石油工业出版社

实用现代试井解释方法

刘能强 编

实用

实用现代试井解释方法

刘 能 强 编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书作者运用精炼语言，简明扼要地介绍了不稳定试井的原理及其公式推导等内容，重点介绍了应用解释图版及样板曲线进行试井解释的现代方法，是一本实用性很强的参考用书，特别适合已具有一般常规试井知识和解释方法的油藏地质及工程技术人员学习和参考。

本书介绍的解释方法所用解释图版，请参阅我社《现代试井解释图版》1985年版一书。

本书还可作为现场试井人员培训教材。

实用现代试井解释方法

刘能强　编

*

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲 36 号）

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 6 3/4 印张 160 千字 印 1—2,000

1987 年 6 月北京第 1 版 1987 年 6 月北京第 1 次印刷

书号：15037 · 2705 定价：1.30 元

序　言

童　宪　章

油气田试井是油藏工程分析及研究工作的关键手段。二十世纪五十年代开始应用不稳定试井的理论和解释方法，在油气藏动态和油气井的产状分析方面形成了重要的突破。进入七十年代后，在应用解释图版或样板曲线分析方法方面又有新的跃进，到目前已形成一套相当完善的现代试井解释方法。为了使我国从事油藏工程研究和管理的技术人员及时掌握这一领域的新知识及工作方法，本书作者编写了这本教材和参考资料。在内容方面应用精炼的语言，系统扼要地介绍了不稳定试井方法的主要部分，特别着重于新的成就。书中对原理和公式推导只作了简明扼要的介绍，使读者能迅速地掌握和应用。本书适用于已具有一般常规试井知识和解释方法的油藏地质及工程技术人员，是一本适合广大范围油田开发工作人员使用的培训教材和参考资料。

作　者　的　话

这本小册子是根据我在法国佛罗石油技术服务公司(FLOPETROL TECHNIQUE SERVICES）进修期间参加该公司的试井解释培训班所学习的内容，结合自己的一些体会编写而成。编写的目的是向我国试井界介绍佛罗公司所使用的现代试井解释方法，希望能在学习外国先进技术，提高我国试井解释水平方面，起到些微抛砖引玉的作用。

运用本书中所介绍的现代试井解释方法，进行实际资料的解释，需要可供实际拟合的、印得很精确、很清楚的解释图版。这种图版已由石油工业出版社出版。这套《现代试井解释图版》由姚振年、庄惠农编译，共十张，都是彩色的，很好用，这套图版中仍保留佛罗公司原图版中的英制单位公式，但在说明中附上了不同单位制（包括常用工程单位制即矿场实用单位制和在全国推行的法定单位制）下的公式和表达式。考虑到目前各油田仍广泛使用实用单位制，为了便于迅速推广，本书中除特别说明之处（主要是推导公式时）使用达西单位制外，均使用实用单位制。在实际进行试井解释时，可用这套用英制标出的解释图版进行拟合，得到各种拟合值，然后用本书中所给出的公式进行计算，得到实用单位制下的各项参数。在使用法定单位制后，则用《现代试井解释图版说明》中所列法定单位制下的有关公式进行计算，从而得到法定单位制下的各项参数。

现代试井解释方法可用以解释各种测试资料，如中途测试、生产测试、采油井的测试和注水井的测试资料等。它既可以用于油水井，也可以用于气井。在用于气井时，只需将压力p换成拟压力$\Psi(p)$，将无因次压力p_D换成无因次拟压力Ψ_D（在《现代试井解释图版》一书中仍以符号p_D表示Ψ_D）：

$$\Psi(p)=\int_{p_0}^{p}\frac{2p}{\mu Z}dp$$

$$\Psi_D=2.6247\times10^{-5}\frac{kh}{q}\frac{T_{sc}}{T}\frac{1}{p_{sc}}\Delta\Psi=2.6247\times10^{-5}\ \frac{kh}{q}\ \frac{T_{sc}}{T}\ \frac{2}{p_{sc}}\int_{p_0}^{p_0+\Delta p}\frac{p}{\mu Z}dp$$

（上式用的是矿场常用单位制）。其中μ是气体的粘度，Z是气体的偏差系数。因此，只要了解了油井的试井解释方法，也就可以对气井试井进行解释了。

本书是在石油工业部李天相副部长的关怀、鼓励和支持下写成和出版的。初稿曾经石油工业部勘探开发科学研究院秦同洛副院长和陈元千工程师等审阅。童宪章总工程师在本书的整个编写和修改过程中，给予了极大的关怀和支持，并对初稿和修改稿作了逐字逐句的审阅，提出了许多宝贵的意见，并为本书写了序言。在誊写书稿和清绘插图等工作中，得到本院黄石追、高炳泉、余增援、高纯福、程永茂和杜山高等同志的大力帮助。试井界许多同志也对本书的编写和出版给予了很大的鼓励和支持。谨向他们致以衷心的谢意。

由于我学习现代试井解释方法的时间很短，理论水平很低，缺乏实践经验，加上时间很仓促，因此本书中可能有很多错误，敬请读者批评指正。

刘能强

目　　录

第一章　预备知识

我们知道：不稳定流动试井的实质，就是改变油（气）井的产量，并测量由此而引起的井底压力变化。这种压力变化同测试过程中的产量有关，也同油（气）藏和测试井的特性有关。因此，运用试井资料，即测试过程中的井底压力和产量资料，结合其他资料，可以测算油（气）藏和测试井的许多特性参数，包括估算测试井的完井效率、井底污染情况，判断是否需要采取增产措施（如酸化、压裂）、分析增产措施的效果，估算测试井的控制储量、地层参数、地层压力，以及探测测试井附近的油（气）层边界和井间连通情况等等。因此，试井成了油（气）田勘探开发过程中认识地层和油（气）井特性的不可缺少的重要手段。试井资料对于制订油（气）田开发方案、进行油（气）藏动态预测和检验等等，都有着非常重要的作用。值得特别指出的是：在我们所能取得的各种资料，如岩心分析、电测解释和试井等资料当中，只有试井资料才是在油（气）藏的动态条件下测得的，由此求得的参数能够较好地表征油（气）藏动态条件下的特性。

显然，试井资料的测取和运用是试井工作的两个重要组成部分。前者即现场测试，为的是取得足够的可靠的资料；后者即试井解释，要求通过分析测得的资料，得到尽可能多的关于地层和测试井的可靠信息。本书只讨论油井试井解释的一些方法，但它们同样适用于水井和气井。

§1　试井解释的理论基础

试井解释建立在一整套理论之上，要涉及许多相当复杂的数学问题。这里仅对其理论基础作个简要的介绍。

单相弱可压缩且压缩系数为常数的液体在水平、等厚、各向同性的均质弹性孔隙介质中渗流，其压力变化服从如下偏微分方程（扩散方程）：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{\phi\mu C_t}{k}\frac{\partial p}{\partial r}$$

或

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{1}{\eta}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad \eta=\frac{3.6k}{\phi\mu C_t} \tag{1}$$

设在无限大地层中有一口井。在这口井开井生产前，整个地层具有相同的压力p_i——在勘探初期，这就是原始地层压力。从某一时刻$t=0$开始，这口井以恒定产量Q生产。则容易列出如下定解条件：

$$\left.\begin{aligned} &p|_{t=0}=p_i \\ &p|_{r=\infty}=p_i \\ &r\frac{\partial p}{\partial r}\bigg|_{r=r_w}=\frac{Q\mu B}{2\pi kh} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中　$p=p_{(r,t)}$——距离井r（厘米）处在t（秒）时刻的压力（大气压）；

p_i ——原始地层压力（大气压）；

r ——离井的距离（厘米）；

t ——从开井时刻起算的时间（秒）。

k ——地层渗透率（达西）；

h ——地层厚度（厘米）；

μ ——流体粘度（厘泊）；mpa·s

ϕ ——地层孔隙度（无因次）；

C_t——地层及其中流体的综合压缩系数（1/大气压）。

$$C_t = C_r + C_oS_o + C_wS_w + C_gS_g$$

其中C_r、C_o、C_w和C_g分别为岩石、油、水和气的压缩系数；S_o、S_w和S_g分别为地层的含油饱和度、含水饱和度和含气饱和度。

r_w——井的半径（厘米）；

Q——井的地面产量（厘米^3/秒）；

B——原油的体积系数（无因次）；

$$\eta = \frac{k}{\phi\mu C_t}$$——导压系数（厘米^2/秒）。

这是一个表征地层和流体“传导压力”难易程度的物理量。假定一口井以某一固定产量Q开井生产，在离这口井一定距离(譬如说1000米)的地方，压力因此而下降某一数值（譬如说10^{-6}大气压）所需的时间，将因导压系数的不同而不同：导压系数越大，所需时间就越短；导压系数越小，所需时间就越长。

方程（1）在定解条件（2）下的解为

$$p = p_{(r,t)} = p_i - \frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\eta t}\right)\right] \quad (3)$$

式中Ei是幂积分函数（Exponential Integral Function）：

$$Ei(-x) = -\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du$$

当$x<0.01$时，有

$$Ei(-x) \approx \ln x + 0.5772 \approx \ln(1.781x)$$

由（3）可得井底流动压力$p_{wf}(t) = p(r_w, t)$为

$$p_{wf(t)} = p_i - \frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[-Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta t}\right) + 2S\right] \quad (4)$$

式中附加了一项由于井壁阻力所引起的附加压力降$\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\cdot 2S$，其中S为表皮因子，它们的意义将在下一节详细介绍。

把（4）写成压差的形式，得

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) = \frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[-Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta t}\right) + 2S\right] \quad (5)$$

当$\frac{r_w^2}{4\eta t}<0.01$时（这个条件很容易满足），有

$$p_{wf}(t)=p_i-\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[\ln\frac{2.25\eta t}{r_w^2}+2S\right] \tag{6}$$

换成常用对数，得

$$p_{wf}(t)=p_i-\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[2.303\lg\frac{2.25\eta t}{r_w^2}+2S\right] \tag{7}$$

写成压差形式：

$$\Delta p=p_i-p_{wf}(t)=\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[2.303\lg\frac{2.25\eta t}{r_w^2}+2S\right] \tag{8}$$

式（4）、（5）或（6）、（7）、（8）可称为"压降公式"，因为它们描述的是测压力降落曲线过程中的井底压力变化。

应用迭加原理，可以得到多井情形和变产量情形的各种压力变化公式。

所谓"迭加原理"就是：如果某一线性微分方程的定解条件也是线性的，并且它们都可以分解成为若干部分，即分解成若干个定解问题，而这几个定解问题的微分方程和定解条件相应的线性迭加，正好是原来的微分方程和定解条件，那末，这几个定解问题的解相应的线性迭加就是原来的定解问题的解。举个最简单的例子：定解问题

$$\begin{cases}\frac{\partial y}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial t}=0\\ y|_{t=0}=x\\ y|_{x=0}=-t\end{cases} \tag{9}$$

可以分解为以下两个定解问题，即

$$\begin{cases}\frac{\partial y_1}{\partial x}+\frac{\partial y_1}{\partial t}=1\\ y_1|_{t=0}=x\\ y_1|_{x=0}=0\end{cases} \tag{10}$$

和

$$\begin{cases}\frac{\partial y_2}{\partial x}+\frac{\partial y_2}{\partial t}=-1\\ y_2|_{t=0}=0\\ y_2|_{x=0}=-t\end{cases} \tag{11}$$

容易验证：定解问题（10）和（11）的微分方程的迭加

$$\left(\frac{\partial y_1}{\partial x}+\frac{\partial y_1}{\partial t}\right)+\left(\frac{\partial y_2}{\partial x}+\frac{\partial y_2}{\partial t}\right)=1+(-1)=0$$

即

$$\frac{\partial(y_1+y_2)}{\partial x}+\frac{\partial(y_1+y_2)}{\partial t}=0$$

和定解条件的迭加

$$y_1|_{t=0}+y_2|_{t=0}=(y_1+y_2)|_{t=0}=x+0=x$$

$$y_1|_{x=0}+y_2|_{x=0}=(y_1+y_2)|_{x=0}=0-t=-t$$

恰与定解问题（9）完全一样。也很容易验证：

$$y_1=x$$

和

$$y_2=-t$$

分别是定解问题（10）和（11）的解。由迭加原理知

$$y=y_1+y_2=x-t$$

就是定解问题（9）的解。

这里我们只来讨论如何应用迭加原理导出压力恢复公式。假定油井A在以恒定产量Q厘米^3/秒生产t_p秒后关井，关井时间用Δt表示（图1，（1））。显然，这时定解问题是

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial p}{\partial r}=\dfrac{1}{\eta}\dfrac{\partial p}{\partial(\Delta t)}\\ p|_{\Delta t=-t_p}=p_i\\ p|_{r=\infty}=p_i\\ r\dfrac{\partial p}{\partial r}\Big|_{r=r_w}=\begin{cases}\dfrac{Q\mu B}{2\pi kh} & -t_p\leqslant\Delta t\leqslant 0\\ 0 & \Delta t>0\end{cases}\end{cases}\tag{12}$$

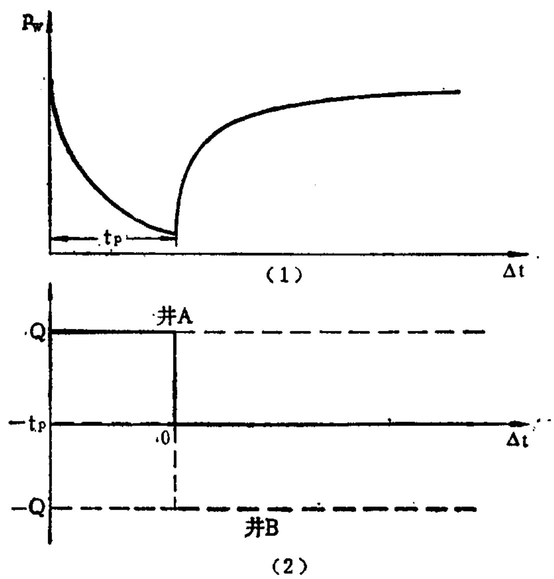


图1　迭加原理示意图

我们设想：

一、井A在关井后继续以恒定产量Q一直生产下去（即设想井A并不关井）；

二、有一口井B，它与井A同井眼，从井A关井的时刻开始，以恒定的注入量Q注入，或以恒定产量$-Q$生产（图1，(2)）。

则从井A关井的时刻开始，井A和井B的产量之代数和为$Q+(-Q)=0$，即相当于关井。这就是说，我们可以把定解问题（12）分解为下面两个定解问题：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2 p_1}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial p_1}{\partial r}=\dfrac{1}{\eta}\dfrac{\partial p_1}{\partial(\Delta t)}\\ p_1|_{\Delta t=-t_p}=p_i\\ p_1|_{r=\infty}=p_i & \Delta t>-tp\\ r\dfrac{\partial p_1}{\partial r}\Big|_{r=rw}=\dfrac{Q\mu B}{2\pi kh}\end{cases}\tag{13}$$

和

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2 p_2}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial p_2}{\partial r}=\dfrac{1}{\eta}\dfrac{\partial p_2}{\partial(\Delta t)}\\ p_2|_{\Delta t\leqslant 0}=0\\ p_2|_{r=\infty}=0 & \Delta t>0\\ r\dfrac{\partial p_2}{\partial r}\Big|_{r=rW}=-\dfrac{Q\mu B}{2\pi kh}\end{cases}\tag{14}$$

由前述可知，定解问题（13）的解为

$$p_1(\Delta t)=p_i-\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left\{-Ei\left[-\frac{r_w^2}{4\eta(t_p+\Delta t)}\right]\right\}$$

而定解问题（14）的解为

$$p_2(\Delta t)=-\frac{(-Q)\mu B}{4\pi kh}\left[-Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta\Delta t}\right)\right]$$

故定解问题（12）的解应为（我们用p_{ws}表示井底关井压力）：

$$p_{ws}(\Delta t)=p_1+p_2=p_i-\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left\{-Ei\left[-\frac{r_w^2}{4\eta(t_p+\Delta t)}\right]\right.$$

$$\left.+Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta\Delta t}\right)\right\} \tag{15}$$

或

$$\Delta p=p_i-p_{ws}(\Delta t)=\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left\{-Ei\left[-\frac{r_w^2}{4\eta(t_p+\Delta t)}\right]\right.$$

$$\left.+Ei\left(-\frac{r_w^2}{4\eta\Delta t}\right)\right\} \tag{16}$$

若用对数表达式近似表示Ei函数，则有

$$p_{ws}(\Delta t)=p_i-\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{17}$$

或

$$\Delta p=p_i-p_{ws}(\Delta t)=\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t} \tag{18}$$

式（15）、（16）或（17）、（18）就是“压力恢复公式”。（17）和（18）又称为赫诺（Horner）公式。

由（7）有

$$p_{ws}\Big|_{\Delta t=0}=p_{wf}\Big|_{t=t_p}=p_i-\frac{Q\mu B}{4\pi kh}\left[2.303\lg\frac{2.25\eta t_p}{r_w^2}+2S\right]$$

式（17）与上式相减得：

$$p_{ws}(\Delta t)=p_{wf}(t_p)+\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}\left(-\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}+\lg\frac{2.25\eta t_p}{r_w^2}\right.$$

$$\left.+0.87S\right)$$

或

$$p_{ws}(\Delta t)=p_{wf}(t_p)+\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}\left[\lg\left(\frac{2.25\eta\Delta t}{r_w^2}\cdot\frac{t_p}{t_p+\Delta t}\right)+0.87S\right] \tag{19}$$

如果关井前生产时间t_p比最大关井时间Δt_{max}长得多，即$t_p\gg\Delta t_{max}$，则

$$t_p+\Delta t\approx t_p$$

$$\frac{t_p+\Delta t}{t_p}\approx 1$$

此时有

$$p_{ws}(\Delta t)\approx p_{wf}(t_p)+\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}\left(\lg\frac{2.25\eta\Delta t}{r_w^2}+0.87s\right) \tag{20}$$

有人称上式为简化的压力恢复公式。它在形式上与压降公式（7）非常相似，均称为Miller-Dyes-Hutchinson公式，简称作MDH公式。

由式（7）、（17）和（20）可知，在压降情形，$p_{wf}(t)$与lgt成一直线；在恢复情形，$p_{ws}(\Delta t)$与$\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$或$\lg\Delta t$($t_p\gg\Delta t_{max}$时）成一直线，直线的斜率均为$\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}$或$-\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}$。为了方便起见，我们用m表示斜率的绝对值，即

$$m=\frac{2.303Q\mu B}{4\pi kh}$$

当我们画出压力降落曲线（$p_{wf}-\lg t$曲线，称为MDH曲线），或压力恢复曲线($p_{ws}-\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$曲线，称为Horner曲线，或在$t_p\gg\Delta t_{max}$时，画出$p_{ws}-\lg\Delta t$曲线，称为MDH曲线)，并量出其直线段的斜率，就可以算出流动系数：

$$\frac{kh}{\mu}=\frac{2.303QB}{4\pi m}$$

由式（7）还可知，若在直线段（或其延长线）上取一点，设其对应时间为t_o，压力值为$p_{wf}(t_o)$，便可算出表皮因子：

$$S=1.151\left[\frac{p_i-p_{wf}(t_o)}{m}-\lg\frac{2.25\eta t_o}{r_w^2}\right] \tag{21}$$

在压力恢复情形，由（19）式可算出表皮因子：

$$S=1.151\left[\frac{p_{ws}(\Delta t_o)-p_{ws}|_{\Delta t=0}}{m}-\lg\left(\frac{2.25\eta\Delta t_o}{r_w^2}\cdot\frac{t_p}{tp+\Delta t_o}\right)\right] \tag{22}$$

如果$t_p\gg\Delta t_o$，则上式可简化为

$$S=1.151\left(\frac{p_{ws}(\Delta t_o)-p_{ws}|_{\Delta t=0}}{m}-\lg\frac{2.25\eta\Delta t_o}{r_w^2}\right) \tag{23}$$

其中Δt_o亦为直线段或其延长线上任意一点。

由式（17）还可看出：当关井时间$\Delta t\to\infty$时，$\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\to 1$，$\lg\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\to 0$，

$p_{ws}(\Delta t) \to p_i$。因此，把直线段延长，使它与 $\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}=1$ 相交，交点所对应的压力值就是 p_i。在尚未投入开发的油藏情形，这是原始地层压力；而在已投入开发的油藏，则是油藏的视平均压力。

这一套方法称作"半对数曲线分析法"，已在我国各油田广泛使用。

除了计算流动系数 $\frac{kh}{\mu}$、表皮因子S和地层压力 p_i 之外，试井资料还有许多用处，我们将在以后的章节中予以介绍。

§2　一些重要的基本概念

一、无因次量（Dimensionless quantities）

一般的物理量都具有因次，即量纲，并可用基本因次表示出来。例如：面积具有长度平方〔L^2〕的因次，产量（即流率）的因次为〔L^3/t〕，压力（实际上是压强）的因次为〔m/Lt^2〕等等。

但是也有一些量却不具有因次（即因次为1）。例如：原油体积系数、含油饱和度、孔隙度、相对渗透率、表皮因子、赫诺曲线中的 $\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$ 等等，都是无因次量。

为了一定的目的，我们常常要把某些具有因次的物理量无因次化，即引进新的无因次量，或称为无量纲量。我们用下标D表示"无因次"，如用 t_D 表示无因次时间。一般说来，引进的无因次物理量是这些物理量与别的一些物理量的组合，并和这些物理量本身成正比。譬如，我们进行试井解释常用的无因次量中，无因次压力 p_D 与压差 Δp 成正比●：

$$P_D=\frac{2\pi kh}{Q\mu B}\Delta p \tag{24}$$

无因次时间 t_D 与开井时间t（或关井时间 Δt）成正比：

$$t_D=\frac{k}{\phi\mu C_t r_w^2}t=\frac{\eta}{r_w^2}t \tag{25}$$

或

$$t_D=\frac{k}{\phi\mu C_t r_w^2}\Delta t=\frac{\eta}{r_w^2}\Delta t \tag{26}$$

无因次井筒储存系数 C_D 与井筒储存系数C成正比：

$$C_D=\frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$$

无因次距离 r_D 与距离r成正比：

● "无因次压力"实际上是"无因次压差"。但鉴于英文原文"Dimensionless pressure"及已据此译成"无因次压力"，我们也不改用"无因次压差"，而沿用"无因次压力"。但应记住其实质是无因次压差。

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$

如此等等。上面各式中，

p_D——无因次压力

k——油层渗透率（达西）

h——油层厚度（厘米）

Q——油井产量（厘米^3/秒）

B——体积系数（无因次）

μ——原油粘度（厘泊）

Δp——压差（大气压）

t_D——无因次时间

ϕ——油层孔隙度（无因次）

C_t——综合压缩系数（1/大气压）

r_w——油井半径（厘米）

t——开井生产时间（秒）

Δt——关井时间（秒）

C_D——无因次井筒储存系数

C——井筒储存系数（厘米^3/大气压；定义见下一段）

r——离井的距离（厘米）

r_D——无因次距离

无因次化的方法不是唯一的。人们往往根据不同的需要，用不同的方法来定义同一个无因次量。例如，我们将在不同的场合，使用不同的无因次时间，有用井的半径r_w定义的：

$$t_D = \frac{k}{\phi \mu C_t r_w^2} t$$

有用井的有效半径或折算半径r_{we}定义的：

$$t_{De} = \frac{k}{\phi \mu C_t r_{we}^2} t$$

有用油藏面积A定义的：

$$t_{DA} = \frac{k}{\phi \mu C_t A} t$$

还有用裂缝半长x_f定义的：

$$t_{Df} = \frac{k}{\phi \mu C_t x_f^2} t$$

等等。

用无因次量来讨论问题有许多好处，例如：

1. 由于若干有关的因子已经包含在无因次量的定义之中，所以往往使得关系式变得很简单，因而易于推导、记忆和应用。譬如，在无因次形式下，上节中的式(3)、(5)和(8)分别写成：

$$p_D=\frac{1}{2}\left[-Ei\left(-\frac{r_D^2}{4t_D}\right)\right] \tag{27}$$

$$p_D=\frac{1}{2}\left[-Ei\left(-\frac{1}{4t_D}\right)+2S\right] \tag{28}$$

$$p_D=\frac{1}{2}\left[\ln t_D+0.80907+2S\right] \tag{29}$$

可以看到，这些式子与油藏和油井的实际物理参数如$\frac{kh}{\mu}$、Q、ϕ等都没有直接关系。

2． 由于使用的是无因次量，所以导出的公式不受单位制的影响和限制，因而使用更为方便。

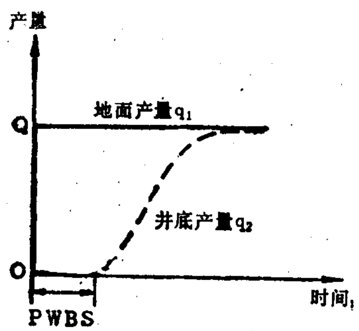
3． 可以使得在某种前提下进行的讨论具有普遍的意义。这就是说，使得讨论的结果可以适用于满足该前提的任何实际场合。譬如，对某种物理或数学模型的无因次解，可以适用于符合这种物理或数学模型的任何油藏中的任何一口井，而不管它的特性参数如K、ϕ、μ、h、Q等为何值。在得到最后结果后，再由无因次量与实际物理量之间的关系换算成我们需要的实际数值，而这是非常容易的。正是因为这个原因，使得现代试井解释中所使用的解释图版可以到处通用。

二、井筒储存系数（Wellbore Storage Constant）

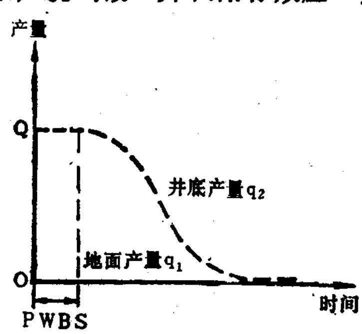
油井刚开井或刚关井时，由于原油具有压缩性等多种原因，地面产量q_1与井底产量q_2并不相等，如图2所示。以井筒充满单相原油的情形为例，当油井一打开，从井口采出的原油（产量Q）完全是靠充满井筒的压缩原油的膨胀（井筒卸压）而采出的，还没有原油从地层流入井筒。这时，井底产量$q_2=0$，地面产量$q_1=Q$。然后，随着井筒中原油弹性能量的释放，井底产量逐渐增加，过渡到与地面产量相等，即$q_1=q_2=Q$（图2之（1））。

在关井情形，当油井一关闭，地面产量q_1立即由Q变为0，但在井底，原油仍然源源不断地由地层流入井筒，使井筒压力逐渐增加（载压），直到最后与井筒周围的地层的压力达到平衡。到了这个时候，井底产量才变为0，即$q_1=q_2=0$，真正实现了井底关井。显然，这就是我们所熟悉的“续流效应”（图2之(2)）。

上述当油井刚开井或刚关井时所出现的现象，就叫做“井筒储存效应”，或“井筒储集



（1）开井情形



（2）关井情形

图2. 井筒储存效应示意图

效应”。$q_2=0$（开井情形）或$q_2=Q$（关井情形）的那一段时间，称为“纯井筒储存”阶段，简写作PWBS（Pure Wellbore Storage）。

我们用“井筒储存系数”来描述井筒储存效应的强弱程度，即井筒靠其中原油的压缩等原因储存原油或靠释放井筒中压缩原油的弹性能量等原因排出原油的能力，并用C代表：

$$C=\frac{dV}{dp}\approx\frac{\Delta V}{\Delta p}$$

其中ΔV是井筒中所储原油体积的变化，Δp是井筒压力的变化。为了方便起见，我们将使用矿场上常用的实用单位制。这里，ΔV和Δp的单位分别用米^{3}和工程大气压（公斤/厘米^2），而q_1、q_2和Q的单位用米^3/日。显然，井筒储存系数C的物理意义，在实用单位制下就是：在关井情形，要使井筒压力升高1公斤/厘米^2，必须从地层中流进井筒C米^{3}原油；在开井情形，当井筒压力降低1公斤/厘米^{2}时，靠井筒中原油的弹性能量可以排出C米^{3}原油。

显然，我们希望能尽量消除或降低井筒储存效应。于是提出了“井底关井”的方法，“井底关井器”也就应运而生并且已经得到了广泛的应用。

我们仍假定原油充满整个井筒。在开井或关井t小时内，井筒中原油体积的变化为

$$\Delta V=\frac{|q_1-q_2|t}{24}$$

式中q_1、q_2分别为地面产量和井底产量，单位为米^3/日。因此

$$C=\frac{\Delta V}{\Delta p}=\frac{|q_1-q_2|t}{24\Delta p}$$

在纯井筒储存阶段，有$q_2=0$，$q_1=Q$（开井情形）或$q_1=0$，$q_2=Q$（关井情形），故

$$|q_1-q_2|=\begin{cases}q_1=Q\ \text{开井情形}\\ q_2=Q\ \text{关井情形}\end{cases}$$

这就是说：在开井情形，$|q_1-q_2|$为油井的稳定产量Q，在关井情形，$|q_1-q_2|$为关井前的稳定产量Q。所以，在纯井筒储存阶段有

$$\Delta V=\frac{Qt}{24}$$

故

$$C=\frac{\Delta V}{\Delta p}=\frac{Qt}{24\Delta p} \tag{30}$$

$$\Delta p=\frac{Q}{24C}t \tag{31}$$

如果原油是单相的（譬如在井口压力高于饱和压力的情况下），则

$$\Delta V=VC_o\Delta p$$

$$C=\frac{\Delta V}{\Delta p}=\frac{VC_o\Delta p}{\Delta p}=VC_o \tag{32}$$

式中V为井筒容积（米^3）。

由式（32）计算的井筒储存系数称为“由完井资料计算的井筒储存系数”，记作$C_{完井}$。它是在井筒充满单相原油、封隔器（如果有的话）密封、井筒周围没有与井筒相连通的裂缝等条件下算得的，因此是井筒储存系数的最小值。由于下列原因，实际井筒储存系数往往大