

应用井下流量和压力数据估算 多层油藏的渗透率和表皮因数

P.C. Shan, M. Marakas, F. Kucuk, L. Ayestaran
Schlumberger Well Services

柏松章 译
油 工 校

摘 要

文中探讨了在多层油藏中单层水平和垂直渗透率以及表皮因数的估算问题,包括层间窜流和通过井底的混合流动,证明这里引用的方法也可以用来估算在已开发油藏中泄油面积内各单层的平均流体压力。

提出了一个包括进行井底势能和流体流量井下测量的多步骤测试程序。流量恰好各单层上部,当通过改变地面流量而使瞬变现象产生的时候,进行测量,每次持续几个小时。一个使用单井油藏数值模型的历史拟合程序,被用来同时分析多步测试的全部数据。这种方法的结果与应用合成数据的五个实例中所用的常规方法得出的每步试验的单个解释结果相对比。同时分析法由各步骤之间的最佳协合得到好处,并且始终能够提出更好的估算。

进行了线性化敏感性分析,以确定采用同时方法来解释多步骤试井时参数估算中的可能误差。这一分析给出一个指标,来说明具有给定测量误差程度的给定测量序列是否包括了能够单值地确定单个参数的足够信息。

一、前 言

近二十多年来在湾岸地区、阿拉斯加、北海、中东和远东发现的许多油田是厚油藏。因为这样的油藏是在地质时代里改变的沉积过程的结果,它们时常由不同的地层所组成。因为这些地层对一次和二次采油有影响,描述这样的多层油藏是一个重要的问题。地层渗透率的差异导致不平衡的能量消耗。由于驱扫不到致密带内的油,这种系统注水开采是困难的。

有关这类油藏的主要问题是双重的:各层的地质描述和它们从油藏工程观点的评价。因为它们密切相关,在试井数据的分析中综合所用地质、地球物理和裸眼测井信息是重要的。试井数据的解释可以借助于由其它来源得到的信息。例如,它们可以提供油藏工程参数的“初始估算”,然后通过试井数据的分析来改进这些初始估算值。

这里探讨的问题是由试井数据估算地层渗透率、表皮因数和地层压力。常规试井(压力降落或压力恢复)反映整个系统的特征。因此,一个两层的地层有时不能与单层地层相区

别,特别是存在井筒续流效应的时候。当然,有常规试井可以应用的少数几个特殊情况,这些情况已被Tariq和Ramey^[2]以及Raghavan等人^[3]所引证。而且,常规试井的解释通常受到层间窜流和通过井底的混流的限制。在许多情况下,压力数据完全不反映井底混流,并且在Horner图上得出一条虚假的直线。

许多作者研究了多层油藏的特点并且分析了这种系统的试井数据,其概括情况参见文献[1]。用生产测试与油藏瞬变压力响应相结合来估算地层渗透率和表皮因数的思路,被G. Stewart等人^[4]探讨过。他们提出通过使用地面流量的历史拟合和单井模型,应用关井期间的拟稳定状态流动剖面测试和瞬变压力测试来确定地层参数。但是,如同Stewart等人所感到的并在此文中所证明的那样,用这样的测试只能或者估算地层渗透率,或者估算表皮因数,而不能同时估算这两个参数。

Kucuk等人^[1]提出,对于一个多层油藏,各层的参数可以通过同时记录井底压力和各层流量的连续压降试井来估算。在他们的文章中,使用了一个没有窜流效应的两层模型。这种新的试井方法将被扩展到具有充分窜流效应的任意层数的一般情况。本文将提出一种新的解释方法,此方法应用具有窜流和混流的多层油藏模型,并且同时处理整个系列的测量结果。

这里提出的试井包括逐步改变地面流量而使瞬变现象发生时,在井筒不同深度进行井底压力和井下流量的测量。这里采取的哲学途径包括把全部数据看作一个单一的单元并且用这样的方式来确定油藏参数,即当它们被用于综合性的现实的单井油藏模型时,能够使模型的响应同时拟合所有的数据。这样,解释的问题就归结为使模型的响应与整个试井期间的数据进行历史拟合问题。历史拟合问题是用标准的极小化方法来解决的。常规单项分析的结果,包括用于单项数据的褶积^[1,5],可被用来作为历史拟合程序的起点。

也将研究确定这样得出的估算值的质量问题。参数估算中不可靠性的统计尺度,将由估算问题的近似线性分析来求得。而且它将表明,关于不同参数识别能力的结论,大都不受进行线性化分析的参数的实际值的影响;这就使我们能够提前进行设计,以便在获得有关各层性质的信息方面使试井达到最大的效果。这一分析也将回答足够的测量序列包括什么和具有什么样的测量精度才能得出地层性质的满意估算值问题。

二、提出的试井程序

在图1中,一张草图表示进行试井的多层油藏。一支生产测试工具被下入井底以记录在给定深度的压力和流量。在一个未投入开发的油藏或者关闭一段长时间的油井,试验按下述步骤进行。

这一试井方法也适用于已经生产一段长时间的稳定的井。在下述步骤中所要求的唯一变化,是必须从一开始就做出稳定生产剖面的精确测量。井底压力和单层流量变化的记录也将有助于试井分析。数据的分析按照下述步骤进行,但有一个变化:必须用井底压力和流量与其稳定值的偏差值(或借助变化趋势设计的值)来代替它们的绝对值。

第一步:把测井工具定位在最上层的顶部,打开地面油嘴,开始用最大产量生产。记录井底压力和井下流量3或4个小时。这一步骤和其它步骤的持续时间取决于渗透率的高低。它们的事先估算值可用于确定周期的长短。不要求测量地面流量。

第二步:进行完全的生产剖面测试而不改变地面流量。由此测试剖面分辨出不同的生产

层。

第三步：把测井工具定位在底部层的顶部，把地面流量降低到第一步值的三分之二左右。记录压力和井下流量3—4小时。在此时间阶段结束时对整个生产井段测生产剖面。

第四步：然后，交替改变两个值之间的地面流量，每次3—4小时，把测井工具依次定位在下一个更高层的顶部，并且记录压力和井下流量。在每个井段结束时测生产剖面。

三、解 释 程 序

1. 传统解释——连续解释

步骤a：在此分析中忽略了垂直渗透率。假定没有窜流。假定为一单层油藏，分析第一步所取得的数据，得出平均值 $\overline{kh}$ 和 $\overline{s}$ 。

步骤b：外推步骤1的压力响应，并由步骤2测量的压力减去外推压力。应用此增值压力响应结合单层油藏的 p_D 函数褶积⁽⁶⁾以及测得的井下流量，确定底部地层的 $(kh)_{1,1}$ 和 $s_{1,1}$ 。

步骤c：应用一个与上面步骤b相似的程序，把工具放在 $(l-1)$ 层的顶部进行测量，确定平均值 $(\overline{kh})_{1,1-l}$ 和 $(\overline{s})_{1,1-l}$ 。

步骤d：用每一相继测量步骤的数据重复步骤c的分析，得出综合油藏，包括一个给定层和所有下面层的平均参数 $(\overline{kh})_{1,1}$ 和 $(\overline{s})_{1,1}$ 。

步骤e：由下面给出的加权平均公式得出每个层的参数。

$$(\overline{kh})_{1,1} = (k_1 h_1 + k_{1+1} h_{1+1} + \cdots + k_l h_l) \quad (1)$$

$$(\overline{s})_{1,1} = \frac{(s_1 q_1 + s_{1+1} q_{1+1} + \cdots + s_l q_l)}{(q_1 + q_{1+1} + \cdots + q_l)} \quad (2)$$

方程(2)中用的流量 q_i ，是当工具位于 i 层顶部在时间间隔结束时在生产剖面测试中测得的流量。

从方程(1)和(2)可以看出，单层的性质可以依次地由底部层开始和以顶部层结束来确定。

2. 新方法——同时解释

与地层流量和井底压力同时解释相联系的历史拟合问题，是作为一个极小化问题提出的，其中由单井数值模拟模型计算的响应是与在最小平方意义上尽可能密的测量值相拟合的。在极小化过程中，估算参数是系统地自动地变化，反复改进拟合的程度。这个过程一直继续到得到一个满意的拟合为止。最小平方极小化原则表达如下：

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i [p_{wb}^{calc}(t_i) - p_{wb}^{obs}(t_i)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l b_{ij} [q_{wb}^{calc}(t_i, h_j) - q_{wb}^{obs}(t_i, h_j)]^2 \quad (3)$$

计算的量值是应用参数的“目前”估算值由单井模型的解得出的。方程(1)中的常量 a_i 和 b_{ij} 是正的加权因数。在求模型的解中，井底压力用作边界条件，而对井下流量进行历史拟合。在模型中，外边界可以假定为没有液流通过或者具有固定压力，初始条件是均一的压力。这一方法是试图在一个模型上同时拟合所有的动态数据。通过这样做，发挥各种测量之间的最佳协合。

上面的公式意味着对测量值一直是抽样检验的。实际上,这种抽样检验应当做到包括测量值的基本特性,而抽样数目最小。通常,在瞬变现象开始之后就经常抽样检验,样品的对数空间可以满足这一要求。

在目标函数的上述公式[方程(3)]中,加权因数 b_{ij} 的选择只包括测量的响应。例如,对于所有的时间瞬间,当在 h_j 的流量没有测量时,相应的加权值 b_{ij} 就成为0。同样,井底压力用来作为模型的边界条件,压力项取消,所有的 a_i 成为0。

方程(3)中的加权值 a_i 和 b_{ij} 也可以用来改变不同测量部分的相对重要性。它们反映测量仪器的精度,每个测量部分的可信度,并且可能反映期望测量达到的范围能符合具有具体几何形态的单相单井多层油藏的模型。

一旦求得好的拟合,就可以用下面提出的线性分析来近似地分析这样求得的估算值的精度。

四、估算值的精度

关于各估算值中可能误差的量度,可以通过本节所描述的近似线性敏感性分析来求得。在这里提出的分析中,我们仅仅考虑地层渗透率和表皮因数的估算。这种分析可以扩展到也需要估算地层压力的情况。

考虑两个柱向量:一个是通过集合所有测量值组成的;另一个是由需要估算的所有参数组成的:

$$\begin{aligned} \vec{y} = [& p_{wb}(t_1), p_{wb}(t_2) \cdots, p_{wb}(t_n), q_{wb}(t_1, h_1), \\ & q_{wb}(t_1, h_2), \cdots, q_{wb}(t_1, h_l), \\ & q_{wb}(t_2, h_1), q_{wb}(t_2, h_2), \cdots, q_{wb}(t_2, h_l), \\ & q_{wb}(t_m, h_1), q_{wb}(t_m, h_2), \cdots, q_{wb}(t_m, h_l)]^T \cdots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\vec{x} = [k_{x1}, k_{x2}, \cdots, k_{x1}, k_{x1}, k_{x2}, \cdots, k_{x1}, s_1, s_2, \cdots, s_l]^T \cdots \quad (5)$$

现在考虑参数向量中的一个小变化 δx 和在响应向量中的相应变化 δy 。那么对于小的变化,有一线性关系:

$$\delta \vec{y} = A \delta \vec{x} \quad (6)$$

式中 A 是导数 $\frac{\partial y_i}{\partial x_j}$ 的矩阵,其中每一个代表测量值对改变单一参数值的敏感性。

在实际情况下,测量具有随机误差(干扰)。而且,在测量和计算的模型响应之间,由于某些原因往往有一个拟拟合程度。这些将引起估算中的某些误差。之后,估算误差的统计可以由测量向量的变化的统计来确定。传统的Bayesian估算理论⁽⁸⁾提出了计算估算误差统计的方法。它还提供了事先综合关于参数的主要信息的途径。把这些成果应用到我们的线性问题中,就可以得出参数估算的后期协方差的以下表达式(在测量已经进行到取得最多可能的信息以后):

$$P_x = E\{(\vec{x} - \hat{\vec{x}})(\vec{x} - \hat{\vec{x}})^T\} = [P_x^0 + A^T \Sigma_y^{-1} A]^{-1} \quad (7)$$

其中 P_x^0 是先期参数的协方差矩阵, Σ_y 是测量误差协方差加历史误拟合。

一旦计算了敏感性矩阵 A ,就可以对任意给定的先期参数协方差和任意期待的响应误拟

合统计，计算后期估算协方差。而且，已经在一个广泛的条件范围内发现，敏感性矩阵的有关性质，在任意可估计的程度上不取决于实现线性化的参数的实际值。这就使我们有了一种有效的方法，来对一个给定的测量系列事先近似估计在不同参数的估算中可能出现多大误差。的确，通过观察某一参数估算值的不可靠性的降低程度（方差，它是协方差矩阵的对角元素），就能够确定它是否可以由给定的测量系列来估算。这样，在此分析中我们就对设计估算具体参数的试井方案有了一个有力的工具。

虽然这是一个包括了某些假设（见附录1）的近似线性分析，但正如以后指出的，我们能够从中学到有关估算问题性质的许多东西。这种分析将用于评价所提出的试验步骤的应用前景，和确定它是否能够在多层油藏的广泛范围内导致地层性质的满意确定。

五、实 例

为了用例子说明所提出的程序，我们将分析三个假想的多层油藏。除去最后一个实例外，

表 1 实例中多层油藏的参数

参 数	油 藏 1	油 藏 2-N	油 藏 2-W	油 藏 3
1	4	3	3	4
h_i (英尺)	125, 80, 120, 100	50, 100, 80	50, 100, 80	50, 50, 150, 100
k_{x1} (毫达西)	300, 1000, 200, 100	100, 10, 30	100, 10, 30	50, 1000, 10, 100
k_{x1} (毫达西)	0.0	0.0	100, 10, 30	0.0
s_i	2, -1.5, 10, 5	10, -1, 5	10, -1, 5	10, 3, 5, -2
μ (厘泊)	0.8	0.5	0.5	0.8

所有油藏的共同参数:

井底续流常数, $C_s = 0.0$ 地下桶/磅/英寸²

外泄油半径, $R_e = 2000$ 英尺

井底半径, $R_w = 0.35$ 英尺

原始油藏压力, $P_i = 5000$ 磅/英寸²

表 2 油藏 1： 四步(骤)生产测试

1. 由分段解释得出的估算值		
	“真 实” 值	估 算 值
k_x	300, 1000, 200, 100	504.0, 477.0, 223.8, 1.0
s	2, -1.5, 10, 5	0.9, -1.8, 11.5, 5.35

2. 由同时分析得出的估算值			
	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	300, 1000, 200, 100	200, 600, 150, 60	324.0, 997.8, 198.2, 93.7
s	2, -1.5, 10, 5	1, 1, 5, 1	2.55, -1.518, 9.77, 4.281
J	0.784E+04	0.135E+09	0.408E+04

油藏被假定为未开采的或者试井前关井很长一段时间。这三个油藏定名为油藏 1,2,3。它们的详细性质列于表 1。需注明的是油藏 2 有两种情况：2 -W和 2 -N。前者在每个层的垂直渗透率等于水平渗透率并且没有层间隔层，具有明显的窜流。2 -N没有垂向流动($k_z = 0$)；油藏 1 或 3 也没有垂向流动。

六、例1:地层渗透率差异小的实例

图 2 表明油藏 1 进行的生产测试顺序。图 3 表示在试井期间的井底势能变化。表 2 表示应用两种不同解释方法得出的估算值。显然，测量的分段解释得出了表皮因数的良好估算值，但渗透率的估算值不好。另一方面，测量结果的同时拟合对表皮因数和渗透率都给出了良好的估算值。此表还表明了用来开始反复极小化程序的“初始推测值”和在方程(3)中定义的目标函数J的值。在模型中应用了精确参数值时的J值，只能表明由于数值解的差异和其它模拟细则引起的误拟合的程度。在本文中应用此值只是为了控制极小化程序的有效性。

七、敏感性分析

在表 3 列出了对所有试井数据同时历史拟合的线性敏感性分析的结果。在此表中列出的标称参数值用来计算敏感性矩阵 A。先期的估算误差是标准误差。在这些计算中，先期协方差矩阵 P_x 是一个进口等于标准误差平方的对角矩阵。后期的估算误差仅仅是在方程(7)中所定义的 P_x 的对角元素的平方根。但是，因为协方差计算立足于线性近似分析，所以后期的误差严格地说不是估算误差中的标准误差。这样的分析仅仅用于对比的目的，并且列出的数据只是实际估算误差的标准。

在表 3（以及所有以后的相类似的表）中的渗透率误差是用乘法因数来表示的，因为他们的概率分布被假设为对数正态分布。这样，在 k_{x1} 的一个先期误差 2，表示一个因数为 2 的不可靠性。表皮因数的误差是附加的：在先期估算中的误差 5，意味着对平均值有 ± 5 的

表 3 对油藏 1 的敏感性分析

$n = 0, m = 37.$ 标称值 = 真实值

先 期 估 算 误 差							
k_{x_1}	k_{x_2}	k_{x_3}	k_{x_4}	s_1	s_2	s_3	s_4
2.000	2.000	2.000	2.000	5.000	5.000	5.000	5.000

后 期 估 算 误 差								
$\sigma_q(\text{桶/日})$	k_{x_1}	k_{x_2}	k_{x_3}	k_{x_4}	s_1	s_2	s_3	s_4
1.0	1.005	1.001	1.029	1.02	0.030	0.002	0.358	0.153
10.0	1.052	1.006	1.238	1.215	0.286	0.021	2.703	1.281
100.0	1.424	1.053	1.403	1.63	1.975	0.165	4.318	3.247

估算值的后期交叉相关性 ($\sigma_q = 10.0$)

	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
k_{x1}	1.000	-0.794	-0.330	-0.029	0.996	-0.705	-0.340	-0.029
k_{x2}	-0.794	1.000	0.080	-0.152	-0.786	0.954	0.081	-0.153
k_{x3}	-0.330	0.080	1.000	-0.574	-0.349	-0.037	0.998	-0.574
k_{x4}	-0.029	-0.152	-0.574	1.000	-0.029	-0.222	-0.539	0.998
s_1	0.996	-0.786	-0.349	-0.029	1.000	-0.700	-0.359	-0.029
s_2	-0.705	0.954	-0.037	-0.222	-0.700	1.000	-0.048	-0.223
s_3	-0.340	0.081	0.998	-0.539	-0.359	-0.048	1.000	-0.540
s_4	-0.029	-0.153	-0.574	0.998	-0.029	-0.223	-0.540	1.000

不可靠性。后期的估算误差是对于误差的标准偏离范围和流量测量中的误拟合提出的。这里没有分析压力测量中的误差；因为井底压力的准确值被作为模型中的边界条件，这里提出的结果不反映压力的误差。这也许是可以理解的，因为压力可以用高的精度来测量。

在估算中的后期误差表明，当流量误差很小（小于1桶/日）的时候，所有参数的估算有很小的不可靠性；因而说明它们很好地取决于数据。当流量变化测量达到10桶/日时， k_{x3} ， k_{x4} ， s_3 和 s_4 的估算就有明显的不可靠性。当流量误差是100桶/日时，只有最高渗透层的性质能被良好确定。

在表3的下部，给出了交叉相关矩阵。此矩阵的元素是以后期协方差矩阵 P_x 的元素项定义的，即

$$C_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sqrt{P_{ii} P_{jj}}}$$

C_{ij} 的最大绝对值是1。一个大的 C_{ij} 值表示，在第 i 和第 j 个参数估算中的误差之间具有很强的相关性；一个参数的大误差是与另一个参数的大误差相联系的。事实上，这样的误差可以彼此补偿并且导致测量的更好拟合。由表3可以清楚地看出，每层的表皮因数和渗透率是密切相关的。同样，在 k_{x3} 和 s_4 以及 k_{x3} 和 k_{x4} 之间也有明显的相关性。这种敏感性分析可以很清楚地检验出局部非唯一性，在此非唯一性中，某些参数的“小”变化或他们的线性组合几乎不受影响地偏离历史拟合。这是一个重要特点，常常出现在包括分布系统的相反问题中^(6,7)。这样的局部非唯一性，在我们的结果中已经得到证明，它使一个或多个参数的误差统计只有微小改进或没有改进。当出现这种情况时，有问题的参数不能根据所考虑的测量来估算。这样，线性分析是确定给定测量计划中参数分辨能力的良好工具。如在附录1中说明的，由敏感性分析所表示的统计估算误差，必须看作是下限。

八、与压力恢复试井的对比

为了与新的多步骤试井相对比，通过拟合传统压力恢复试井数据得出的估算值列于表4。显然，在压力恢复数据上没有足够的信息能对 k_{x1} 或 s_1 得出良好的估算值。这次试井的敏感性分析也列于表4。很明显，对于压力测量和历史拟合的实际精度范围（ $\sigma_{pr} > 1$ 磅/英寸²）来讲，无论是表皮因数还是渗透率都无法很好确定。因为在此情况下地面流量是准确知道

的，所以井底续流系数是好确定的。如果恢复的压力得到精确的测量和拟合 ($\sigma_{pr} = 0.001$ 磅/²英寸)，则除低渗透层(4层)以外，所有的参数都可以分别地精确确定。这一点具有理论意义。

在表 5 中研究了 Stewart 等人^[4] 提出的关井前进行井底生产测试的建议的有效性。历史拟合的结果表明，作为处理这些数据的结果， s_2 的估算有了某些改进。敏感性分析表明，对于 σ_{pr} 和 σ_q 的实际值，只有第 2 层的性质可以精确确定。大多数参数不能通过这类数据来很好确定。

表 4 油藏 1：仅有压力测量的压力恢复试井

1. 由历史拟合估算			
	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	300, 1000, 200, 100	200, 600, 150, 60	203.18, 601.8, 151.1, 58.82
s	2, -1.5, 10, 5	1, 1, 5, 1	-1.754, -1.976, 2.435, 3.495
C_s	0.03	0.01	0.00384
J		0.130E5	0.434E3

2. 敏感性分析

$n = 71, \quad m = 0 \quad \text{标称值} = \text{真实值}$
先 期 估 算 误 差

k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4	C_s
2.0	2.0	2.0	2.0	5.0	5.0	5.0	5.0	0.020

后 期 估 算 误 差

σ_q (桶/日)	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4	C_s
0.001	1.009	1.001	1.072	1.201	0.027	0.009	0.635	1.969	0.000
0.010	1.049	1.008	1.163	1.444	0.253	0.086	1.509	3.884	0.000
0.100	1.288	1.059	1.420	1.600	1.387	0.460	3.780	4.105	0.000
1.000	1.534	1.153	1.710	1.626	2.991	1.143	4.526	4.356	0.002

表 5 油藏 1：有关井前流动剖面测试的压力恢复试井

1. 由历史拟合估算			
	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	300, 1000, 200, 100	200, 600, 150, 60	199.7, 600.2, 149.06, 60.07
s	2, -1.5, 10, 5	1, 1, 5, 1	0.319, -0.389, 7.39, 0.299
C_s	0.03	0.01	0.0206
J		0.676 E7	0.589 E4

2. 敏感性分析

$n = 71$, $m = 39$ 标称值 = 真实值
先期估算误差

k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4	C_s
2.0	2.0	2.0	2.0	5.0	5.0	5.0	5.0	0.020

后期估算误差

σ_p	σ_q	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4	C_s
1.00	1.0	1.165	1.055	1.229	1.487	1.242	0.437	3.139	3.298	0.000
1.00	10.0	1.256	1.143	1.294	1.512	1.909	1.148	3.787	3.441	0.000
1.00	100.0	1.378	1.232	1.359	1.544	2.939	1.892	4.225	3.581	0.000
10.00	10.0	1.344	1.196	1.339	1.543	2.185	1.371	4.413	3.605	0.001
10.00	100.0	1.580	1.332	1.410	1.575	3.365	2.352	4.523	3.751	0.001

敏感性分析曾被用来观察一个略微有差别的问题：如果渗透率已知，那么生产剖面测试继之以压力恢复试验，能够提供表皮因数的良好估算值吗？回答是肯定的。这表明，对于这种有限的序列来讲，一个给定层的表皮因数误差能补偿渗透率的误差，并且两者都不能单一地确定。不管怎样，在地层渗透率由其它来源（例如与测井数据的相关曲线）已知的情况下，这样一种试井是有用的。

九、例2：无窜流的三个层

通过历史拟合一个三步骤生产测试得出的 2-N 油藏的地层参数的估算值列于表 6。地层参数是以极好的精度确定的。也列出了分段分析得出的估算值。对此油藏进行的敏感性分

表 6 油藏 2-N：三步骤生产测试

1. 由分段解释估算		
	“真 实” 值	估 算 值
k_x	100, 10, 30	70.0, 4.2, 29.8
s	10, -1.5	4.8, -3.6, 4.8

2. 由同时分析估算			
	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	100, 10, 30	50, 50, 50	109.2, 9.9, 29.4
s	10, -1.5	0, 0, 0	11.5, -1.0, 4.8
J	0.128E4	0.287E9	0.258 E3

表 7 油藏2-N的敏感性分析

$n = 0, m = 45$

标称值 = 真实值

先期估算误差						
k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	s_1	s_2	s_3	
2.000	2.000	2.000	5.000	5.000	5.000	
后 期 估 算 误 差						
$\sigma_q(\text{桶/日})$	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	s_1	s_2	s_3
1.0	1.008	1.001	1.004	0.139	0.006	0.038
10.0	1.081	1.013	1.037	1.334	0.058	0.382
100.0	1.296	1.105	1.299	4.370	0.422	2.768
估 算 值 的 后 期 交 叉 相 关 性 ($\sigma_q = 10.0$)						
$\sigma_q(\text{桶/日})$	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	s_1	s_2	s_3
k_{x1}	1.000	-0.159	-0.172	0.998	-0.492	-0.172
k_{x2}	-0.159	1.000	-0.852	-0.154	0.858	-0.842
k_{x3}	-0.172	-0.852	1.000	-0.181	-0.616	0.999
s_1	0.998	-0.154	-0.181	1.000	-0.505	-0.181
s_2	-0.492	0.858	-0.616	-0.505	1.000	-0.614
s_3	-0.172	-0.842	0.999	-0.181	-0.614	1.000

析（表 7）表明，当 $\sigma_q = 100$ 桶/日时，表皮因数由此数据不是很好确定的。值得指出的是，对列 k_{x2} 和 k_{x3} 以及 s_2 和 s_3 之间的交叉相关性是明显的，这意味着一个对列的误差可以被另外一个对列的误差所补偿。这说明，下面的两个层可以“并为”一个单层。

十、例3：有窜流的三个层

表 8 表明有严重窜流($k_z = k_x$)的 2-W 油藏的估算值。虽然数据的分段分析应用了没有垂直流动的单层模型，对层 1 和层 3 还是得到了良好的参数。这是因为当两个或更多的层由

表 8 油藏2-W：三步骤生产测试

1. 由分段解释估算		
	“真 实” 值	估 算 值
k_x	100, 10, 30	96.8, 3.3, 27.5
k_z	100, 10, 30	N/A
s	10, -1.5	9.1, -3.6, 4.5

2. 由同时分析估算

	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	100, 10, 30	50, 50, 50	95.33, 10.26, 30.28
k_z	100, 10, 30	5, 5, 5	9.92, 21.42, 20.96
s	10, -1, 5	0, 0, 0	9.29, -0.996, 5.07
J	0.266 E4	0.280 E9	0.198 E3

表 9 油藏2-W的敏感性分析
 $n = 0$, $m = 52$ 标称值 = 真实值

先 期 估 算 误 差									
k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{z1}	k_{z2}	k_{z3}	s_1	s_2	s_3	
2.0	2.0	2.0	10.0	10.0	10.0	5.0	5.0	5.0	
后 期 估 算 误 差									
$\sigma_q(\text{桶/日})$	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{z1}	k_{z2}	k_{z3}	s_1	s_2	s_3
1.0	1.014	1.007	1.022	5.088	1.155	2.092	0.187	0.011	0.171
10.0	1.063	1.050	1.073	9.730	1.641	8.576	1.010	0.078	0.666
100.0	1.275	1.359	1.314	9.943	5.550	9.861	4.025	0.590	2.877
估算的后期交叉相关性 ($\sigma_q = 10.0$)									
	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{z1}	k_{z2}	k_{z3}	s_1	s_2	s_3
k_{x1}	1.000	0.072	-0.616	0.154	0.035	-0.360	0.987	-0.065	-0.595
k_{x2}	0.072	1.000	-0.087	-0.123	-0.275	-0.319	0.135	0.851	0.010
k_{x3}	-0.616	-0.087	1.000	-0.156	-0.578	0.671	-0.531	-0.301	0.986
k_{z1}	0.154	-0.123	-0.156	1.000	-0.405	-0.032	0.118	-0.120	-0.126
k_{z2}	0.035	-0.275	-0.578	-0.405	1.000	-0.568	-0.078	0.054	-0.591
k_{z3}	-0.360	-0.319	0.671	-0.032	-0.568	1.000	-0.275	-0.350	0.555
s_1	0.987	0.135	-0.531	0.118	-0.078	-0.275	1.000	-0.059	-0.511
s_2	-0.065	0.851	-0.301	-0.120	0.054	-0.350	-0.059	1.000	-0.241
s_3	-0.595	0.010	0.986	-0.126	-0.591	0.555	-0.511	-0.241	1.000

于良好的垂向连通而在这—油藏中并为一个层时，造成了一个小的误差。应用窜流数值模型的同时分析对所有层给出了很好的 k_x 和 s 的估算值。 k_z 的估算值是可以的。但是，因为只有 k_z 的调和平均值在确定两层之间的流动中是重要的，这样的平均值必须在对比中应用。这种对比是很好的：估算的平均值 $\bar{k}_{z1,2} = 15.4$ 和 $\bar{k}_{z2,3} = 21.2$ 毫达西，而对比的真实值分别为14.3和14.2毫达西。交叉相关矩阵（表9）表明，在任何地层中垂直渗透率的估算与任何其它地层的性质没有密切的联系。

十一、例4：地层渗透率差异大的情况

表10表明了渗透率差异大的油藏3的估算值。这种情况说明两种解释方法的串联应用。分段分析提供了同时拟合的初始估算值。显然，同时分析大大地改进了除最低渗透层以外的所有地层的估算值。所示情况的线性敏感性分析见表11，表明第1层和第3层的表皮系数和渗透率用这些数据是不好确定的。同样， k_{x3} 和 s_3 的估算值表明，它们与 k_{x2} 和 s_2 的估算值有明显的相关性。

十二、错误参数值的影响

在表12中对油藏3的敏感性分析重复了两次，差别是用于每次线性化的标称参数值是不同的。表11和表12的对比表明，对于这些完全不同的标称值系列，可以得出很相似的结论，即当 σ_q 的实际值为100桶/日时所提出的试验可以很好地确定哪些参数。当流量是以更高的精度测量时，表12中的值给出一个更乐观的论据并且表示一个更小的后期误差。这表明关于不同参数分辨能力的结论，可以利用实际进行试验以前的先期估算值来做出。由敏感性分析中得出的结论对实际参数值的微弱依赖性，在分布系统的相反问题领域内是一种很普遍的现象^[6,7]。影

表 10 油藏3：四步骤生产测试

1. 由分段解释的估算		
	“真 实” 值	估 算 值
k_x	50, 1000, 10, 100	30.5, 639.0, 2.7, 105.0
s	10, 3, 5, -2	20.0, 1.1, 6.1, -1.88

2. 由同时分析的估算

	“真 实” 值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	50, 1000, 10, 100	30.5, 639.0, 2.7, 105.0	55.03, 974.82, 25.18, 99.95
s	10, 3, 5, -2	20.0, 1.1, 6.1, -1.88	13.65, 2.73, 20.0, -1.98
J	0.103 E5	0.273 E8	0.153 E4

表 11 油藏3的敏感性分析

$n = 0$, $m = 65$ 标称值 = 真实值

先 期 估 算 误 差							
k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
2.000	2.000	2.000	2.000	5.000	5.000	5.000	5.000

后期估算误差

σ_q (桶/日)	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
1.0	1.045	1.001	1.031	1.000	0.742	0.013	0.313	0.001
10.0	1.265	1.009	1.278	1.002	3.919	0.098	2.489	0.006
100.0	1.427	1.050	1.542	1.016	4.636	0.517	4.139	0.060

估算的后期相互关系($\sigma_q = 10.0$)

	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
k_{x1}	1.00	-0.376	0.001	0.014	0.992	-0.417	-0.001	0.031
k_{x2}	-0.376	1.000	-0.768	-0.115	-0.395	0.995	-0.736	-0.288
k_{x3}	0.001	-0.768	1.000	-0.115	-0.017	-0.736	0.994	-0.213
k_{x4}	0.014	-0.115	-0.115	1.000	0.031	-0.118	-0.072	0.500
s_1	0.992	-0.395	-0.017	0.031	1.000	-0.442	-0.021	0.070
s_2	-0.417	0.995	-0.736	-0.118	-0.442	1.000	-0.707	-0.294
s_3	-0.001	-0.736	0.994	-0.072	-0.021	-0.707	1.000	-0.265
s_4	0.031	-0.288	-0.213	0.500	0.070	-0.294	-0.265	1.000

表 12 油藏3: 用不同标称值序列的敏感性分析

标 称 值

k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
100.0	600.0	50.0	200.0	5.0	1.0	2.0	0.0

后期估算误差

σ_q (桶/日)	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
1.0	1.010	1.001	1.004	1.001	0.118	0.009	0.036	0.005
10.0	1.099	1.011	1.044	1.006	1.141	0.090	0.362	0.048
100.0	1.406	1.084	1.365	1.053	4.048	0.656	2.612	0.421

标 称 值

k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
100.0	2000.0	20.0	200.0	5.0	1.0	2.0	0.0

后期估算误差

σ_q (桶/日)	k_{x1}	k_{x2}	k_{x3}	k_{x4}	s_1	s_2	s_3	s_4
1.0	1.010	1.000	1.009	1.001	0.120	0.006	0.074	0.005
10.0	1.100	1.004	1.096	1.006	1.152	0.061	0.729	0.049
100.0	1.407	1.025	1.523	1.048	4.054	0.406	3.343	0.382

响线性分析结果的主要因素是问题的结构：模型（层数），未知参数，测量种类（许多不同深度的流量是否监测到）和测量计划（它们是否能在瞬变现象强的时候进行，等等）。因此，先期估算的线性敏感性分析，可以用来评价所提试验估算有关参数的潜力，并实际用来设计给定情况的试井方案。

十三、用不正确模型的解释

模型误差对估算的影响见表13。它表示油藏2-N的测量用一个无窜流的三层模型（即一个适合油藏2-N的模型）同时分析时得出的参数估算值。分段解释的估算值与在表8中的估算值是一致的。同时分析造成了误差显著的估算值。但是，J的终值是小的，它意味着一个好的历史拟合；没有征兆说明解释使用了不正确的模型。从其它来源的数据，如地质描述或在同一油藏或相似油藏的其它井上进行的试井，将显著地有助于解决这一问题。对这种情况进行的敏感性分析与对油藏2-N（表7）的分析是相同的。

十四、例5：在一口生产井上的试井

表14列出了在油藏3上进行4步骤试井的结果。该井曾以递减速率生产了400天。每步试验的时间是3小时。井底势能的数值和变化以及在每层上边的流量是在引起瞬变现象

表 13 油藏2-W：三步骤生产测试，模拟误差对解释的影响

用无窜流模型的同时分析			
	“真实”值	初始推测值	最终估算值
k_x	100, 10, 30	50, 50, 50	70.39, 15.64, 32.06
k_z	100, 10, 30	0, 0, 0	0, 0, 0
s	10, -1.5	0, 0, 0	5.5, 0.088, 6.27
J	0.722 E6	0.283 E9	0.410 E5

表 14 油藏3：生产400天后的四步骤生产测试

1. 由分段解释估算		
	“真实”值	估算值
k_x	50, 1000, 10, 100	1, 926, 5.6, 104
s	10, 3, 5, -2	10.5, 12.8, -1.0, -1.9

2. 由测量值与其变化趋势的偏离的同时分析估算

	“真 实”值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
k_x	50, 1000, 10, 100	1, 926, 5.6, 104	53.7, 978.4, 11.3, 99.6
s	10, 3, 5, -2	10.5, 12.8, -1.0, -1.9	10.36, 2.83, 6.68, -2
J	0.249 E4	0.695 E7	0.116 E4

3. 由同时分析估算在 $r = 2,000$ 英尺处的地层势能

	“真实”值	初 始 推 测 值	最 终 估 算 值
P	2542, 1303, 3953, 1468	1450, 1450, 1450, 1450	2558, 1288, 4004, 1465
J		0.192 E9	0.315 E5

前被记录下来。测量值与由 12 小时试验期间变化预测值的偏离值，用来历史拟合模型的响应，此模型初期是平衡的，处处势能为 0。在此模型中 5,000 英尺外半径处的势能保持固定在 0。通过拟合偏离值得到了分层渗透率和表皮因数的极好估算值。这些地层性质又用于第二个模型对绝对测量值进行历史拟合，并从而估算地层内距井底径向距离 2,000 英尺处的势能。在第二个模型中，油藏被假设为初期在稳定状态下生产，而在 2,000 英尺的外半径处每个层的势能保持常量。看来，这些常势能的估算值，与它们在表 14 中的“真实”值拟合得很好。在井底和在 R_e 处的势能能够适应于稳态流动模型，从而估算出在每个地层泄油面积内的平均压力。

十五、结 论

1. 为了确定多层油藏的地层表皮因数和渗透率，提出了一种包括井下压力和流量测试的多步骤压降试井方法。它还可以用于补充确定生产油藏的平均地层压力。这种试井实质上是具有专门测试计划的连续压降试井。

2. 提出了在上述试井期间收集的全套数据的同时分析方法。这种方法立足于用单井数值模型来历史拟合试井数据。给出了 4 个合成数据实例，其中之一具有明显的层间窜流。在大多数情况下得到了良好的参数估算值。

3. 将试井数据的同时分析与分段分析进行了对比，后一种分析应用褶积考虑井底流量的变化。同时分析以更大计算机耗时的代价提供了始终精确的估算值。

4. 进行了历史拟合方法的线性敏感性分析，并且在统计的意义上用来计算每个实例中参数估算值的预期误差。已经发现这些预期误差是估算值与其真实值的实际偏离值的低限。它们也提供了估算值非唯一性的标志。这是一个局部性的分析并且不能说明整体非唯一性的可能性。

5. 敏感性分析的结论仅仅微弱地依赖于用于线性化的实际参数值。因此，这样的分析可以事先用来评价提出的试验程序，并从而对给定的参数估算问题设计出“最佳的”试井方案。

6. 多层油藏的多步骤试井分析，只有在根据如裸眼测井和地质描述等辅助数据进行模型鉴别之后才能较好地完成。例如，单是试井数据不足以确定地层是否有窜流现象。

7. 已经指出, 多步骤试井也可以用于正开采的油藏。在此情况下数据的同时解释要完成两次。第一步, 应用叠加原理来消除未知的油藏压力并估算地层渗透率和表皮因数。第二步, 利用这些性质来估算各单层具体泄油面积内的平均流体压力。

符 号 说 明

- A — 敏感性矩阵;
 a_i — 目标函数中压力项的加权值;
 B_o — 流体的地层体积系数, 地面标准桶/地下桶;
 b_{ij} — 目标函数中流量项的加权值;
 C_i — 一井底续流系数, 地下桶/磅/英寸²;
 $E\{\cdot\}$ — 关于概率函数的任意变量的预期值;
 h_i — i 层的厚度, 英尺;
 J — 极小化的正标量目标函数;
 $k_{x,i}$ — i 层的水平渗透率, 毫达西;
 $k_{z,i}$ — i 层的垂直渗透率, 毫达西;
 P_i — 原始油藏势, 磅/英寸²;
 P_x° — $\vec{x}$ 的先期协方差矩阵;
 P_x — $\vec{x}$ 的后期协方差矩阵;
 $P_{wb}(t_i)$ — t_i 时的井底势, 磅/英寸²;
 $q_{wb}(t_i, h_j)$ — 在时间 t_i 和深度 h_j 的井底流量, 桶/日;
 R_e — 外泄油半径, 英尺;
 R_w — 井筒半径, 英尺;
 s_i — i 层的表皮因数;
 $\vec{x}$ — 估算参数向量;
 $\hat{\vec{x}}$ — $\vec{x}$ 的后期估算;
 $\vec{y}$ — 抽样测量的向量;
 $\delta(\cdot)$ — 在一变量或一向量中的小变化;
 μ — 流体粘度, 厘泊。

附录 1 敏感性分析的含意和假设

在解释结果时应当记住, 它们是线性近似分析的结果, 并从而只有当估算值是足够“靠近”线性近似的真实值时才是有效的。特别是敏感性分析不说明非线性 (Taylor级数展开的第二和更高次项) 效应可以导致参数估算的非唯一性的可能性; 也就是说两个或多个不同参数值系列可以与测量值达到一定精度的历史拟合。这类非唯一性将被称作完全的非唯一性。局部非唯一性是由它能够得出的主要结论。

同样强调的是, 上面的结论仅仅对于零值单纯随机误差是有效的。在任何实际情况下, 在决定把统计用于表中之前, 历史拟合误差必须加到测量误差上去。上述分析的零值要求, 通过历史拟合偏离值可能更难以满足, 因为它们通常有系统的变化趋势。在这些偏差值中某

些偏差是由于数值模型不能与实际情况的精确一致(“模拟误差”)引起的,并在更小程度上是由于数值解方法的固有误差造成的。这些偏差值的其余部分,可能是由于使用有限精度数值计算时任何一种极小化程序都不能找到一个非二次函数(J)在参数多维空间中的准确最小值。找到的最后的但不是最小的最小值,可能不是“真实的、全局中的”最小值,但可能是一个具有更大的J的残数、与在历史拟合中的更大误差相联系的局部最小值。但是,我们假定它不是此分析中的情况。

在缺乏零值残数历史拟合偏差值时,参数估算中的误差可能显著地大于由线性分析得出的误差。因此,必须把这种敏感性分析表明统计误差看作是实际试井资料历史拟合中可能得到的误差的下限。

参 考 文 献

1. Kucuk, F., Karakas, M., and Ayestaran, L.: "Well Test Analysis of Commingled Zones without Crossflow," paper SPE 13081 presented at 1984 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Sept. 16-19.
2. Tariq, S.M. and Ramey, H.J., Jr.: "Drawdown Behavior of a Well with Storage and Skin Effect Communicating with Layers of Different Radii and Other Characteristics," paper SPE 7453 presented at the 1978 Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Oct. 1-3.
3. Raghavan, R., Prijambodo, R., and Reynolds, A.C.: "Well Test Analysis for Wells Producing Layered Reservoirs with Crossflow," Soc. Pet. Eng. J. (June 1985) 407-418.
4. Stewart, G., Wittman, M.J., and Lefevre, D.: "Well Performance Analysis: A Synergetic Approach to Dynamic Reservoir Descriptions," J. Pet. Tech. (Jan. 1985) 143-152.
5. Meunier, D., Wittman, M.J., Stewart, G.: "Interpretation of Pressure Buildup Test Using In-Situ Measurement of Afterflow," paper SPE 11463 presented at the 1983 SPE Middle East Technical Conference, Manama, Bahrain, March 14-17.
6. Shah, P.C.: "Estimation of Properties in Petroleum Reservoirs," PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA (1976).
7. Shah, P.C., Gavalas, G.R. and Seinfeld, J.H.: "Error Analysis in History Matching: The Optimum Level of Parametrization," Soc. Pet. Eng. J. (June 1978) 219-228.
8. Sage, A.P. and Melissas, J.L.: Estimation Theory, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York (1971) 175.