

多井试井的新发展

M. M. Kamal, P. S. Hegeman
Flopetrol Johnston Schlumberger

刘懋宁 译
张朝琛 校

摘 要

多井试井可提供有关油藏性质的信息,如渗透率、孔隙度、井间连通性和油藏非均质性等。文献[1]曾讨论过1981年以前多井试井的技术发展水平。在最近四年多又报告了若干进展^[2-27]。在这些进展中大多数是关于压裂井、双孔隙性系统和垂向渗透率试井等方面的。最近几年也曾发表过多井试井在某些油田上应用的情况。这些都表明,由于我们在设计与分析多井试井方面的能力有所进步,使得多井试井的应用增多了。在这一试井领域内尚有许多事情要做。本文主要讨论新的进展,概述应用目前工艺技术从多井试井中能获得的信息,并指出将来的发展领域。

一、引 言

井间的油藏性质、不同井间的连通程度和有关油藏非均质性等的信息,都包括在选择一个适当的油藏管理方法所必需的数据之内。不稳定压力试井曾经是获得这些数据经常使用的方法之一。把不稳定试井获得的结果与地质资料、岩心资料、测井资料和其他资料结合起来使用,可改善对油藏的全面描述。

在可供油藏工程师使用的许多不稳定压力试井方法中,多井干扰和脉冲试井的应用已日趋普遍。这可能是由于这些方法与示踪剂测试和标准的生产管理相比,操作比较简单,获得资料比较快。另外,在压力测量和记录系统方面以及在计算机化的数据采集和传输系统方面的重大改进,再加上油藏动态新数学模型的发展,正使得多井试井的设计、实施和解释在更多的油藏中是可行的。然而,与油藏描述有关的唯一性问题,特别是对于非均质系统,要求利用所有来源提供的资料,其中包括不稳定压力试井、示踪剂测试和生产动态数据等。

关于1981年中期以前多井试井技术发展水平的综述文章^[1]早已发表。自那以后,水平多井试井和垂向试井已经成为很多理论和现场研究的主题。本文讨论这一领域从1981年到现在的进展。

正如在前篇文章^[1]中所做的,把油藏—油井系统按其性质分为若干类。对每一类讨论多井试井的新进展,给出对试井设计及分析提供有详细资料的文献,并指出需要进一步发展的领域。在本文中所用的油藏—油井系统和试井种类有:均质各向同性油藏;具有垂直裂缝井的均质油藏;具有双孔隙性动态的油藏;非均质油藏及垂向试井。本文结尾部分讨论了油田实例。

二、均质各向同性油藏

从实用的观点来说,一个油藏如从一个部位到另一个部位其性质没有显著变化,就可以认为是均质的。另外,如在油藏任何一点其在所有方向上的渗透率都是相同的,则这个油藏就是“各向同性”油藏。在均质各向同性油藏中,应用不稳定压力试井,可以求得一个渗透率参数群 kh/μ 和一个孔隙性参数群 $\phi c_i h$ 。1960—1970年间研究出了适用于均质地层中干扰和脉冲两种试井的试井设计和分析方法。1981年以来,绝大部分的研究工作都集中在如何扩展基本解以便将井筒影响考虑进去。

1. 干扰试井

Ogbe等人^[2]提出一种新的相关方法,当仅在一口井中存在井筒储存效应时,可以综合考虑井筒储存和表皮因子数值的大小。用 $(C_D e^{2s})^{C_D/r_D^2}$ 作为相关参数,有可能将实际需要的多数典型曲线展现在一张图版上。如图1所示的图版,就可适用于下列各种情况:

- (1) $r_D \geq 100$;
- (2) $C_D e^{2s} \geq 10^4$;
- (3) 表皮因子 ≥ 0 。

采用Bourdet等人^[3]提出的压力导数技术,将有助于区分图1中的典型曲线。最后得到的典型曲线如图2所示。

Tongpenyai等人^[4]和Ogbe等人^[2]都各自导出了将激动井和观察井中的井筒储存和表皮因子都考虑在内的干扰试井的解析解。需要用四组无因次参数群来表述这个解:

$$C_{D1}/r_{D1}^2, C_{D2}/r_{D2}^2, C_{D1}e^{2s_1}, \text{及} C_{D2}e^{2s_2}$$

图3中给出了在这种情况下所用的典型曲线的一个例子。当激动井及观察井两者都存在井筒储存效应时,因为其压力响应在形状上与单井存在井筒储存状态时很不相同^[2],所以不可能确定出一个单值的、等效的储存因子。每逢在这两类井中都存在明显的井筒储存和表皮效应时,压力响应将受到严重衰减,因而,在进行干扰试井时^[2],最好是设法减小激动井,再不就是观察井(或两者)的储存效应。

2. 脉冲测试

Winston^[5]介绍了一种在小产量井中进行脉冲试井时将脉冲井中的井筒储存影响考虑进去的技术。这种方法需要用计算机编制续流量对时间的模拟程序,和考虑与不考虑井筒储存效应时预计的脉冲试井的响应。用这些模拟方法可求得时滞和响应幅度的校正系数。当将这些校正系数用于现场数据时,就可以用标准脉冲试井法,如Kamal和Brigham提出的那些方法^[6],来分析这次试井的结果。

Ogbe和Brigham^[7]研究了在激动井或在观察井中任何一井存在井筒储存和表皮效应时的脉冲试井。除他们导出的干扰试井解以外,他们还用叠加原理导出了一个解析解^[2]。他们发表了脉冲和非脉冲期相等状况下的相关曲线,并开发了一种叠代方法以利用这些相关曲线对脉冲试井进行设计及分析。

当激动井和观察井中的井筒效应都很明显时,要找一个相关参数的努力迄今仍未成功

(对于垂向渗透率试井也同样如此)。在这一领域仍需要研究开发一组实用的典型曲线,以使用于激动及观察两种井都存在井筒效应的一般情况。

三、具有垂直裂缝井的均质油藏

1. 干扰测试

在具有垂直裂缝井的那些油藏中,多井试井的主要用途是确定裂缝方位。Mousli等人^[8]研究了被一条无限传导垂直裂缝所贯穿的某观察井的干扰压力动态。激动井假设为无裂缝或是被一条与观察井处裂缝相平行的均匀流裂缝所贯穿。图4是所考察的这种体系的简图,而图5和6则是描述此解的各种典型曲线的若干例子。这些作者讨论了观察井的裂缝对压力响应有明显影响的各种条件(诸如裂缝长度、井距及方位)。而且,他们还注意到,观察井中的压力响应没有什么特征能说明裂缝的存在;因此,需要事先从其他一些独立的测量中(诸如单井试井)知道确有裂缝存在。Mousli等人^[8]将他们的结果(在观察井处有一裂缝)与Uraiet等人^[9]的结果(在激动井处有一裂缝)进行了对比,进而认为,裂缝的位置对观察井的响应并无多大影响(如果 $r_{DLr} \geq 0.4$ 的话)。那也就是说,压力响应只与距离和角度有关,而与哪口井压裂过无关。

2. 脉冲试井

Abobise和Tiab^[10]采用均匀流裂缝模型,将Ekie等人^[11]的结果扩展到裂缝方位对脉冲试井的影响。Abobise和Tiab提出了一些普通用的相关式,可以将无因次响应幅度和无因次循环周期的商($\Delta p_D / \Delta t_{cD}$)与无因次时滞(t_{LD})关联起来。图7是这些相关式的一个例子。利用这些相关式和文献^[11]中的那些相关式,可以分析一口垂直裂缝井的脉冲试井,既可以确定裂缝的罗盘方位,又可以确定受到试井影响的层带的平均地层渗透率。最少需要两口观察井才能够单值地确定裂缝方位,而裂缝的长度则必须从其他资料来源求得。为了设计压裂井的脉冲试井,推荐使用无因次循环周期与脉冲比组合,从而将得到奇脉冲的无因次时间滞后为0.14,偶脉冲的为0.17^[10]。另外,应注意到,当裂缝面与两井井底连线间的夹角小于60度时, ($\Delta p_D / \Delta t_{cD}$) 相关关系将能提供更准确的裂缝方位值。

四、具有双重孔隙性的天然裂缝及多层油藏

双孔隙性模型是假设存在着两种具有明显差异的孔隙度及渗透率的多孔介质。其中只有一种介质具有充分的渗透性,可以与井连通,而另一种介质的传导性要低得多,它只能向高传导系统供液。最早引入双孔隙性模型,是为了研究天然裂缝(裂隙)油藏。后来,有些作者提出双层模型,两层之间的渗透性差别悬殊,用这种模型作为上述双孔隙性模型的一种替代解法。最近的一篇文章^[12]概述了双孔隙性油藏中的单井试井情况。

1. 干扰试井

Deruyck等^[13]提出一种分析双孔隙性油藏中干扰试井的系统方法。这种解释方法是以典

型曲线为基础。这种典型曲线的实例如图8和9所示。图8表示从低渗透介质向较高渗透介质发生拟稳态液流的情形，而图9表示两种介质之间发生不稳定液流的情况。

这些典型曲线的无因次时间是根据高渗透介质的储存系数 (ϕV_{c_i}) 与渗透率求得的。也就是说

$$t_{Df}/r_D^2 = \frac{0.000264k_f \Delta t}{(\phi V_{c_i})_f \mu r^2} \quad (1)$$

双孔隙性模型用两个参数表示其特性：储存系数比 ω ，它定义为

$$\omega = \frac{(\phi V_{c_i})_f}{(\phi V_{c_i})_f + (\phi V_{c_i})_m} \quad (2)$$

和不同孔隙间的流动参数 λ ，它定义为

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{k_m}{k_f} \quad (3)$$

对于孔隙间不稳定流动（图9）来说，渗流参数群 β 定义为：

对于板状介质

$$\beta = \frac{1}{3} \frac{\lambda}{\omega} \quad (4)$$

对于球形介质

$$\beta = \frac{3}{5} \frac{\lambda}{\omega} \quad (5)$$

根据上述两种典型曲线中之一，进行双对数分析，可以获得高渗透介质的流动传导率 $(k_f h)$ 值，不同孔隙介质间的流动系数 (λ) 值，以及各种介质的储存系数 (ϕV_{c_i}) 值。

曾有另外两个研究组检验了双孔隙性系统中观察井的响应^[11,15]。两者的研究都集中在多层（层状非均质）的几何形态上。Streltsova^[11]专门探讨了观察井在高渗透层段完井和在低渗透层段完井时其压力响应之间的差异。她提供了Prudhoe Bay油田一次注水能力干扰试井所获得的资料，清楚地表明了上述差异。这些现场资料如图10及图11所示。图10表明各观察井在低渗透或供液层段完井时的压力响应，而图11则表明各观察井和激动井在主要生产层段完井时的压力响应。

双孔隙系统中干扰试井的几篇文献^[13-15]提出两个重要的论点：

(1) 如果我们试图对比同一油藏中几口观察井的响应，那么，仅绘制 Δp 对 $\Delta t/r^2$ 的数据相关曲线就不够了。因为观察井的响应是它与激动井距离 r 的单值函数（对于双孔隙性参数 ω 和 λ 为固定值来讲），在中间一段时间这些数据将不能对比。图12说明了这一点^[15]。

(2) 随着两井间距离的增加，表征双孔隙性的压力变化将减弱。所以，如果井间距离很大，那么这种压力响应将可能与该井在均质系统中的响应相同。这一点说明了为什么一些油藏在生产测试（单井）时已知其存在双孔隙性动态，而在干扰试井时却呈现出简单的均质系统的特征。

需要有双孔隙性系统中脉冲试井的相关图版。必须进一步研究井筒储存和表皮因子对试井的影响。

五、非均质（多层）油藏

1. 脉冲试井

Prats^[16]曾用一个单相数值模拟件来研究一口观察井所测得的脉冲试井响应。这口观察井全部打开了相邻的两个分层。激动井也是在这两个分层中完井的。在这两个分层之间的边界上渗流不受阻碍。应当注意到，虽然观察井是关闭的，但这两个分层中的压力响应是不均衡的，因此将导致在观察井中发生液体从这一层流入另一层的情况（窜流）。

Prats曾用这种模型来研究了究竟在什么情况下观察井的压力响应将不受油藏分层性的影响。他认为存在一个无因次非均质性参数 χ 的临界值，这一 χ 临界值可以用井距和各分层的性质确定，低于此临界值时，进行简单的解释就可以较好地估算油藏的平均性质。Prats定义这一非均质性参数 χ 为（见图13）：

$$\chi = \frac{h_1 h_2}{r^2} \frac{k_{2D}}{k_{1N}} \ln \left(\frac{k_{2D} \phi_1}{k_{1N} \phi_2} \right) \quad (6)$$

对于一个均质油藏来说，其 $\chi=0$ ；非均质性参数值随着油藏非均质性的增加而增大。 χ 的临界值范围从0.8到1.3。对于非均质性参数值高于临界值的情况，Prats推荐使用以存在相邻分层为基础所拟定的各种解释方法。他还建议对观察井采用专门的完井措施，把井内各分层互相隔开并监控每一层的压力，认为用这种方法获得各单层的特性具有良好的前景。

多层油藏中的干扰和脉冲试井，是一个需要研究的、而其结果应予奖励的领域。多井试井对油藏非均质性很敏感，迄今所做的研究还很少，离系统分析多层油藏的多井试井还相差很远。为了使得系统分析方法得以成功，要尽可能使用从其他来源如岩心分析和测井获得的有关各分层的资料（如 k/ϕ ）。

六、垂向渗透率试井

垂向试井用于确定垂向渗透率是最近五年内几篇文章^[17-20]的主题。这些文章可以分成两类。第一类论述如何确定通过一个致密层的垂向渗透率^[17-19]。第二类提出如何确定一个均质各向异性分层中的垂直渗透率^[20]（在垂直方向上）。

为了分析一个具有两个渗透层、但其中间被一个低渗透层分开的油藏中的垂向干扰试井数据，Bremer等^[17]提出一种解析模型和解释方法。他们研究的系统如图14所示。他们定义了下列无因次压力：

$$\begin{aligned} 2p_{DV} &= \frac{k_b(p_i - p_o)(h_A + h_o)}{70.6q\mu B} \\ &= -\text{Ei}\left(\frac{-r_D^2}{4t_D}\right) - \int_{\frac{r_D^2}{4t_D}}^{\infty} \frac{e^{-\beta/\tau} e^{-\tau}}{\tau} d\tau \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\beta = \frac{r^2 k_v}{4 \Delta h k_h} \left(\frac{1}{h_A} + \frac{1}{h_o} \right) \quad (8)$$

这一无因次压力 p_{DV} 提供了典型曲线的基础, 这些曲线如图15和16所示。若 β 值比较大, 即 $\beta \geq 10^{-4}$, 典型曲线如图15所示, 它是 β 的函数。对于 β 值小于 10^{-4} 的情况, 这些典型曲线都重叠成如图16所示的单一曲线。

图15和16中所示的典型曲线可用来把油田数据拟合在适宜的典型曲线上, 从而算出水平和垂直渗透率如下:

$$k_h = \frac{70.6 q \mu B}{(h_A + h_o)} \left[\frac{2 p_{DV}}{\Delta p} \right]_{\text{拟合}} \quad (9)$$

对于 $\beta \geq 10^{-4}$ 时

$$k_v = \frac{4 \beta k_h \Delta h h_A h_o}{r_w^2 (h_A + h_o)} \quad (10)$$

对于 $\beta < 10^{-4}$ 时

$$k_v = \frac{4 \phi c_t \mu \Delta h h_A h_o}{0.000264 (h_A + h_o)} \left[\frac{\beta t_D / r_D^2}{\Delta t} \right]_{\text{拟合}} \quad (11)$$

曾用致密层典型曲线, 数值化R-Z油藏模拟器及Burns模型^[21]分别对两口井的试井结果进行了分析。这三种方法之间的区别是在早期压力响应的预测方面, 致密层模型预测的是更迅速的早期响应, 这与忽略致密层储存性的假设有关。Burns的模型所预测的是最缓慢的早期响应。

Lee等人^[18]把井筒储存和表皮因子引入致密层模型, 并允许两个渗透层的性质存在差异。他们用自己的模型研究垂向脉冲试井, 而且与文献进行比较, 证明井筒储存及表皮因子的影响是减弱了响应幅度, 并增加了脉冲响应的时滞(时间滞后)。

Ehlig-Economides和Ayoub^[19]的研究与Lee等^[18]无关, 是独立进行的。他们也对致密层模型提出了一个通解。该模型允许两个渗透层的性质不同, 并引入了井筒储存与表皮因子的影响。他们以均质油藏的通用典型曲线(如本文中图17所示)和压力导数典型曲线为依据, 提出了一个分析用的系统方法。

在1984年的文献^[20]中论述了井筒储存和表皮因子对均质及各向异性(在垂直方向)油藏中垂向渗透率试井的影响。研制了一套典型曲线, 可用来设计和分析各种垂向渗透率试井。这些典型曲线的实例如图18和19所示。根据能与适宜的典型曲线拟合的油田数据, 可用如下公式算出水平和垂向渗透率:

$$k_h = \frac{70.6 q \mu B}{h} \left[\frac{2 p_D}{\Delta p} \right]_{\text{拟合}} \quad (12)$$

及

$$k_v = 948 \phi c_t \mu h^2 \left[\frac{4 t_D (k_v / k_h) (r_w / h)^2}{\Delta t} \right]_{\text{拟合}} \quad (13)$$

在文献[20]中引入了一个叫做井筒参数(WBP)的新的相关函数。这一井筒参数综合了井筒储存和表皮因子的影响, 并减少了用于设计和分析垂向渗透率试井所需的典型曲线的数目。这个井筒参数定义为:

$$WBP = C_D (1 + s) \quad (14)$$

该文还指出,在激动射孔段的井筒储存与表皮因子,和测压射孔段的井筒储存与表皮因子,对压力响应具有相同的影响。提出了一个用于求所有井筒效应都消失的时刻的相关式。对在这个时间以后采集的数据进行分析时,可以不必考虑井筒储存和表皮因子。当井筒效应只在一个射孔段呈现时,这些效应消失的时间可由下式给出:

$$[4t_D(k_v/k_h)(r_w/h)^2]_{s,s_1} \approx 70 \quad (15)$$

对于 $WBP_o < 1000$, $WBP_A = 0$

$$[4t_D(k_v/k_h)(r_w/h)^2]_{s,s_1} \approx 70 - 10 \log\left(\frac{WBP_o}{1000}\right)$$

对于 $WBP_o \geq 1000$, $WBP_A = 0$ (16)

当在激动和测压两个射孔段都存在井筒效应时,可以从图20求得半对数直线的起始时间(即井筒效应结束的时间)。

垂向渗透率试井的最大障碍是由于固井作业质量差或进行压裂,在两个射孔段之间的套管外面形成窜槽。即使是在套管外面存在一个很小的微隙,也会在计算垂向渗透率中引起巨大的误差。

根据垂向试井中积累的经验,已经得出可以克服套管外连通问题的方法。在这一方法中,套管外的连通用测井方法检测(如水泥胶结声波测井),选出最可能不存在这类连通的层段,而后在这一层段的顶部和底部射孔,进行垂向渗透率试井。

在垂向渗透率试井中,将来发展的领域是清楚的,就是提出适用于套管外存在快速窜槽时的解,窜槽的检测或许可用测井技术来解决。给出这些窜槽的特征,我们将有可能从不稳定试井推算出地层的垂向渗透率。

七、现场应用

在压力测量器具方面及在计算机控制采集、储存及分析数据方面的进步,使多井试井在更多的油藏中实施是可行的。已经有很多报告,既包括现场资料,又包括对它们的分析。为了用实例说明曾用过多井试井的种种油藏类型和测试目的,在下面各段扼要介绍近几年在文献中报道过的某些现场试井实例。

Huinong^[22]介绍了Kenli碳酸盐岩油田地质特性的综合研究成果,其中包括28个干扰试井和脉冲试井结果。根据这些资料分析,可以肯定该油田是一个裂缝沿着主断层发育的各向异性的非均质系统。建议在数值模拟中使用一种概略的渗透率区域分布图。

Hutfilz等^[23]描述了沙特阿拉伯Ghawar油田Arab-D层内某一灰岩和白云岩交互层中进行的多井脉冲试井,求得了有关渗透率各向异性的资料。作者描述了标准脉冲试井法在高渗透率、大井距情况下的适用性。在试井中使用了:(1)灵敏的、有温度补偿的石英压力计;(2)长的脉冲间隔;(3)用一口中心井作脉冲井,同时观测周围几口邻井。还讨论了由于脉冲间隔长,对压力数据需要作特殊处理,以“滤掉”油藏干扰的问题。这些作者认为,脉冲试井结果与测井资料及单井试井结果是一致的。

Rathbone等^[24]介绍了使用脉冲试井作为北海最大的油田——Statfjord油田的油藏评价工具的实例。脉冲试井为确定油藏模型的层间连通性和预测见气时间提供了有用的资料。试井时曾检测出短暂的周期性的压力响应。这些资料的一个例子如图21所示。作者认

为, 这些周期性的响应是由于太阳和月球吸引力作用在油藏液体上的结果。因为这些力同样地是造成潮汐的力, 所以作者可以应用实际潮汐周期去校正井下所测出的压力。Statfjord油田的资料表明, 由于地球潮汐所引起的压力变化, 可以用来表征油藏的特性。

Chen等⁽²⁵⁾描述了新墨西哥州Maljamar油田San Andres第九号块状地层在CO₂驱先导性试验以前所进行的一次搞清该地层特征的干扰试井。在一个五英亩面积上反五点井网中所进行的干扰试井的结果表明, 该油藏是各向异性的, 两个主要方向上的kh值分别约为3,000和30毫达西-英尺, 并且最大渗透率方向为北西77°。作者指出, 在一个各向异性油藏中, 如果五点井网形成一个理想的五点系统, 则可能有两个似乎是正确的解。然而, 在一个实际五点井网中, 由于井底位置的偏差, 计算机回归分析所能获得的是一个单值的各向异性解。

Pollock及Bennett⁽²⁶⁾描述了在怀俄明州东Anschutz Ranch油田是如何设计和进行大规模的干扰试井(包括8口井)的。他们也提出了这项试井的初步分析结果。他们的结论是, 在某几对井中存在着连通现象, 但并没有表明在此油藏中有广泛延伸裂缝的迹象(因为他们考虑到油藏中存在一个注入系统, 所以这是一个主要的结论), 并且认为, 这一油藏不能按均质各向同性系统来处置。

Gillund和Kama⁽²¹⁾发表了加拿大阿尔伯塔省Bigoray Nisku B油藏的一次垂向渗透率试井所获得的油田资料, 这次试井是为了在该油田设计及实施一项垂向混相驱油方案。试井是在一个最大厚度为312英尺的峰状礁质油藏中进行的。测试射孔段之间的距离为56英尺。地层水平渗透率根据一次压力降落试井估计为11.9毫达西。把测压射孔段处测出的压力与一个计算机程序相拟合(利用在此次试井中不止一次地改变流量所测得的压力), 计算出垂向渗透率。这一程序是根据点源渗流模型的一个分析解, 并应用迭加规律模拟产量变化而编制的。拟合的结果如图22所示。

Bremer等在文献[17]中给出两个现场实例, 说明在垂向干扰试井中如何应用致密层模型。而后, Ehlig-Economides和Ayoub⁽¹⁹⁾用了其中一个实例, 来说明井筒储存和表皮因子对解的影响。本文中只讨论一个通例。这口井的完井和孔隙度剖面如图23所示。上部层段为一个66英尺厚的高渗透性灰岩, 下部层段为一厚55英尺的灰岩, 两层之间被一个厚26英尺的低渗透性白云岩所隔开。试井时测出的压力和流量如图24所示。此次试井分析的结果示于图25。致密层模型求得 $k_h = 1,314$ 毫达西, $k_v = 5.8$ 毫达西, $\beta = 1.5 \times 10^{-7}$ 。R-Z模拟器给出 $k_h = 1,250$ 毫达西, $k_v = 8$ 毫达西。Burn模型求得 $k_h = 1,230$ 毫达西, $k_v = 9$ 毫达西。考虑井筒储存效应的致密层模型求得 $k_h = 1,314$ 毫达西, $k_v = 5.8$ 毫达西, $\beta = 1.5 \times 10^{-7}$, $s = 0$ 及 $C_D = 10^5$ 。

八、结 论

(1) 本文讨论了从1981年以来多井试井的新进展。在现场应用水平和垂向试井以弄清油藏特性, 已经成为一种推动力, 促使多井试井技术和新的油井-油藏动态数学模型不断向前发展。正是由于这些进展, 现在已经有了考虑若干因素(例如井筒效应等)的系统设计和分析方法可以使用。

(2) 对均质各向同性的油藏已经发展了一套用于干扰和脉冲试井的通用典型曲线, 它适用于在测试井中有一口井存在井筒储存及表皮效应的情况。但对两口井都存在井筒效应的

情况至今尚没有找到一个相关参数，所以，不得不把其中一口井的井筒效应尽量减到最小，或者只好对每次试井都开发一套专用的典型曲线。

(3) 对具有垂向裂缝井的均质油藏，当激动井和观察井都是裂缝井时，提出了几种适用于某些情况的解。

(4) 对双孔隙性动态的油藏已经开发了干扰试井的典型曲线，这些曲线都没有考虑井筒效应。

(5) 在垂向渗透率试井中，已经发展了用于均质和各向异性（在垂直方向）地层的典型曲线。这些典型曲线考虑了在激动射孔段和测压射孔段的井筒储存和表皮效应。

(6) 在考虑到两个射孔段的井筒效应的情况下，发展了确定穿越一个致密层的有效垂向渗透率的各种解法。

符 号 说 明

B—地层体积系数，地下桶/标准桶（地下米³/地面米³）；

c_t —总压缩率，1/磅/英寸²（千帕⁻¹）；

C—井筒储存常数，桶/磅/英寸²（米³/千帕）；

$$C_D \text{—无因次储存系数} = \frac{5.615C}{2\pi\phi h c_t r_w^2};$$

$Ei(-x)$ —幂积分函数；

F^1 —脉冲比， $\Delta t_p/\Delta t_c$ ；

h—地层厚度，英尺（米）；

Δh —致密层厚度，英尺（米）；

k—渗透率，毫达西；

L_f —裂缝长度，英尺（米）；

p—压力，磅/英寸²（千帕）；

$$p_D \text{—无因次压力变化} = \frac{kh(p_i - p)}{141.2qB\mu};$$

p_i —试井开始时的压力，磅/英寸²（千帕）；

$$\Delta p_D \text{—无因次压力响应幅度} = \frac{kh\Delta p}{141.2qB\mu};$$

q—流量，标准桶/天（地面米³/天）；

r—半径或径向距离，英尺（米）；

r_D —无因次半径 = r/r_w ；

r_{D,L_f} —无因次半径 = r/L_f ；

r_w —井半径，英尺（米）；

s—表皮因子；

t—时间，小时；

Δt_c —周期，小时；

$$\Delta t_{cD} \text{—无因次周期} = \frac{0.000264k\Delta t_c}{\phi c_t \mu r^2};$$

$$t_D \text{—无因次时间} = \frac{0.000264kt}{\phi C_t \mu r_w^2};$$

$$t_{D,L,f} \text{—无因次时间} = \frac{0.000264kt}{\phi C_t \mu L_f^2};$$

t_L —时滞, 小时;

$$t_{L,D} \text{—无因次时滞} = \frac{t_L}{\Delta t_c};$$

Δt_p —脉冲周期, 小时;

V —一种孔隙系统的体积对整个系统体积的比;

WBP—井筒参数;

ΔZ —上部地层边界到射孔段的垂向距离, 英尺(米);

$$\Delta Z_D \text{—到射孔段的无因次距离} = \frac{\Delta Z}{h};$$

α —隙间形状因子, 英尺⁻²(米⁻²);

β —不稳定隙间渗流参数群(双孔隙性油藏);

β —垂向连通因子(垂向试井);

$$\eta \text{—水力扩散系数} = \frac{0.000264k_h}{\phi C_t \mu};$$

θ —裂缝面的罗盘方位, 度;

λ —隙间流动参数;

μ —粘度, 厘泊(帕·秒);

ϕ —孔隙度, 分数;

χ —非均质性参数;

ω —储存比。

角 码

1—观察井(均质系统);

2—激动井(均质系统);

1—差油层(双层油藏);

2—好油层(双层油藏);

A—激动射孔段或激动带(垂向试井);

o—观测射孔段或观测带(垂向试井);

f—裂缝介质(双孔隙性油藏);

m—基岩介质(双孔隙性油藏);

h—水平的;

v—垂向的;

MATCH—典型曲线拟合点;

ssl—半对数直线始点。

参 考 文 献

1. Kamal, M. M.: "Interference and Pulse Testing-A Review," *J. Pet. Tech.* (December 1983), 2257-2270; Trans., AIME, 275.
2. Ogbé, D. O. and Brigham, W. E.: "A Model for Interference Testing with Wellbore Storage and Skin Effects at Both Wells," paper SPE 13253 presented at the 59th Annual Fall Meeting, Houston, Texas, September 1984.
3. Bourdet, D., Ayoub, J. A., and Pirard, Y. M.: "Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation," paper SPE 12777 presented at the 1984 California Regional Meeting, Long Beach, California, April 1984.
4. Tongpenyai, J. and Raghavan, R.: "The Effect of Wellbore Storage and Skin on Interference Test Data," *J. Pet. Tech.* (Jan. 1981), 151-160; Trans., AIME, 271.
5. Winston, H.: "A Method to Account for Afterflow at the Pulsing Well During Pulse Tests," *Soc. Pet. Eng. J.* (June 1983), 519-520; Trans., AIME, 275.
6. Kamal, M. M. and Brigham, W. E.: "Design and Analysis of Pulse Tests with Unequal Pulse and Shut-in Periods," *J. Pet. Tech.* (Feb. 1976), 205-212; Trans., AIME, 261.
7. Ogbé, D. O., and Brigham, W. E.: "Pulse Testing with Wellbore Storage and Skin Effects," paper SPE 12780 presented at the 1984 California Regional Meeting, Long Beach, California, April 1984.
8. Mousli, N. A., Raghavan, R., Cinco-Ley, H., and Samaniego-V., F.: "The Influence of Vertical Fractures Intercepting Active and Observation Wells on Interference Tests," *Soc. Pet. Eng. J.* (Dec. 1982), 933-944; Trans., AIME, 273.
9. Uraiet, A., Raghavan, R., and Thomas, G. W.: "Determination of the Orientation of a Vertical Fracture by Interference Tests," *J. Pet. Tech.* (Jan. 1977), 73-80; Trans., AIME, 263.
10. Abobise, E. O., and Tiab, D.: "Determining Fracture Orientation and Formation Permeability from Pulse Testing," paper SPE 11027 presented at the 57th Annual Fall Meeting, New Orleans, Louisiana, September 1982.
11. Ekie, S., Hadinoto, N., and Raghavan, R.: "Pulse-Testing of Vertically Fractured Wells," paper SPE 6751 presented at the 52nd Annual Fall Meeting, Denver, Colorado, October 1977.
12. Gringarten, A. C.: "Interpretation of Tests in Fissured and Multilayer Reservoirs with Double Porosity Behavior: Theory and Practice," *J. Pet. Tech.* (April 1984), 549-564; Trans., AIME, 277.
13. Deruyck, B. G., Bourdet, D. P., DaPrat, G., and Ramey, H. J. Jr.: "Interpretation of Interference Tests in Reservoirs with Double Porosity Behavior - Theory and Field Examples," paper SPE 11025 presented at the 57th Annual Fall Meeting, New Orleans, Louisiana, September 1982.
14. Streltsova, T. D.: "Buildup Analysis for Interference Tests in Stratified Formations," *J. Pet. Tech.* (Feb. 1984), 301-310; Trans., AIME, 277.
15. Chen, C. C., Yeh, N., Raghavan, R., and Reynolds, A. C.: "Pressure Response at Observation Wells in Fractured Reservoirs," *Soc. Pet. Eng. J.* (Dec. 1984), 628-638; Trans., AIME, 277.
16. Prats, M.: "Interpretation of Pulse Tests in Reservoirs with Crossflow Between Contiguous Layers," paper SPE 11963 presented at the 58th Annual Fall Meeting, San Francisco, California, October 1983.
17. Bremer, R. E., Winston, H., and Vela, S.: "Analytical Model for Vertical Interference Tests Across Low-Permeability Zones," paper SPE 11965 presented at the 58th Annual Fall Meeting, San Francisco, California, October 1983.
18. Lee, S. T., Chien, M. C. H., and Culham, W. E.: "Vertical Single-Well Pulse Testing of a Three-Layer Stratified Reservoir," paper SPE 13249 presented at the 59th Annual Fall Meeting, Houston, Texas, September 1984.
19. Ehlig-Economides, C. A. and Ayoub, J. A.: "Vertical Interference Testing Across a Low-Permeability Zone," paper SPE 13251 presented at the 59th Annual Fall Meeting, Houston, Texas, September 1984.
20. Kamal, M. M.: "The Effects of Wellbore Storage and Skin on Vertical Permeability Testing," paper SPE 13250 presented at the 59th Annual Fall Meeting, Houston, Texas, September 1984.
21. Burns, W. A. Jr.: "New Single-Well Test for Determining Vertical Permeability," *J. Pet. Tech.* (June 1969), 743-752; Trans., AIME, 246.
22. Huinong, Z.: "Interference Testing and Pulse Testing in the Kenli Carbonate Oil Pool - A Case History," *J. Pet. Tech.* (June 1984), 1009-1017; Trans. AIME, 277.
23. Hutfilz, J. M., Cockerham, P. W., and McIntosh, J. R.: "Pulse Testing for Reservoir Description in a High-Permeability Environment," *J. Pet. Tech.* (Sept. 1982), 2179-2189; Trans., AIME, 273.
24. Rathbone, M. J., Unneberg, A., and Cull, G. W. L.: "Pulse Testing in the Statfjord Field," paper SPE 10267 presented at the 56th Annual Fall Meeting, San Antonio, Texas, October 1981.
25. Chen, H. G., and Lescarboua, J. A.: "Interference Analysis of an Anisotropic Reservoir Using Five-Spot Data," paper SPE 11967 presented at the 58th Annual Fall Meeting, San Francisco, California, October 1983.
26. Pollock, C. B. and Bennett, C. O.: "An Eight-Well Interference Test in the Anschutz Ranch East Field," paper SPE 11968 presented at the 58th Annual Fall Meeting, San Francisco, California, October 1983.
27. Gillund, G. N. and Kamal, M. M.: "Incorporation of Vertical Permeability Test Results in Vertical Miscible Flood Design and Operation," *J. Can. Pet. Tech.* (March-April 1984), 54-59.

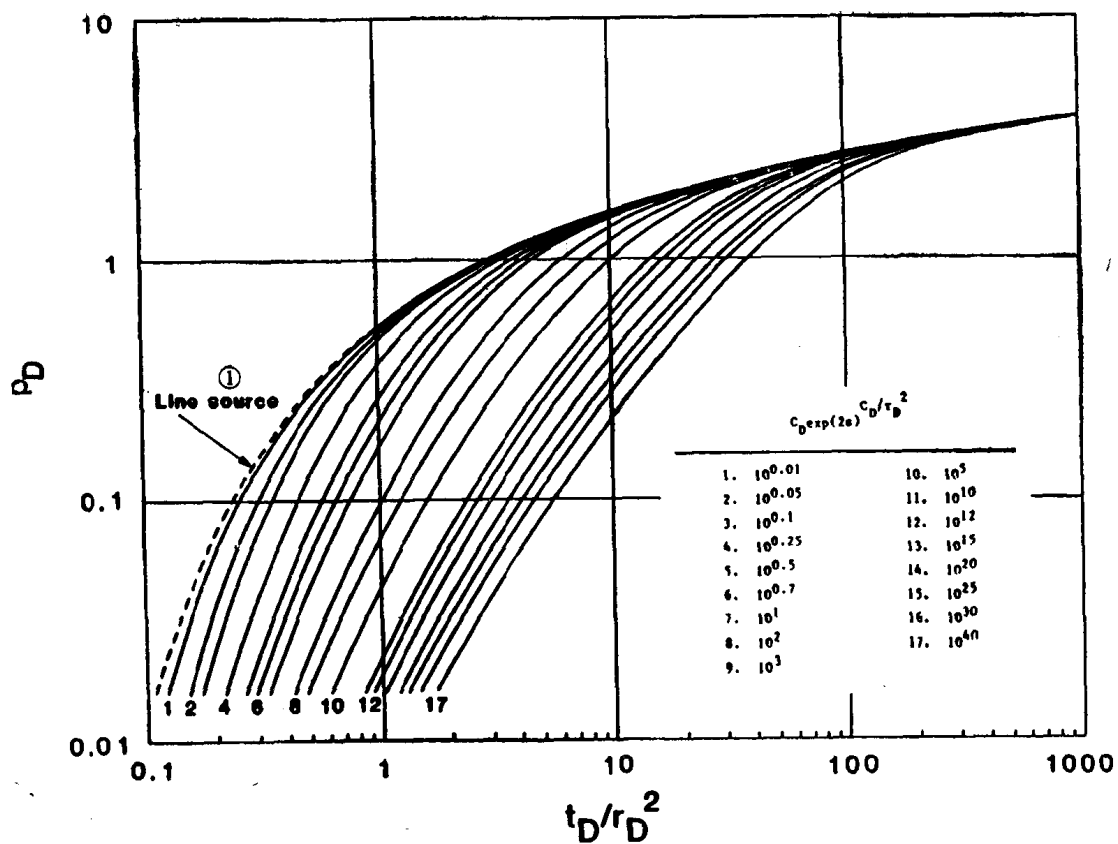


图 1 考虑了一口井中井筒储存和表皮因子的干扰试井压力-导数典型曲线

①线源

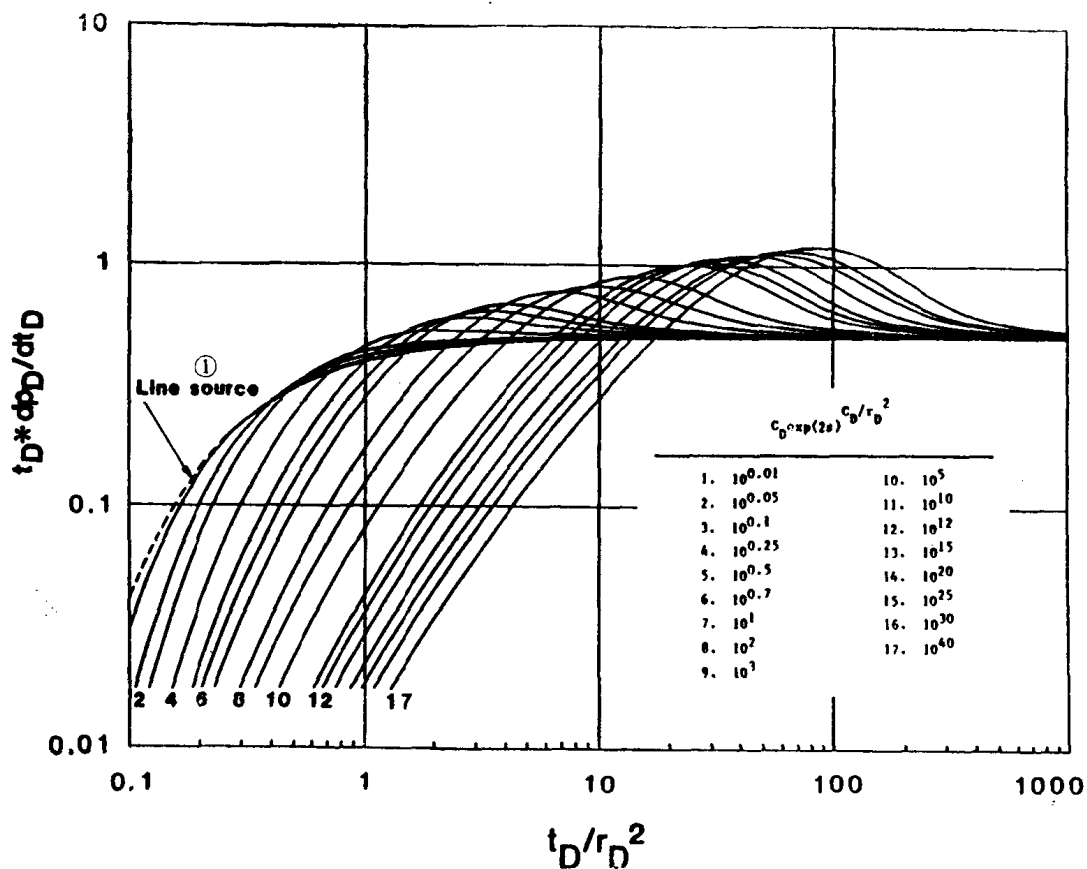


图 2 考虑了激动井和观察井中井筒储存和表皮因子的干扰试井典型曲线

①线源

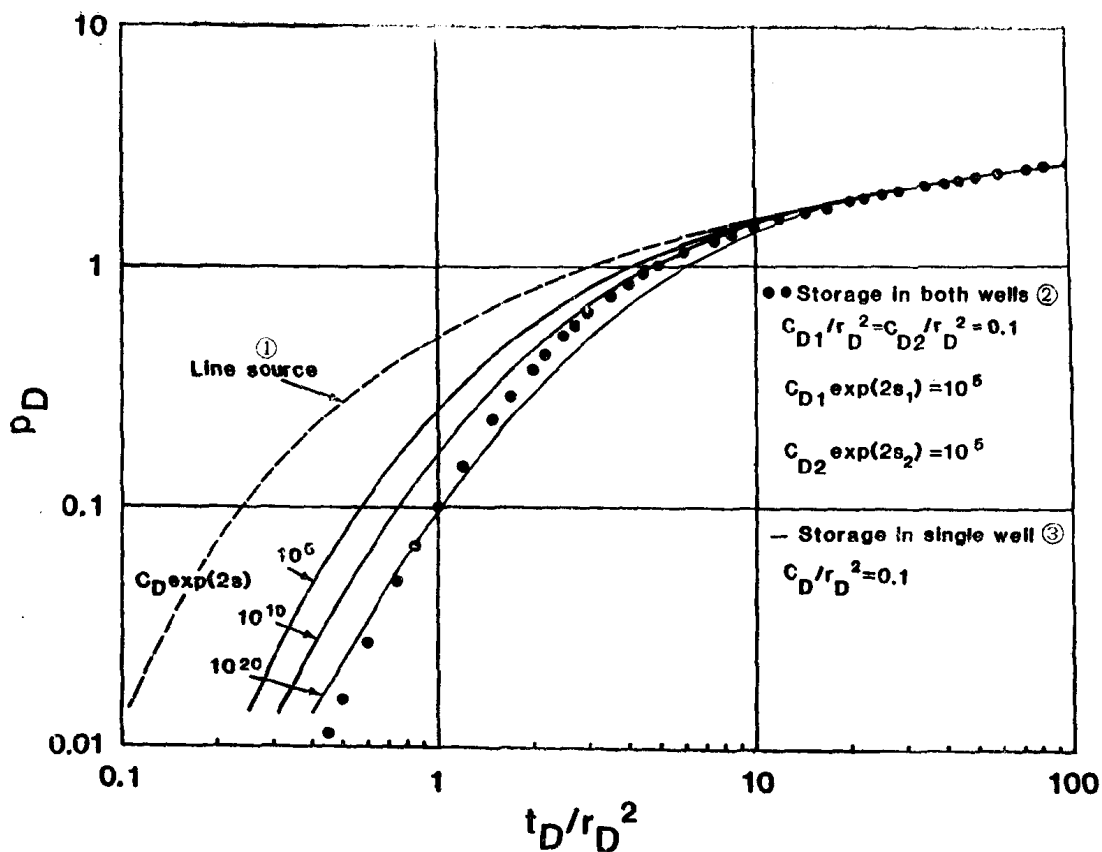


图 3 考虑了一口井中井筒储存和表皮因子的干扰试井典型曲线
①线源；②在两口井中存在井筒储存；③在一口井中存在井筒储存

② A = ACTIVE WELL
③ O = OBSERVATION WELL

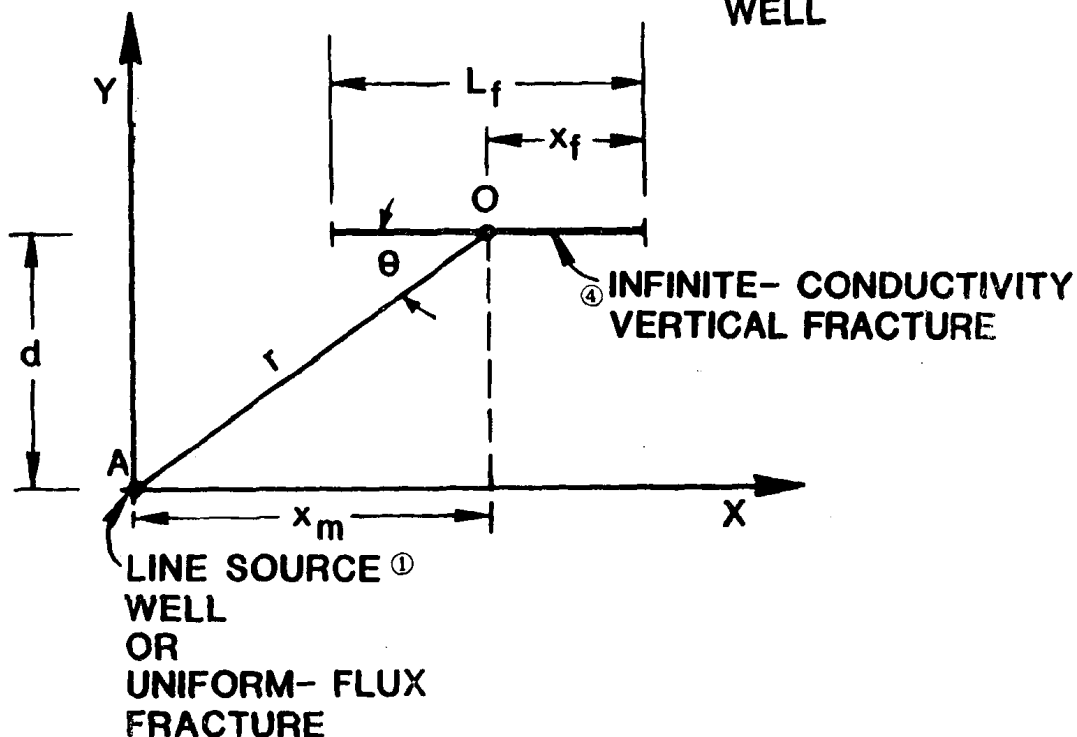


图 4 具有垂直裂缝井的油藏系统的综合图版

①线源井或均匀流裂缝；②A为激动井；③O为观察井；④无限传导率垂直裂缝

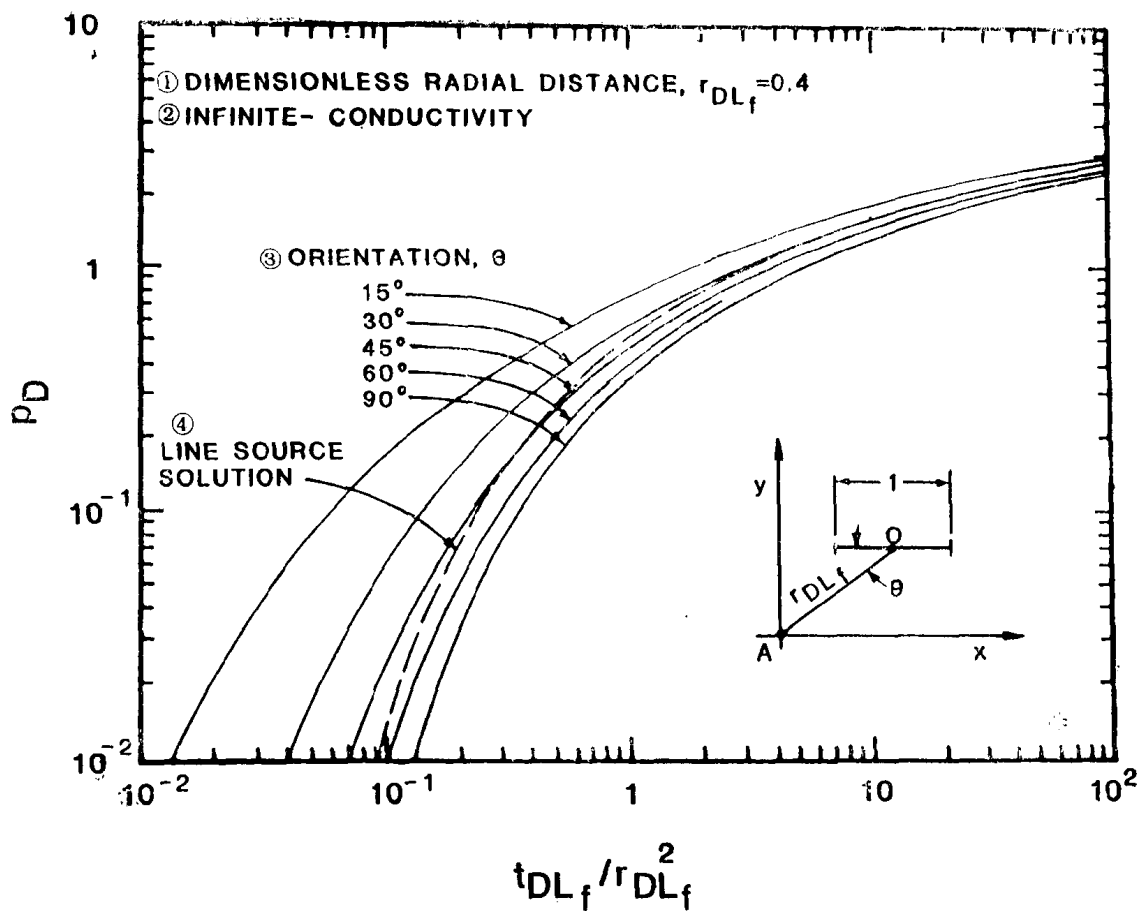


图 5 一口垂直裂缝观察井的干扰试井典型曲线
 ①无因次径向距离；②无限传导率；③方位；④线源解

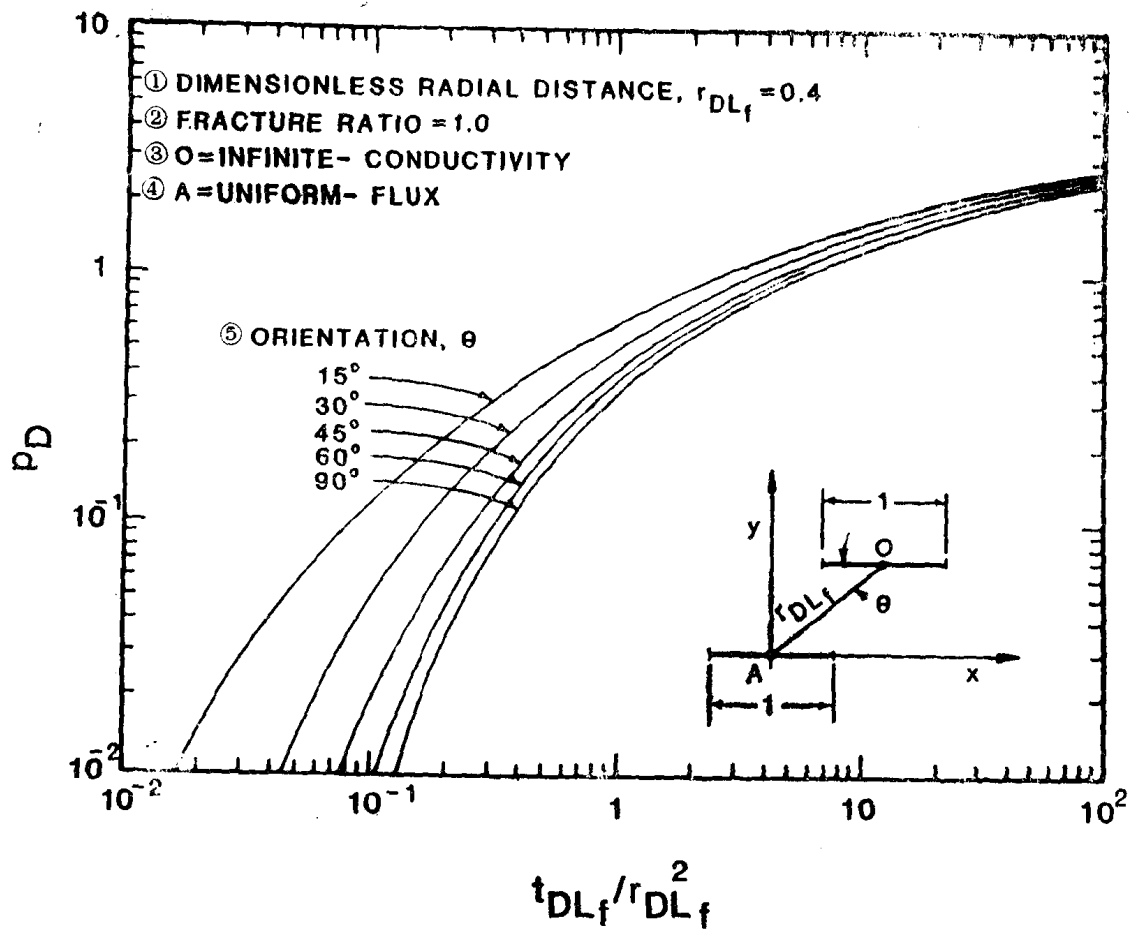


图 6 两口井都是垂直裂缝井的干扰试井典型曲线

①无因次径向距离；②裂缝比；③O为无限传导率；④A为均匀流；⑤方位

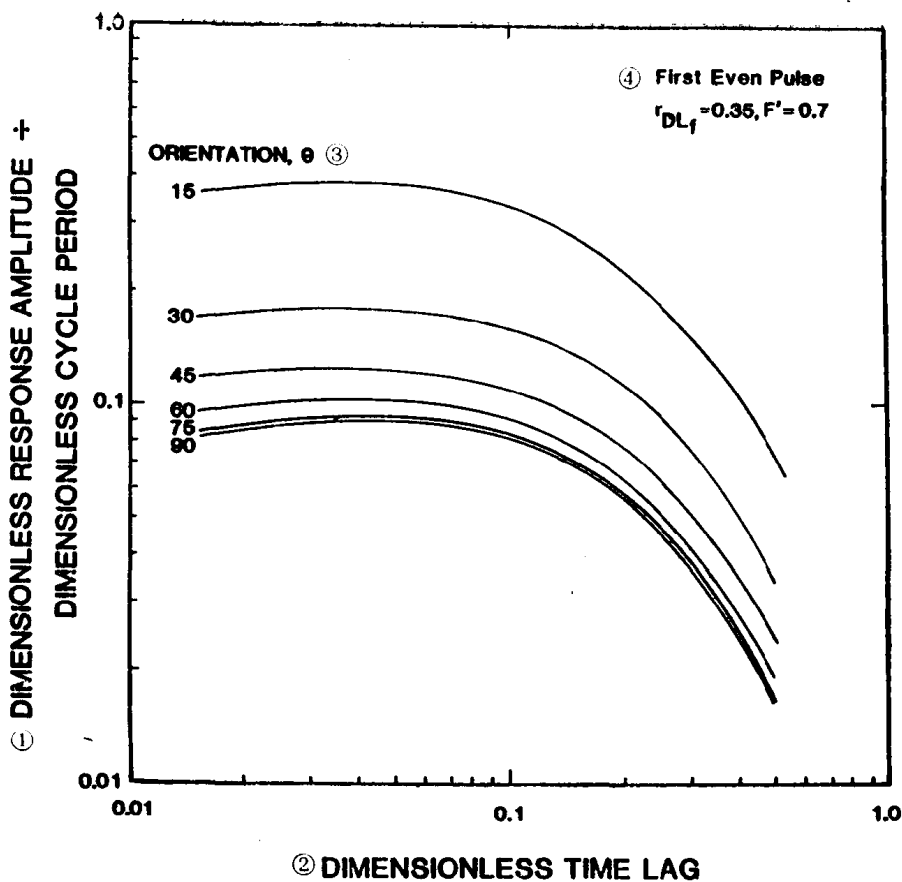


图 7 裂缝方位对脉冲试井响应幅度和周期的影响
①无因次响应幅度+无因次周期；②无因次时滞；③方位；④第一个偶脉冲

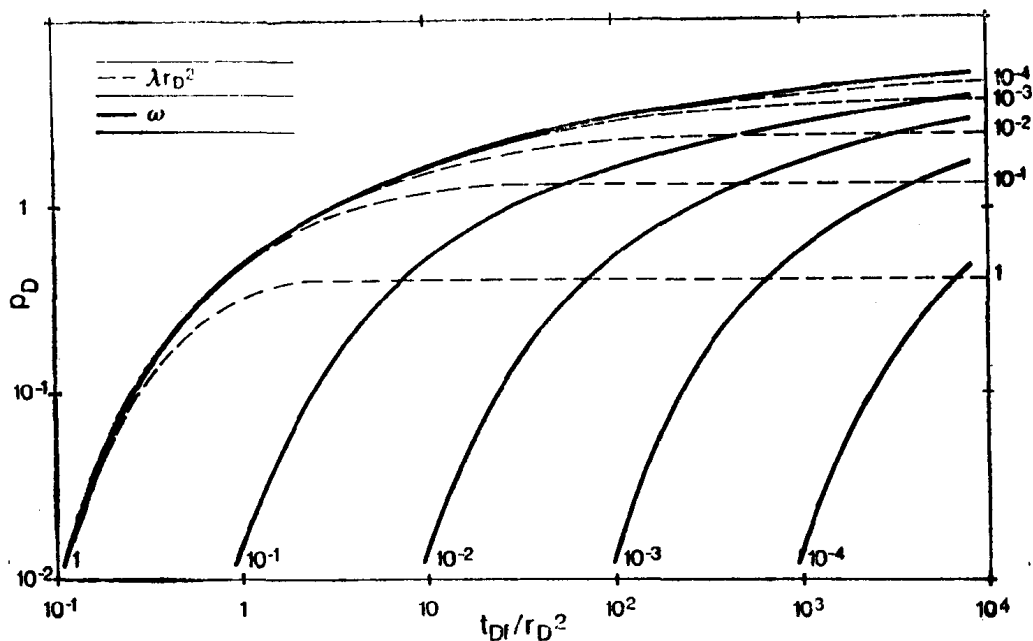


图 8 双孔隙性动态油藏的干扰试井典型曲线 (不同孔隙间的拟稳态流动)

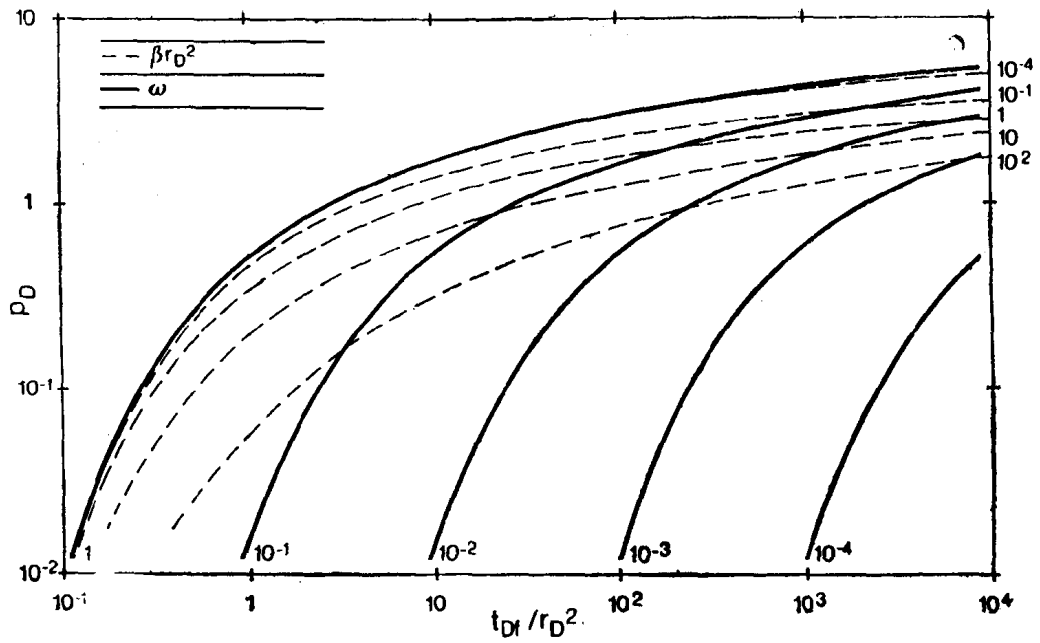


图 9 双孔隙性动态油藏的干扰试井典型曲线 (不同孔隙间的不稳定流动)

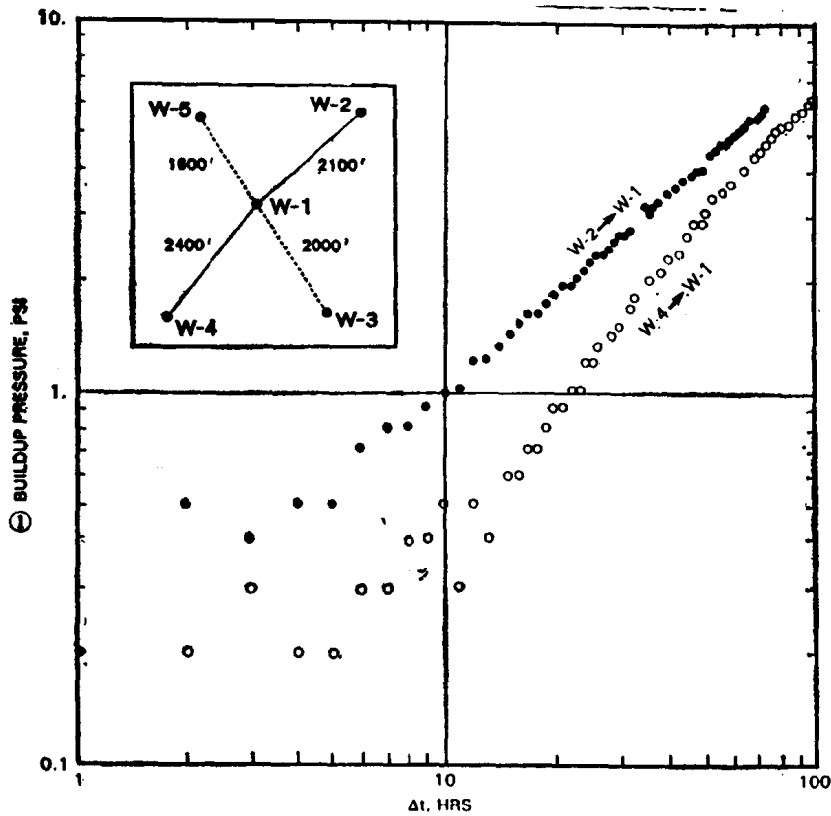


图 10 在Prudhoe Bay油田试井现场取得的双孔隙性动态实例, 观察井在“供液”层完井
①恢复压力, 磅/英寸²; ②小时