，m；
 μ ——地层流体粘度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

利用上面定义的无因次参数对 (7) 式无因次化，则有：

$$p_D(M, a_D, L_D, \bar{\theta}, z_w) = \frac{1}{4\sqrt{\pi L_D \alpha}} \int_0^{t_D} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(z_D + 2n + z_{wD})^2}{4\alpha\tau_D} \right] \right. \\ \left. + \exp \left[-\frac{(z_D + 2n - z_{wD})^2}{4\alpha\tau_D} \right] \right\} \cdot \int_0^{L_D} \exp \left[-\frac{r_D^2 + r_{iD}^2 - 2r_D r_{iD} \cos(\theta - \bar{\theta}_i)}{4\tau_D} \right]$$

$$\cdot dx_D \cdot \frac{1}{\tau^{3/2}} d\tau_D \quad (16)$$

r_{1D} 和 $\bar{\theta}_i$ 可由下面两式计算:

$$r_{1D} = \sqrt{a_D^2 + x_D^2 - 2a_D x_D \cos(\pi - \bar{\theta})} \quad (17)$$

$$\bar{\theta}_i = \arctg \frac{x_D \sin \bar{\theta}}{a_D + x_D \cos \bar{\theta}} \quad (18)$$

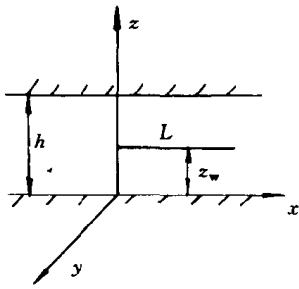


图3 无限大板状均质油藏一口水平井的剖面 and 平面示意图

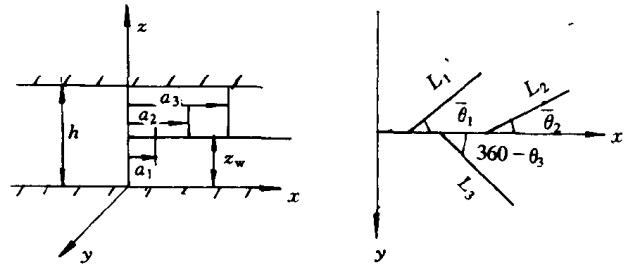


图4 分枝水平井模型的剖面及平面示意图

3. 各种水平井模型的压力求解方法

利用公式(16)可给出水平井、分枝水平井、多井底水平井和径向水平井的压力公式。

(1) 无限大板状油藏水平井的压力公式。图3为无限大板状均质油藏一口水平井的剖面 and 平面示意图。

图中, 水平井与极轴重合, 水平井的左端通过 z 轴。此时 $a_D=0$, $\bar{\theta}=0$ 。由(16)式则可得到水平井的压力公式:

$$p_{D\text{水平井}} = p_D(M, O, L_D, O, z_{wD}) \quad (19)$$

M 取等价压力点的坐标

(2) 无限大板状均质油藏中分枝水平井的压力公式。图4为具有三条分枝段的分枝水平井模型的剖面 and 平面示意图。

图中每条分枝段的长度分别为 L_{D1} 、 L_{D2} 、 L_{D3} , 其夹角分别为 $\bar{\theta}_1$ 、 $\bar{\theta}_2$ 、 $\bar{\theta}_3$, 各分枝段到 z 轴的距离分别为 a_{D1} 、 a_{D2} 和 a_{D3} 。由于各分枝段和水平段在油层的同一平面上, 故偏心距离同为 z_{wD} 。由叠加原理可得水平段及各分枝段在 M 处的压力降:

$$p_{D\text{分枝井}} = \sum_{j=1}^3 p_{Dj}(M, a_{Dj}, L_{Dj}, \bar{\theta}_j, z_{wD}) + p_{D\text{水平井}} \quad (20)$$

对于具有 N 条分枝的分枝水平井同样可用上式。

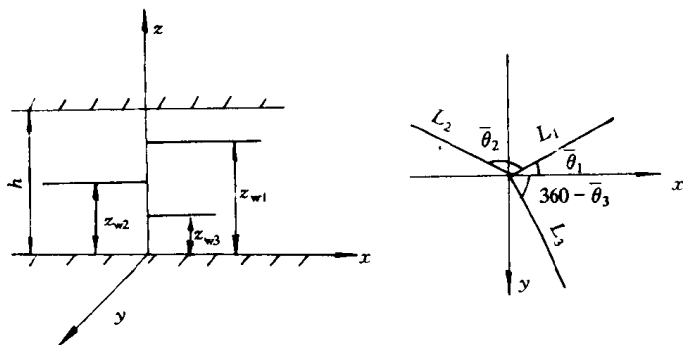


图5 多井底水平井模型的剖面 and 平面示意图

(3) 无限大板状油藏中多井底水平井的压力公式。图5为具有三条水平段的多井底水平井模型的剖面 and 平面示意图。

图5中各水平段与极轴的夹角分别为： $\bar{\theta}_1$ 、 $\bar{\theta}_2$ 、 $\bar{\theta}_3$ ；各水平段的长度分别为： L_{D1} 、 L_{D2} 、 L_{D3} ；各水平段到 z 轴的距离均为零；各水平段的偏心距离分别为 z_{wD1} 、 z_{wD2} 、 z_{wD3} 。由 (16) 式可得到多井底水平井的压力公式：

$$p_{D\text{多井底}} = \sum_{j=1}^3 p_{Dj}(M, O, L_{Dj}, \bar{\theta}_j, z_{wDj}) \quad (21)$$

对于具有 N 条水平段的多井底水平井同样可用 (21) 式。

(4) 无限大板状均质油藏中径向水平井的压力公式。如图6所示模型：

图6中各水平段与极轴的夹角分别为： $\bar{\theta}_1$ 、 $\bar{\theta}_2$ 、 $\bar{\theta}_3$ ；各水平段的长度分别为： L_{D1} 、 L_{D2} 、 L_{D3} ；各水平段到 z 轴的距离均为零；各水平段的偏心距均为 z_{wD} 。由 (16) 式可得到径向水平井的压力公式：

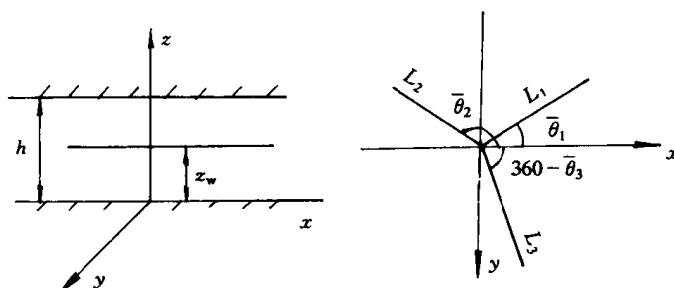


图6 无限大板状砂岩油藏径向水平井模型剖面 and 平面示意图

$$p_{D\text{径向井}} = \sum_{j=1}^3 p_{Dj}(M, O, L_{Dj}, \bar{\theta}_j, z_{wD}) \quad (22)$$

对于具有 N 条水平段的径向水平井同样可用 (22) 式。

三、压力快速计算方法

由 (16) 式看出，压力公式是一个二重积分，本文采用 Gauss - Legendre 积分方法进行

二重积分计算。

公式中的无穷积分项的收敛快慢在很大程度上决定着这些公式计算的快慢。从公式可看出：当 τ_D 很大时级数的收敛较慢，而当 τ_D 较小时收敛速度快。为此采用泊松公式：

$$\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \exp\left[-\frac{(zn\beta - \beta_o)^2}{4\tau}\right] = \frac{\sqrt{2\tau}}{\beta} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \exp\left(-\frac{n^2\pi^2\tau}{\beta^2}\right) \cos \frac{n\pi\beta_o}{\beta} \right] \quad (23)$$

对级数求和项进行化简得到下式：

$$\begin{aligned} & \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{(z_D + 2n + z_{wD})^2}{4\tau_D\alpha}\right] + \exp\left[-\frac{(z_D + 2n - z_{wD})^2}{4\tau_D\alpha}\right] \right\} \\ &= 2\sqrt{\pi\tau_D\alpha} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} [\exp(-n^2\pi^2\tau_D\alpha) \cos(n\pi z_D) \cdot \cos(n\pi z_{wD})] \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

(24) 式的左端当 τ_D 较小时求和级数收敛快。这样在不同的时间范围用 (24) 式的左端或右端，可大幅度提高级数求和的速度，从而提高整个计算的速度。

四、计算结果分析

1. 水平井的压力动态分析

如图 7 是无限大板状油藏中一条水平井条件下的双对数无因次压力与无因次时间的曲线，图 8 是图 7 相应曲线的压力导数曲线。图中的压力为水平井端部的无因次压力。

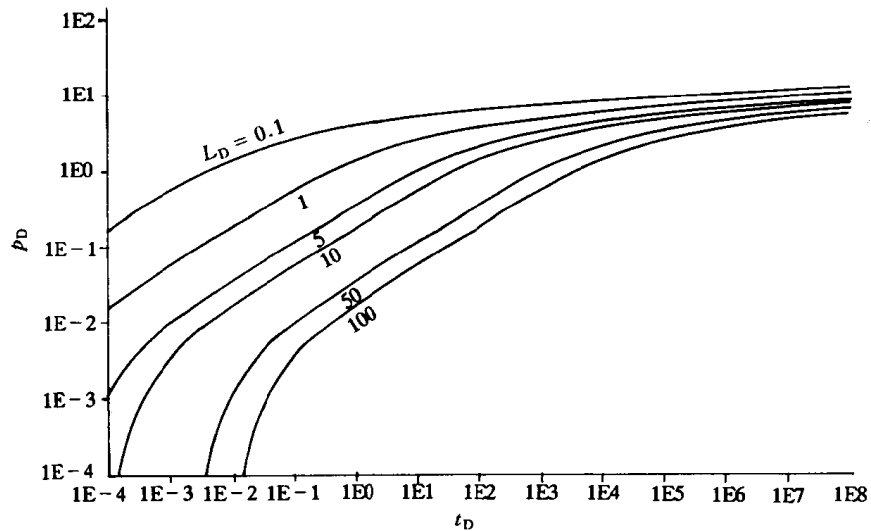


图 7 L_D 对水平井无因次压力的影响

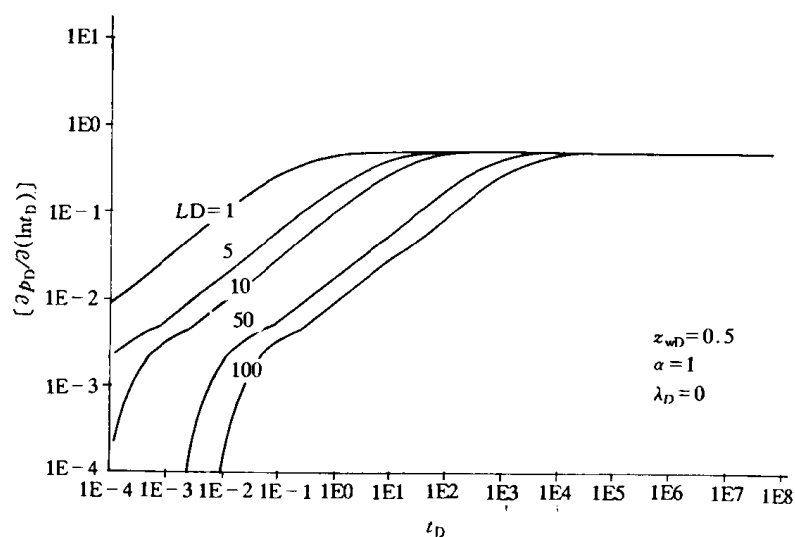


图 8 不同 L_D 条件下的无因次压力导数曲线

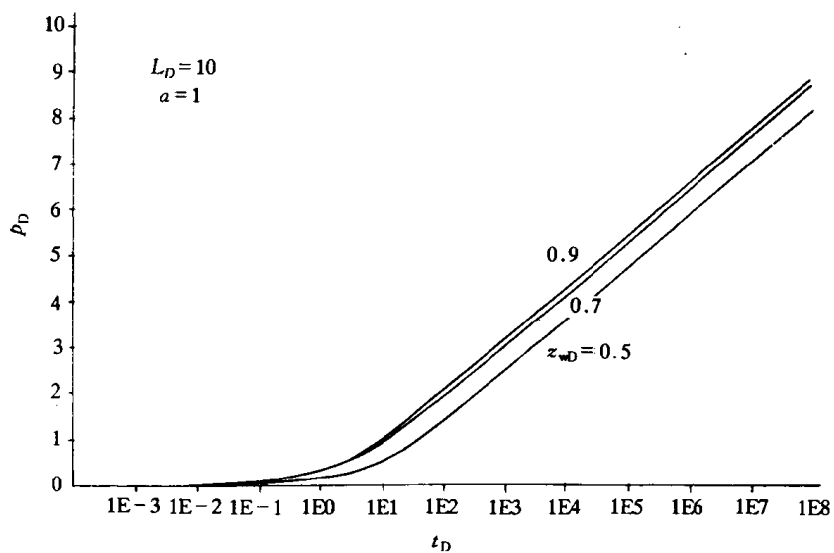


图 9 水平井偏心距对无因次压力的影响

从图 7 和图 8 看出：由于水平井端部的向心流动及绕井轴的径向流动的共同作用，使得早期径向流动阶段完全消失，但是早期线性流动阶段（导数曲线上斜率为 $1/2$ 的直线）和晚期拟径向流动阶段（导数曲线变平的直线）都存在。由于油藏侧向无外边界，因而水平井的晚期线性流动阶段和拟稳态流动阶段均不存在。

从图 9 中看出水平井越靠近上（或下）边界，则边界影响的时间越早，即图中曲线上翘得越早。

2. 分枝水平井的压力动态

图 10 为不同 L_D 和 a_D 条件下具有两条分枝的分枝水平井的压力动态曲线。图 11 为图 10 中相应曲线的压力导数曲线。

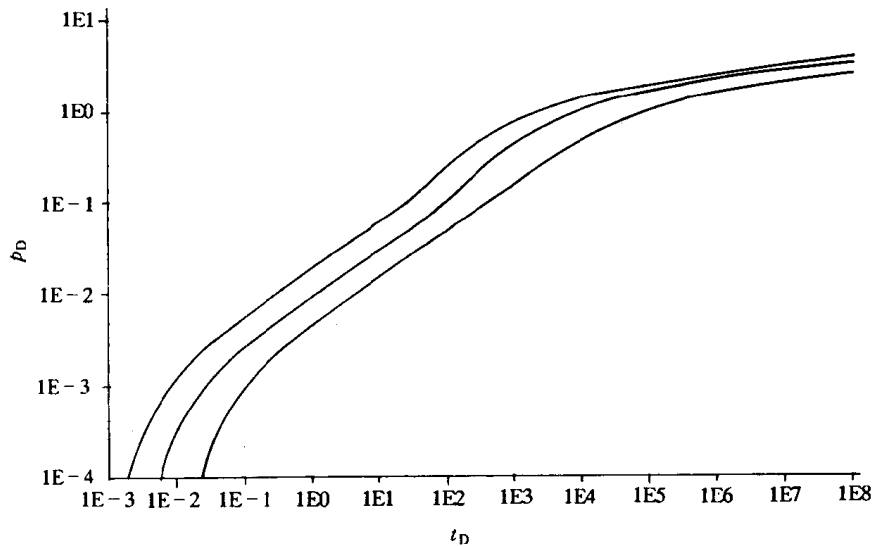


图 10 L_D 对分枝水平井无因次压力的影响

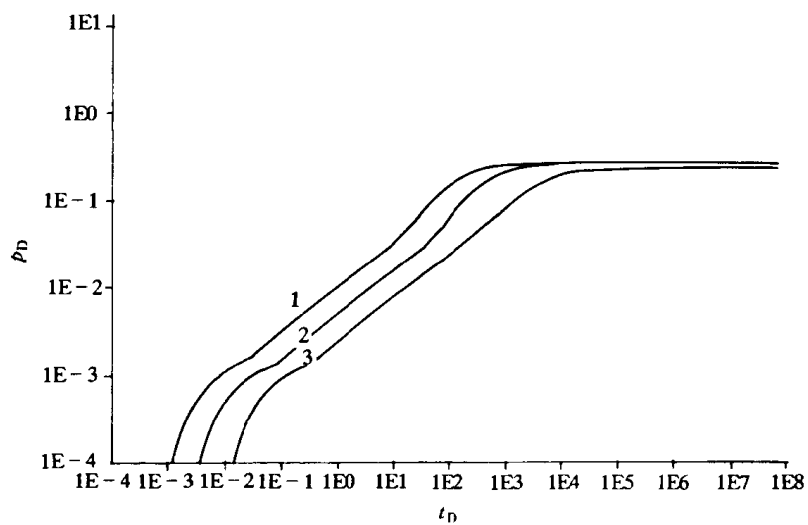


图 11 L_D 对分枝水平井压力导数的影响

图 10 和图 11 中曲线的参数见表 1。

由图 10 和图 11 可看出：在相同的生产条件下，水平段越长，同一时间下其压力降落就越小，反之亦然。由于各水平段的相互作用在早期流动阶段很难分辨，但对于晚期由于渗流区域较大，可近似地看成远处流体向分枝井区域的拟径向流动（导数曲线中变平的部分）。

3. 多井底水平井的压力动态分析

图 12 为多井底水平井在不同 L_D 条件下的无因次压力与无因次时间双对数曲线。 $N=2$ 为具有两条水平井底，其水平段相同，如图 12 所示。图 13 为图 12 相应曲线下的无因次压力导数曲线。

表 1 分枝井参数数据表

曲线	第一分枝段			第二分枝段			水平段			水平段总长 L_D
	L_{D1}	$\bar{\theta}_1$	a_{D1}	L_{D2}	$\bar{\theta}_2$	a_{D2}	L_{D3}	$\bar{\theta}_3$	a_{D3}	
1	10	$\frac{\pi}{4}$	10	10	$-\frac{\pi}{4}$	20	30	0	0	50
2	25	$\frac{\pi}{4}$	20	25	$-\frac{\pi}{4}$	40	50	0	0	100
3	50	$\frac{\pi}{4}$	40	50	$-\frac{\pi}{4}$	80	100	0	0	200

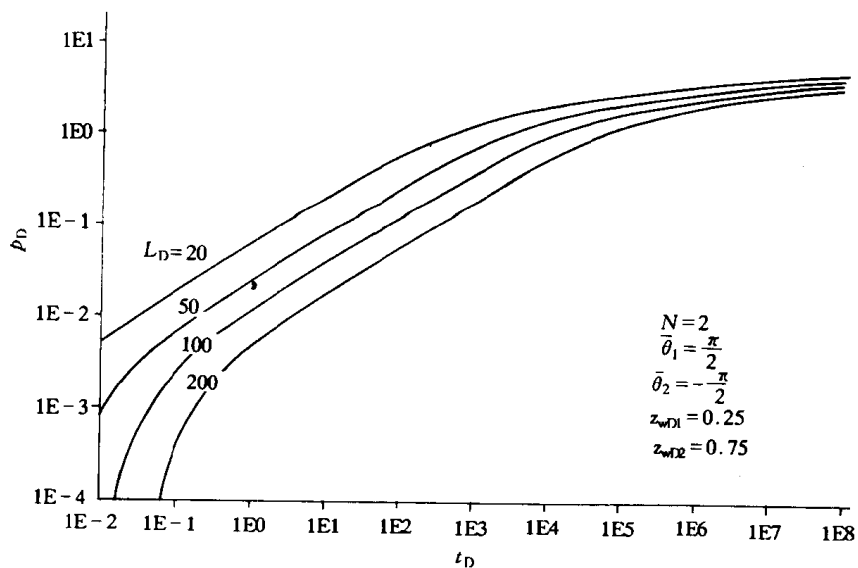
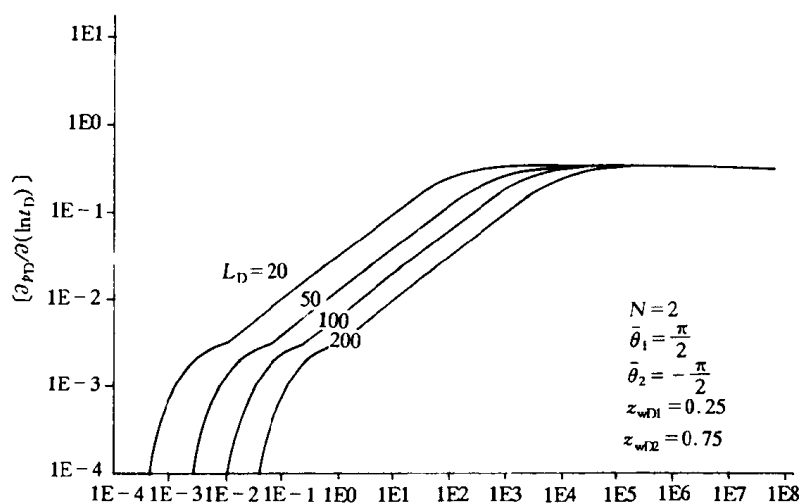
图 12 L_D 对多井底水平井无因次压力的影响

图 13 多井底水平井无因次压力导数曲线

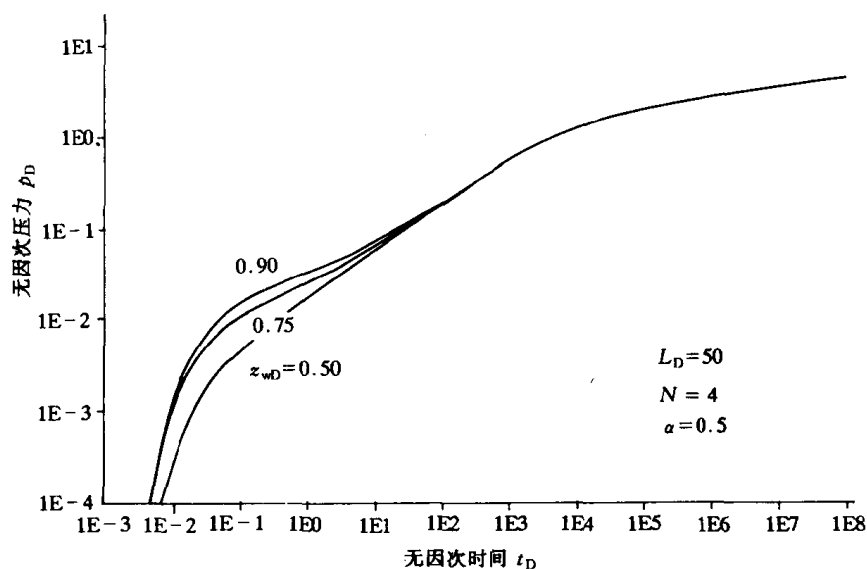


图 14 偏心距对径向水平井无因次压力的影响

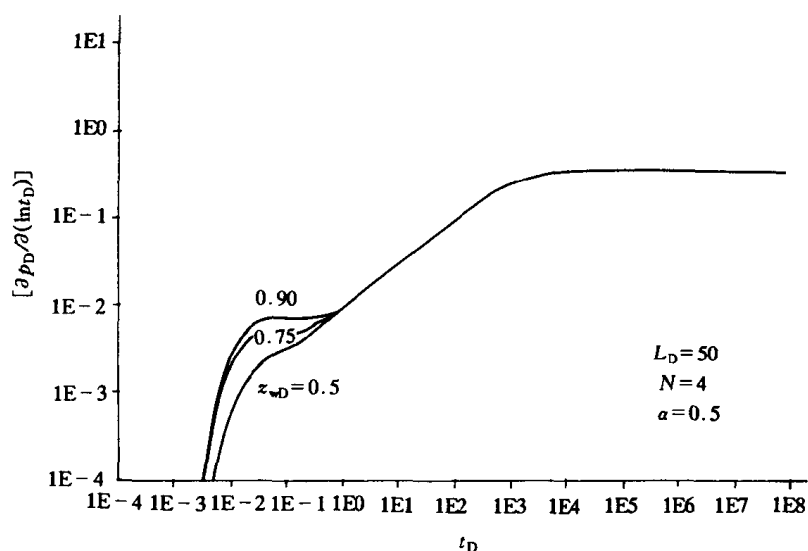


图 15 偏心距对径向水平井无因次压力导数的影响

由图 12 和图 13 看出：由于两条水平段的相互影响，早期径向流动没有出现。而早期线性流动阶段和晚期拟径向流动阶段已出现。 L_D 越长，晚期拟径向流出现的时间越晚。

4. 径向水平井压力动态分析

图 14 为偏心距对径向水平井压力的影响。图 15 为图 14 中相应曲线的导数曲线。

由图 14 和图 15 可看出：偏心距只是在早期影响径向水平井的渗流。

图 16 为径向水平井条数（即夹角）对无因次压力的影响。这里每条水平井段长度为 $L_D=200$ ， $z_{wD}=0.5$ 。图 17 为图 16 中相应曲线的导数曲线。

由图 16 和图 17 看出：随着水平段的增加，整个水平段长度增加，在相同的生产条件下同一时刻无因次压力越小，地层达到晚期拟径向流的时间越长。

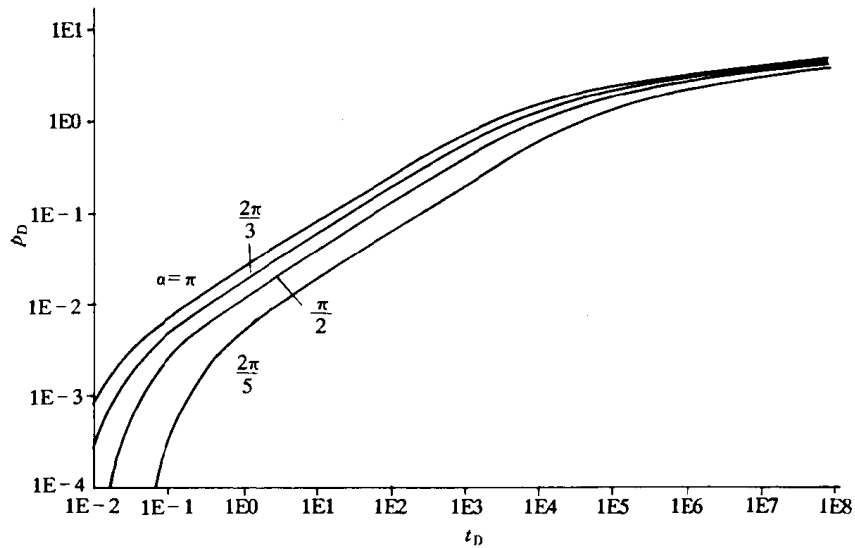


图 16 夹角对径向水平井无因次压力的影响

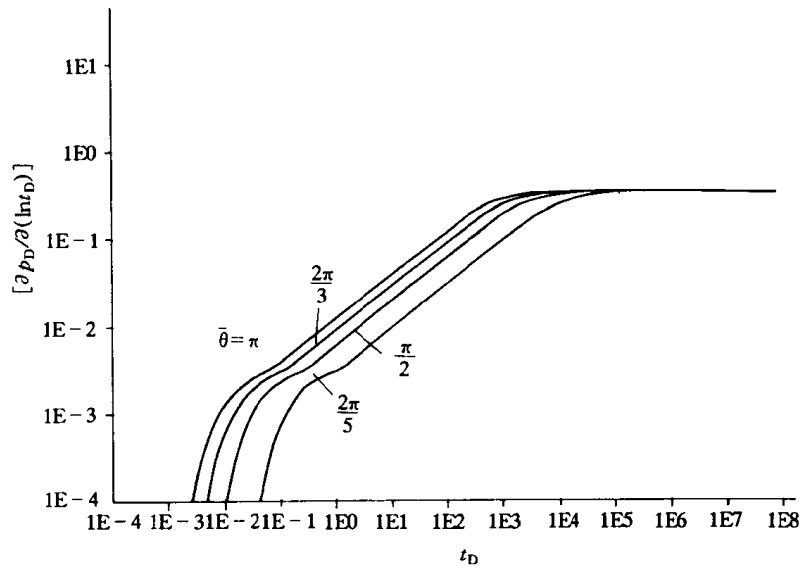


图 17 夹角对径向水平井无因次压力导数的影响

五、结 论

- (1) 本文采集用点源函数、镜象映射及叠加原理推导了无限大板状油藏中任一条线源的压力公式，并由此组合出了分枝水平井、多井底水平井和径向水平井的压力公式；
- (2) 采用泊松公式对压力公式进行化简，交替使用化简前后的公式可大幅度提高级数收敛的速度，从而提高整体计算的速度；
- (3) 由于水平段的影响，早期渗流阶段的流动形态很难分辨，但线性流动阶段和晚期拟