

在计算机辅助下的试井分析

A.C.Gringarten
Scientific Software-Intercomp

童宪章 译
王波 校

摘 要

本文讨论计算机在试井分析工作中的应用。对现有的技术和商业性刊物进行普查后说明,直到目前为止,计算机在这方面的应用仅限于对手工解释过程的重演,或者是在把测得的数据和预先选定的模型互相拟合的基础上,进行产状参数的估算。换句话说,计算机仅被用来解决解释过程中最容易的一部分工作。而最困难的部分,例如,对可用的解释模型的鉴定以及分析结果的核实却都很少受到重视。其结果,计算机还不能帮助做实际工作的工程师们把解释工作做得更好一些;而它只是帮助他们把经常性的解释工作做得更快一些。

从理论上说来,鉴定能用于试井数据的解释模型是一项人工智能问题,需要配套的技能系统,它属于到目前为止尚未解决的一个问题。但是,正如在本文中所讨论的,有可能把系统方法论和图象配合应用方法结合起来,显著地提高一个普通解释人员的解释工作能力。

一、引 言

过去的五十年中,在石油工业系统,以不稳定压力分析作为主题的研究报告已发表400篇以上⁽¹⁾。地下水文学在这一专题方面完成了深广的工作,而土木工程在这方面完成的较少一些。这些年来,由于使用较好的计量设备,有可能提供更可靠的现场数据,因而发展了更精湛的解释方法。其结果又导致对油藏动态有了更好的理解。

在过去已发表的文献[2]中所描述的分析方法,大多是为使用铅笔和纸的人工操作设计的,最多再用上一个手持计算器而已。因此,即使把近二十年来所推出的所谓“近代”的或“样板曲线分析”方法都算上,试井分析工作的能力还是十分有限的。

手工操作一般不可能完成高度可靠的分析工作,特别是在遇到由于设计不完善而仅能取得不完全数据的时候。不幸的是,大多数情况却正是如此。其结果,很多非常有价值的有关井和油藏的信息(一般要花很大费用取得的)就无法从试井工作获得。这样就在石油工业中造成一种印象,与其他方法,例如与电测工作相比,试井工作不能提供必要的油藏信息。其结果是,在美国每年所钻的井中,使用试井方法求油藏信息的不到百分之一,而电测工作却是不可缺少的。

有些时候,在一些技术报告中曾提出一些在试井分析工作中应用计算机的例子。但是,

大多数应用计算机的方法只是着眼于重演手工操作或者使操作更为熟练，而不能在分析能力方面有所改进。另一方面，有些方法，其中包括把黑匣回归系统和一系列解释模型联用，可能产生恶性的错误结果。

本文的目的在于讨论在计算机辅助下的试井分析方法的优点和它的限制条件。在文中首先对试井程序加以描述以说明从试井数据可能获得的信息类型。其次对手工操作解释方法进行简介并探讨其局限性。然后讨论在解释过程中目前应用计算机的情况及其潜力并举例说明。本文的结论是，把计算机的应用和方法论结合起来用于试井解释，就可以把一个普通解释人员的工作能力提高到相当精湛的水平，而这一水平到目前为止，仅由少数专家加以垄断。

二、试井过程

进行试井工作的目的是为了获得所试的井和油藏的定量和定性的知识。和一些直接方法，例如流体取样和取岩心相比，它是一种间接的方法。试井所提供的是油藏动态信息，而那些直接方法却提供的是静态信息，对油藏动态预测工作说来，后者是不够的。

试井工作的内容是，对一口或数口井进行激动并在激动井和（或）邻井中观测所产生的影响。这是一种典型的信号分析问题^[4]，它可以用符号表示如下：

$$I \rightarrow S \rightarrow O$$

上式说明把一个已知的输入信号I施加于一个系统S时，会产生一个输出信号O，它表示的是这一系统的反应。

在试井工作中，输入信号一般是一口产油井关闭时，或是一口关闭井开井生产时所造成的产量变化，而输出信号则是在井底产生的相应的压力变化。造成产量变化信号的方法是在地面开关井口闸门，而在进行钻杆测试时是开关井底的测试凡尔。试井分析工作所关心的是产量变化要能构成具体的产状并且延续适当的时间，至于产生产量变化的方式则是无关紧要的。反过来，输入信号也可以是压力变化，而输出信号是产量的变化。

试井分析的目的是为了对一个未知的系统S进行鉴定和描述，这一系统所代表的就是井和油藏。

第一步工作是建立一个解释模型 Σ ，它的产状表现要求与实际的井和油藏系统S相似，也就是说，它所产生的输出信号和实际系统相比，应具有相同的定性的特征。这是一种所谓反求（或系统鉴别）问题，用符号表示如下：

$$\Sigma = O/I \approx S$$

对于这种反求问题的求解说来，它所包括的内容是一种鉴别过程，也就是一种图型辨认的过程，在这一过程中解释人员试图把流动系统的各个组成部分适当地连接或组合起来，以描述这一系统的产状。上述各个组成部分代表的是井壁影响、油藏本身性质以及边界影响，所有这些因素都假设存在于系统之中，而且它们的动态都是已知的和可以预测的。以常规试井分析中图型辨认为例，解释人员就是要找到一条假定能代表无限边界作用径向流动的半对数直线段；如果在这条直线后面紧跟着出现第二个半对数直线段，而且它的斜率等于第一线段斜率的二倍，就可以认为有一个封闭的断层存在^[5]。与此相似，在样板曲线分析中，解释人员就要找寻一些斜率分别为1.0、0.5或0.25的早期双对数直线段，它们分别代表的是井筒储

存影响^[3]，一条具有无限导能的裂缝^[6]，或者是一条通过井眼的有限导能裂缝^[7]。在这一资料以后一段时间中接着出现的一种特型曲线，则显示的是半对数径向流动的压力变化动态。

一旦把解释模型加以确认并把相应的组成部分组合好了以后，下一步工作就是如何计算油藏参数了。为了达到这一目的，就要用各种方法来调整模型参数，以获得一个输出信号 Ω ，它必须定量地（允许有一些误差）和实际系统所提供的信号一致。这是一种众所周知的正求（或称卷积方法）问题，用符号表示如下：

$$\Omega = I = \Sigma \approx 0$$

经过校正的有关解释模型 Σ 的参数就被假定为代表实际系统 S 的参数。

最后必须要做的事就是对解释结果的核实。与正求问题（对一个给定系统 Σ 的解答 Ω 总是唯一的）相反，这种反求问题一般不能给出唯一性的解答。可能发现有好几种不同的解释模型 Σ_i 都具有和实际系统 S 相似的动态表现。可以用符号表示如下：

$$I = \Sigma_1 \approx I = \Sigma_2 \approx I = \Sigma_3 \approx 0$$

特别要注意的是，在前面所描述的综合过程中，应用不同的流动体系组成部分所构成的各种综合体，在一定的分析数据范围之内，对于相同的输入信号可能产生相当一致的输出信号（例如，在一定的试井过程中，一个处于无限作用阶段的双重孔隙油藏的动态表现，可能看起来和一个单一孔隙而有一个封闭断层的油藏表现相同）。但是，如超出分析所用数据范围之外时（一般在单一的压力恢复情况下），输出结果就会大不相同。换句话说，不管用的是“常规”还是“近代”的解释方法，都不能保证解释的结果对全部试井过程都是有效的。因而有必要应用所有能够得到的数据，对于通过鉴定过程所得到的解释模型进行检验。

三、从试井分析所获得的信息

现在看起来，对于从试井数据可能现实地获得那种类型的信息问题，在认识上存在很大的混乱状况。

一方面，从已经发表的有关试井文献中所提出的大量的、具有复杂地质情况的理论模型来判断，可以明显看出，有一些人所抱的希望是，只要能够提供高分辨率的产量和压力计量数据，就能从试井分析结果作出和电测解释所得结果相类似的详细的油藏描述。

另一方面，有一些专业人员观察到的情况是，好多实际的、看来很复杂的系统，在动态上确实和一些简单得多的理想系统很相似^[1,4]，并且，看来所测得的压力/时间数据并不具有易于辨明的象地质学家和电测解释人员所描述的那些有关油藏非均质的信息。这一种看法曾经通过对全世界很多不同油藏的试井资料进行系统的分析而加以证实，它也说明在一次试井工作中可能发生的不同动态表现，在数量上是很有限制的^[4]。

实践和理论之间的差别，来自于试井分析所描述的是油藏动态而不是地质状态这样一个事实。此外，由于试井工作过程的特性，油藏系统的作用相当于位于输入和输出信号当中的一个过滤器^[8]。其结果是，系统所给出的反应只能反映不同构成部分的宏观对比。

特别要注意的是，试井资料说明在油藏的生产过程中，包括有那几种具有显著不同渗透率和孔隙度的介质在起作用。在实践中，输出信号的分辨能力最多只限于二到三种介质的信息。

从一个单一渗透率系统所能获得的反应是最简单的，它判定的是一个具有均质动态表现的油藏。在这里，“均质”这一名词并不意味着象数学推导中所表现的那种全面的均质。它说明的是，在油藏内参与流动过程的只有一种介质（见图1a），而且在试井工作中所测定的渗透率只相当于用岩心分析资料描述的同样渗透率的系统^[4]。所得出的渗透率的数值可能有所不同，这是因为测量条件不同而造成的。

当两种或更多的不同介质参加了流动过程时，就会出现非均质动态表现。在这种情况下，在试井工作中所测定的渗透率和从岩心测定的渗透率就会有所不同，因为它们代表的是不同的介质^[4]。所观察的非均质动态表现的类型取决于各种介质之间的相互作用。有一种非均质动态的例子是双重孔隙介质的动态（见图1b），这种动态发生在低渗透介质为高渗透介质供液的情况下，而且只有后者才能对井供给液流（从参考文献[9]可得到有关本题的参考目录）。另外一种例子是双重渗透率的动态表现（见图1c），它和双重孔隙情况的不同点在于，每一组成介质对井具有不同的供给能力^[4,10]。

如果有可能从试井资料辨明油藏具有非均质动态表现的话，在一般情况下不可能确定不同介质组成部分在油藏中的分布状况。它们既可能是均匀分布，也可能是分隔状分布。例如，一种裂缝油藏和另一种具有强烈渗透率对比的多层油藏会呈现相同的双重孔隙率的动态表现。这样就只能从模型参数值方面分别适用的模型，当然还可以从地质资料加以判别。

压力和产量的测试是一种传导性过程，它同样也存在有这些局限性。在一个包括有十个小层的油藏中，在压力和产量的信号中不具备足够的信息来辨明每一个小层的性质。事实上，只能求得最高渗透率层的性质，并且确定是否存在有其他小层向该层补给流体的情况。为了要获得更详细的信息，就必须采用不同的测试方法，这些方法具有不同性质的输入和输出信号。例如示踪剂测试，它是一种流体对流过程，可以分辨出油藏中每一个小层，并且提供它们各自的渗透率资料^[11]。但是示踪剂测试不能说明这些不同的渗透率是怎样分布的：首先发现的看来是最高渗透率层，其次发现的是次高渗透率层，以此类推。各个小层的实际分布状况则必须从生产测试获得。

四、手工解释方法

在本文开头曾讨论过，全部的试井解释过程，和所有的信号分析问题一样，都必须包括三个互相衔接的过程如下：

- （1）解释模型的确认；
- （2）模型参数的计算；
- （3）解释模型的验证。

很明显，最重要的一步是确认出最适当的解释模型。对于可供使用的各种解释方法说来，它们之间的显著差异就在于能够成功地完成这一步骤的能力。

在目前石油工业中广泛应用的有两种手工和用曲线图表示的试井分析方法。一种被称为“常规法”，这类方法的基础是：把某种压力函数随时间函数的关系绘制成一幅特定曲线图时，存在有一个直线段，它预先被认为在试井阶段中某一特定流态阶段中出现。另一类方法通称为“样板曲线分析法”，这类方法的内容是把一定流动阶段中所有的测试数据和一条代表适当的解释模型的样板曲线进行拟合。

1. 常规试井分析

在本文中,所规定的常规试井分析的定义超出了一般公认的、用半对数分析法计算渗透率 and 井壁阻力的工作范围,这里的含义包括了任何以直线段存在为基础的各种分析方法。

“常规分析法”的主要优点在于,只要是在所研究的流动阶段以前所用的产量次数是有限的,这种方法就简便易行,需要很少的计算工作量。这就是为什么它一直被广泛地应用的原因;尽管它有缺点,而且还存在有其他可供使用的更为有效的解释方法。

假定和某一特定曲线段相适应的流动状态已经出现,并且得到全面发展,同时还假定所分析的流动阶段相当于油藏压力达到全面稳定后的第一次生产段,那么下述各种曲线图中都会出现直线段:在无限作用径向流动阶段绘制 ΔP 随 $\lg \Delta t$ 的曲线^[12];在井筒续流控制流动阶段绘制 ΔP 和 Δt 的曲线^[3];在封闭性边界控制流动阶段绘制 ΔP 和 Δt 的曲线^[13];在线性流动阶段(不论是由于一条无限导能裂缝^[14,15]造成的,还是由于两个平行断层造成的^[16])绘制 ΔP 与 $\sqrt{\Delta t}$ 的曲线;在双重线性流动阶段(在有限导能裂缝中出现)绘制 ΔP 和 $\sqrt{\Delta t}$ 的曲线^[7];还有在一些油藏里由于部分钻穿产层而形成球形流动状态时绘制 ΔP 与 $1/\sqrt{\Delta t}$ 的曲线^[17]。

因为非均质动态表现涉及到一种以上的介质,在一条特定曲线上就可能出现几条直线段,每一条代表一种和各自流动状态相适应的介质。众所周知的一个最好的例子就是双重孔隙率的状态,从理论上说来,当孔隙介质间存在有限窜流状态^[16]时(所谓“准稳定孔隙介质窜流”的状态),就会出现两条平行直线段;有时甚至出现三条直线段^[19],其中有两相互平行,另一条当中的具有一半的斜率值^[20-22],这种状况出现于无限的孔隙介质窜流状态(所谓“不稳定孔隙介质窜流”的状态)。

一旦确认了和一定的流动状态相对应的直线段以后,就可以有相当把握地对这一段前后的流动状态进行判断(见图2)。从事实际工作的工程师们不一定都认识到常规法有一个基本弱点,就是为一个特定流动状态确认出一条合适直线段的无把握性。在文献中曾多次指出^[3,6,23-25,26],在一段数据中找到的一条似是而非的直线段不一定能证实一种特定流动状态的存在,而且仅根据一条直线段的存在所作出的分析可能导致完全错误的结果。这样也可能犯了代价很大的错误,例如有可能由于对一次钻杆测试结果错误地判断为油藏衰减,因而报废了一口好井。图3就说明这样一个状况。在一次探井测试工作中,连续测了三次压力恢复曲线,把似是而非的半对数直线段引伸后显示为压力下降。以后证实,图3中的一些直线段并不相当于半对数径向流动,并且没有解释意义。

在另一方面,即使没有出现相应的直线段,而某一种特定的流动状态却可能存在,这是由于受到了另一种同时发生的流动状态的影响。这种现象在双重孔隙介质动态状况下经常发生,在实践中较多发现代表全部系统动态的单一直线段,而见不到由理论所推出的两条或三条直线,这是由于井筒储存影响所造成的。由于这种原因,直到最近能够应用较先进的分析方法以前,应用常规分析方法很难判明双重孔隙率的动态,在大部分情况下就把它忽略了^[19,27]。

还有更进一步的问题。如果所分析的流动阶段并不相当于在油藏压力达到全面稳定后的最初阶段,而仅相当于多次产量试井过程中的一部分,那么问题就变得更为复杂:上面所描述的曲线图的时间函数就变得更复杂化,即使在测试过程中某一相应的流动状态已经全面发生,而直线段却不一定存在,这要取决于试井程序如何而定。一个典型的例子是,当使用

MDH曲线绘制方法 (P或 ΔP 与 $\log \Delta t$ 曲线^[12])时,它所显示的直线段^[28]要比用Horner法曲线 (P与 $\log[(t_p + \Delta t)/\Delta t]$ 曲线^[5])所显示的会短一些。

由于缺乏有效的手段来验证分析结果,这样便增大了用常规法产生错误的风险性;唯一可用的检验程序是对试井各个生产阶段进行相同的分析,并且核对在各个状况下所得出的相同参数的结果是否相同(主要的是渗透率;由于多相流动或油藏衰减等原因,井壁阻力和油藏压力在不同试井阶段可能有所变化)。

使用常规方法还有一个局限性,就是当所研究的流动系统状态缺少数据时它便不能应用,在探井测试时经常遇到的情况是在试井作业进行以前对油藏了解得很少。这是一个严重的缺点,它会浪费了花费很大代价得来的很有意义而具有高度重要性的数据资料。

2. 样板曲线分析

在石油文献^[3]中介绍了“近代的”或“样板曲线”分析方法,其目的是为了克服常规方法的局限性。最初的目的是在一幅半对数的曲线图上判别出一个正确的表现无限作用径向流动的直线段,同时允许在这一直线段尚未出现时可以对试井数据进行分析。

一条样板曲线表现的是一种特定的解释模型处于一种单一流动阶段的压力变化动态。成组的样板曲线图常绘制在双对数坐标纸上。在成组的样板曲线图中绘制的是无量纲压力随无量纲时间的变化,每一条曲线的特征表现为一个或更多的无量纲系数,这要取决于特定的解释模型。无量纲参数被定义为一个真实参数(例如 ΔP 或 Δt)和一组油藏特征数值的乘积。

为了进行样板曲线分析,采用和样板曲线相同的坐标比例尺,在双对数坐标纸上绘出在指定生产阶段中压力的变化 ΔP 与 Δt 的关系曲线。绘制双对数曲线图的优越性在于,各种不同的流动状态都能显示出易于识别的特点。根据所绘曲线各部分的辨别结果,可以有利于判断对该次试井工作适合的解释模型。举一个例子,在曲线的早期由于井筒储存的影响会出现一条斜率为1的双对数直线段^[3],而一个具有无限导能的裂缝则会导致一条斜率为1/2的直线段^[6],一个具有有限导能的裂缝却会导致一条斜率为1/4的直线段^[7]。无限作用径向流动、准稳定状态流动和非均质油藏动态都各自表现为独特的双对数曲线形态^[4]。

如果所应用的解释模型是正确的,则实际的和理论的压力随时间变化曲线会具有相同的形状,但是彼此之间有相对位移。在压力和时间坐标轴上相对的移动量分别构成压力拟合和时间拟合。应用这两种拟合和相应的曲线拟合,计算出所有的油藏信息,这就是从这一解释模型所能获得的信息。但是,对于一种给定的解释模型说来,不是所有的样板曲线都是等同的,这一点曾经造成对样板曲线分析法的真实能力有很多误解。基本上说来,只有在用某些独立变数来表示样板曲线时,才能使试井数据和代表一个适用解释模型的样板曲线获得唯一性的拟合结果:例如 P_D 随 t_D/C_D 和 $C_D e^{2S}$ 变化的曲线^[29]和 P_D 随 t_D 变化的曲线互相对应, C_D 和 S ^[30]表现的是均质无限边界油藏中一口井具有井筒储存和井壁阻力的情况。因此,根据这些独立变数的组合情况,在一种特定的数据变化范围内,某一特殊类型的样板曲线使用起来可能更方便一些(参看参考文献[7]中关于有限导能垂直裂缝样板曲线的不同表现形式)。

从另一方面说来,如果样板曲线不是用独立参变数表现的话,那么就有可能把试井数据与对应着不同的无量纲模型参数的几条曲线拟合,结果会估算出大不相同的油藏参数:这种情况曾使早期的一些工作人员抱怨样板曲线方法的本身,而不认为是所使用的特种样板曲线所造成的,其结果使“常规”和“近代”两种方法之间发生矛盾,一直持续了15年仍未消除。

和常规分析方法相比, 样板曲线拟合法有一个特殊的优点, 它允许对解释模型的一致性作出高水平的验证。譬如说, 在双对数曲线图上认定存在的一种流动状态, 可以 (并且应当) 在相应的常规分析曲线图上得到证实。例如, 如果存在有井筒贮存影响的话, 在双对数曲线上斜率为 1 的直线段上所排列的全部数据点, 在一幅直角坐标图中, 必然也会排列在一条通过原点的、 ΔP 随 Δt 变化的直线段上, 反过来情况也是一样。同样的情况适用于所有的各种流动状态。进一步说, 从常规分析法得出的各项与流动状态相关的特定参数值, 在一定的允许误差范围内, 都必须和用样板曲线法所算出的同类参数值完全相同。举例而言, 在能够应用 Horner 法时, 从双对数分析法所得出的 kh 值和用 Horner 法所得结果的差异不得超过 10%。事实上, 这一规定考虑到拟合方法本身; 因为样板曲线拟合是一种二维的操作过程, 有时很难拟合得很好, 特别是在非均质动态表现的情况下。因而在开始进行分析时, 首先作一个初始的粗略拟合, 确定出可能应用 Horner 分析法的范围。然后根据 Horner 半对数直线计算出压力拟合值, 用它来定出试井数据和理论样板曲线压力坐标轴的相对位置。最后一步拟合工作只需要把数据点沿着时间坐标轴移动, 调整好时间拟合就行了。

样板曲线分析法主要的局限性出现于把它用于手工操作过程的时候。已经发表的样板曲线在数量上很有限, 它们不能包括在实际工作中可能遇到的各种井壁影响、油藏动态以及外部边界条件的多种组合情况。尽管在有些方法中提出如何在已发表的样板曲线^[32,33]中加入一些边界条件, 或者调整内部及外部的各种影响, 但是如果这一系统非常复杂的话, 用手工处理的程序一般就非常繁琐。其结果, 用图解的样板曲线方法有时可能只能提供定性的分析结果。

还有一点, 为了工作简化的原故, 大多数已发表的样板曲线的有效范围只适用于一个油藏在压力达到全面稳定后的第一生产阶段 (压力降落曲线)。为了要拟合后面接替的生产阶段或压力恢复阶段的试井数据, 必须要用多次产量的样板曲线^[29,34], 而这些曲线又必须要符合所试生产阶段以前的实际产量变化过程才行。这一种数据只能和压力降落样板曲线的早期部分拟合^[3], 这样就会使解释模型的确定和样板曲线拟合工作变得十分困难。同样类型的问题会发生在这样的场合, 就是当解释模型复杂到不可能用样板曲线来确切地表现模型独立变数的函数的时候。双重孔隙介质样板曲线^[19]就是一个例子。它表现的是两组曲线的组合, 这两组曲线分别代表的是实际油藏的单独部分的孔隙动态, 它们可以用来依次和实际数据拟合 (见图 4)。

图解样板曲线拟合法的另一种局限性在于双对数表现方式在分辨能力方面的缺陷, 特别是在非均质动态分析中表现更为明显。例如, 把图 3 中的数据绘成双对数曲线 (图 5) 时, 看起来好象和在图 3 中所选定的直线段是符合的, 但在后面证实, 实际上是不正确的。这种低的双对数分辨能力, 再加上已发表的样板曲线能够应用的数量限制, 其结果可能使得样板曲线拟合方法变得很困难, 在某些情况下甚至可能造成错误的结果。

最后一点, 经验证明, 和早期所希望的^[23]相反, 单独使用样板曲线方法时, 如果在所研究的流动阶段未能达到无限作用径向流动状态, 则从试井数据不能获得一个唯一的解释结果 (见图 6)。在后面的章节里还要讨论到, 在数据不够完全的情况下, 要想应用样板曲线完成解释工作, 必须得到其他方法的辅助, 而这些方法仅能用计算机完成。

五、在试井解释工作中计算机的应用

计算机辅助试井分析工作的最终目的应该是：允许一个具有很少试井解释理论知识的工程师在最短的时间内，对于任何困难的试井工作能够完成专家水平的解释。要做到这一点的要求如下：

(1) 加强参加工作的工程师的解释工作能力；

(2) 改进工程师完成试井分析作业的能力。

尽管作业能力这一项是重要的，但是它的经济效果和加强解释工作能力的经济效果相比，却要差好几个数量级。对于一个公司说来，把一项解释工作做得快一些，有可能节约几千美元；但是如果由于一次试井解释错误而作出一次错误的决策，则所造成的损失将是数百万美元。

说起手工解释方法来，看来如果想要改进从事这项工作的工程师的分析能力，必须要改进以下几个工作领域中的能力：

(1) 鉴定解释模型；

(2) 验证解释结果；

(3) 对“不完善”试井工作的解释能力。

为了要改进作业工作能力则需要包括以下三个解释步骤：

(1) 数据准备工作；

(2) 数据解释工作；

(3) 提出成果。

对于有关试井分析中计算机应用的文章以及这方面能够得到的软件包所进行的调查表明，计算机化的分析方法有以下三种主要途径：

(1) 手工操作的重演；

(2) 黑匣式回归分析；

(3) 真实“计算机辅助”分析。

这些都将在下面进行讨论。

1. 手工操作的重演

最简单和最普遍的，是应用计算机重复手工操作的“常规的”或是“现代的”图解方法，不过在很多情况下能对更多的实际试井历史资料加以考虑。

这种方法的最粗略的方式，最初是为成批处理试井资料而推出的，计算机的程序包括读出压力和产量信息，并且制备出所用分析方法需要的全套图幅的硬拷贝。典型的例子包括常规分析法中的Horner曲线或叠加函数曲线，以及样板曲线分析法中的双对数曲线。在实际分析过程中，用手工方法通过解释人员所选定的一些点子作出一条直线；把双对数数据和某一种已发表的样板曲线进行手工拟合；或者是把已发表的样板曲线根据实际生产历史进行校正并用计算机程序绘出曲线，再和实际数据拟合。以后的计算工作用手工作业完成或者需要把解释人员提供的手工操作成果进行计算机处理然后完成。

人机交互处理对这一方法有所改进，至少对于常规分析是如此，它使得解释人员观察了相应曲线在监视器上显示图象以后输入直线段的起点和终点。然后由计算机自动处理计算工作。改善这种样板曲线分析法需要应用人机交互图象处理法，用这种方法可以操作计算机键

盘上的箭头键或一种“鼠标”形成压力数据点和样板曲线的相对运动，直到工作人员对拟合结果满意为止。

上面所描述的方法只不过是减轻解释人员在资料准备和计算处理方面的日常负担来解决工作效率问题。它可以使解释人员加快完成分析工作，而不管分析结果是否正确。它并不能改进解释人员的分析能力，它却保留了前面所讨论过的，包括“常规的”或“现代的”手工分析方法的全部缺点。

但是，在使用上述方法时，应用双对数分析法来判断可用的解释模型时，可以通过一种手段来显著地提高判别能力，达到这一目的的方法是绘制压力导数随试井时间变化的双对数曲线，在最近一些刊物^[27,35,36]中都推荐了这一方法。针对多次产量试井的一个给定流动阶段而言，这时需要用的是压力 P 或压差 ΔP 在直角坐标系统对叠加时间函数 S_t 的导数 dp/dS_t 。在简单的压力恢复情况下，所取的是对Horner时间自然对数的导数 $dp/d\ln[(t_p + \Delta t)/\Delta t]$ 。如果是油藏压力达到全面稳定后第一次生产的情况，那么所取的就是对经过时间自然对数的导数值 $\ln(\Delta t)$ 。

应用导数值的好处在于，它使得在给定的流动阶段中出现各种不同流动状态的曲线形状差异被放大了，这样一来就加强了解释人员的判断能力。特别是，以叠加函数为基础的双对数曲线导数可以显示出一个极大值，一个极小值，一个稳定段，还有一个上翘或下垂的趋势段（见图7）。极大值是在曲线的早期发现的，它说明有井筒储存和井壁阻力的存在；极大值越大，井的完善性越差（如果没有极大值，则说明井是超完善的）。在极大值出现后接着一个稳定段反映的是半对数径向流动状态，相当于半对数Horner法曲线的Horner直线段。一个极小值的出现说明有非均质动态表现，极小值曲线段不同的形状表现的是不同的非均质动态状况。在曲线末端出现的上翘趋势后面经常又接着一个稳定段，表现的是一种半无限作用油藏，它的后期稳定段代表的是无限作用半对数径向流动状态的多次稳定段。稳定段出现的次数代表的是为了模拟这一试井边界影响所需要的镜像井数。在导数资料中出现的下垂趋势表示的是封闭性油藏（如果情况发生在油藏压力达到全面稳定后的第一次生产的时候，则所得的不是一个下垂趋势，而是一条斜率为1的渐近线）。

作为一个例子，用图3中的数据求得的导数资料清楚地表明，在图3中看起来好像是直线的部分并不相当于半对数径向流动状态（见图8）。在相应的数据点的位置导数曲线显示出一个极小值，它反应的是双重孔隙介质动态的过渡阶段。在图9中表明，在三次连续的压力恢复试验中所出现的正确Horner直线段都是相同的，所表示的是一个无限作用的、未衰减的油藏。

这种导数方法并非新创，曾经有人建议使用以经过时间为基础的双对数导数 $dp/d(\Delta t)$ 代替常规分析法，以解决干扰试井^[37]、被两个平行断层包围的油藏的试井^[38]，以及压裂井的试井等问题^[39]。应用以经过时间的自然对数为基础的导数值 $dp/d(\ln \Delta t)$ ，在半对数径向流动状态下得到一个稳定段，这一优点曾被用来描述非均质的油藏^[8]。但是，这种导数方法的实用性和能力只是在发表了以独立变数表现的导数样板曲线用于均质^[29]和非均质模型^[19]以后才被人们认识到。

尽管压力数据的导数可以用手工的方法求得，例如在Horner曲线图上为每一个点作出切线，并且算出相应的斜率值，但在实际工作中，求导数的过程总是通过应用适当的导数计算公式，用计算机来完成^[36,40]的，这样做可以消除数据中不能应用的“噪音”部分。然后

把打印出的样板曲线用手工完成样板曲线拟合, 或者在监视屏幕上直接进行拟合。

上面所讨论的图解样板曲线拟合方法也还存在有一定的局限性, 尽管在程度上不算很大。举例而言, 对叠加时间函数所求出的导数曲线, 虽然保存了和半对数径向流动相应的稳定段, 但是在复杂的产量历史情况下, 却会使极大和极小值的真实形状产生显著的变化(参看图10)。其结果, 当工作人员把稳定段导数曲线段和导数样板曲线拟合时, 在选定压力拟合点和计算 kh 值时, 就会有些分辨不清, 特别是在非均质动态情况下, 在选择其他拟合参数时有弄错的危险, 因而会得出错误的结果。更进一步说, 如果稳定曲线段没有出现(可能由于这一特殊流动阶段长度不够, 或是由于非均质或边界的干扰, 使平稳段未能出现), 应用压力导数进行图形拟合可能很难达到一定程度的可靠性。在双重孔隙率动态情况下, 如果由于裂缝控制的半对数流动段所导致的平稳段没有出现, 也会发生相同的情况。

2. 黑匣式回归法

另一种情况是把计算机用于自动分析。最近15年来有一些作者们^[26,41-50]探索了这一可能性。大多数自动化分析程序包括有以下几个特点:

(1) 针对给定的一组井和油藏性质以及有限的几种解释模型, 具有计算压力变化过程的能力;

(2) 比较计算的和观测的油井动态的能力, 并且对计算井的产状所用的井和油藏参数加以调整, 直到获得满意的拟合为止。

自动化解释系统的工作方式是: 在给定的解释模型条件下, 井和油藏参数的最优估算结果应该使得观察值 P_i , 观察和解释模型反应值 $P_{i, \text{计算}}$, 之间的方差之和为最小, 用式表示如下:

$$E(\beta_{j=1-m}) = \sum_{i=1-n} [P_i, \text{观察} - P_{i, \text{计算}}(\beta_{j=1-m})]$$

上式中的 n 是观测的次数, m 是解释模型中未知的井和油藏参数 $\beta(j)$ 的数目。 E 被称为目标函数。这样一来就变成了一个最优化问题^[51,52]。因为代表解释模型反应值的函数 P_i , 计算一般对井和油藏参数而言是非线性的, 这就需要一种非线性的回归计算方法。在石油文献中曾经试用过的一系列回归算法, 包括有: 最陡坡降法 (Steepest descent)^[41,44,45,50], 高斯法^[48,50]和经过Marquart修正的方法(也被称为Lerenberg—Marquart算法)^[26,47-50], 牛顿法^[44,46,50], 还有经过Green-stadt修正过的牛顿法^[50]。

虽然自动化历史拟合的概念方法非常引人注意, 但它的实际应用过程并不那么直截了当, 而需要解释人员加以适当注意。即使所应用的解释模型是正确的, 要想获得正确的模型参数有时还有不少困难, 这要看所用的回归算法而定。举例而言, 最陡坡降法要求所估算的参数有一个好的最初猜测数值^[41,45]。这种方法除了会缓慢收敛^[44,50]而外, 还有可能收敛成和所要估算的井和油藏参数的正确数值不相适应的最小目标函数^[44,45]。高斯法对最初猜测值也很敏感, 并且会缓慢收敛, 如果最初猜测值和真实解答相差太远, 有时甚至发生不收敛情况^[46,50]。但是这类问题可以通过罚函数 (Penalty function) 的应用或对参数施加约束而得到缓和^[48]。经过Marquart修正的方法, 可以改善收敛情况^[48,50], 但如果最初猜测值和真实数值相差太远, 或者过多的未知参数定值不佳(就是说, 当目标函数保持很小的情况下它们的变化范围很大)^[48,50], 仍然会缓慢收敛。如果最初猜测值和真实解答接近, 则牛顿法总是会收敛的, 否则就总是发散的。而且, 求解出的收敛稳定数值不一定是最小值^[44,50]。另一方面, 牛顿—Green Stadt方法一般看来好象很有活力, 并且它对于不影响模型(用于

拟合数据的解释模型) 动态的一些参数不敏感^[50]。

对于所有的以估测为基础的解释系统说来, 一个基本的假设是要有一个能和数据拟合的适用的解释模型。这意味着参数估算结果的可靠性取决于解释模型的可靠性。那么一个先决条件就是要正确地选定解释模型。

在已发表的有关自动化试井解释的文献中还没有提出能满意地达到上述目的的方法。通用的工作程序是, 首先选择一个简单的解释模型, 一般仅限于一口位于均质无限边界油藏中的线源井。如果不能成功地把这口井的观测的和计算的动态拟合好, 那就施加内外边界的影响来增加模型的复杂性。

但是对拟合工作质量的评价一般要依靠“工程判断”^[42, 43]。虽然有人建议采用协方差系数来解决^[44], 但是最通常用来作为估算精度评价准则的还是图象观察的方法^[42, 46, 47]。在一种多次产量试井工作中, 如果只对压力进行检查(事实常是如此), 有可能导致严重错误的结果^[41-50]。在试井工作中应用每一个流动阶段的压力导数来对比观测的和计算的动态时, 采用“印象”拟合的方法常常是不成功的^[26]。

对于一般通常使用的自动化分析方法说来, 有一种难免的危险在于, 可能导致把数据勉强地和一个不合适的模型进行拟合。这样会得到一个错误的解释结果, 而又不会被一个只有一般水平的解释人员发觉。特别是当测试工作不充分或不完全的时候这种危险性更大。在非均质油藏的试井工作中这种勉强拟合的情况也会发生, 其结果可能和一个封闭的均质油藏达成压力拟合。例如, 当一个油藏由于压力低于饱和压力而使得井的参数发生剧烈变化时, 在试井时进行压力历史拟合就很可能发生上述情况。

对于有经验的试井解释人员说来, 由于需要“工程判断”这一工序, 就基本上限制了自动化解释法的应用, 因而也就不能完成这一方法的主要目的, 那就是减少解释结果的主观性。因为这种方法给人一种易于使用的假象, 如果不能借助于有效的模型选定和检验程序的话, 自动化解释方法在一个不精炼的使用者手中可能成为一个危险的手段。

3. 计算机辅助分析法

在前面的讨论中曾经指出, 为了有效地加强解释能力, 就需要有一套逻辑系统来指导有关模型选定、模型落实和参数估算一系列步骤中的信息流通问题。为了提高工作效率可以采用人机交互图象处理方法来加快解释过程中每一步的处理速度。有关这一系统的特点将在下面加以说明。

这一系统的总的概念是: 解释程序首先从解释模型的选定开始。一旦选定了解释模型, 就要对解释模型的各种性质进行落实, 以检查解释成果的一致性。如果数据和模型的性质得到证实, 则分析结果是一致的, 而解释模型是可靠的。如果数据和模型的某一单项性质之间发生抵触情况, 则分析结果是不一致的, 而解释模型不适用于所分析的数据。

4. 解释模型的鉴定

解释模型的鉴定工作, 最好通过用人眼观察显示在图象监视器上面的双对数曲线的形状来完成, 曲线表现的是压力和压力导数随经过时间的变化。如前面所讨论过的, 压力导数可能是目前可利用的各种诊断手段中最好的一种。它能够把所研究的流动阶段中不同时间起主要控制作用的流动状态强烈地显示出来, 并且使人易于识别解释模型的各个组成部分。举一个例, 在图11中所表现的一条导数曲线的形态, 有一个不高的极大值, 没有极小值, 有一个平稳段, 可以判断这是一个位于均质无限边界油藏中带有井筒储存影响的一口轻微不完善

井。

压力导数也可以用来计算压力和时间的拟合结果,而无需采用样板曲线,这样一来就可以避免伴随着样板曲线拟合法的一般问题。在这里,压力拟合PM值被定义为无量纲压力变化对实际压力的比值($P_D/\Delta P$)或压力导数对相应实值的比值。同样情况,时间拟合TM值,被定义为针对所分析的特定样板曲线上无量纲经过时间对相应的实际时间的比值($t_D/\Delta t$)。根据和无限作用半对数径向流稳定状态的导数值 $\Delta P_{\text{拟合}}$ (图11),可以很方便地得到压力拟合值,它的无量纲值已经知道是0.5^[35],即

$$PM = 0.5/\Delta P_{\text{拟合}}$$

借助于人机交互图象处理方法,把显示屏幕上的游标调放在压力导数平稳阶段,就可以很容易得到 $\Delta P_{\text{拟合}}$ 值。用同样的方法,从平稳阶段和代表井壁影响的早期双对数直线段交点位置的时间值 $\Delta t_{\text{拟合}}$ (图11),可以获得时间拟合。在有井筒储存的情况下,交点位置的无量纲值为0.5,而时间拟合值则可用下式表示:

$$TM = (t_D/C_D)/t_{\text{拟合}} = 0.5/\Delta t_{\text{拟合}}$$

在无限导能裂缝的情况下^[32],上式中的0.5应改为 $0.25/\pi$,而 t_D/C_D 则用 t_{Df} 代替。式中的 $\Delta t_{\text{拟合}}$ 值可以由工作人员把早期直线段,按照适当情况调放在斜率为1.0或0.5的位置,通过人机交互处理,由计算机系统自动算出。

应用压力和时间拟合方法,可以把压力和导数的数据进行无量纲化,并且在图象监视屏幕上以一组和解释模型相对应的无量纲样板曲线的形式显示出来。为了能够提供具有唯一性的拟合结果,这些样板曲线必须用独立的无量纲参数表现出来。在这一分析阶段,所需用的只有无限作用的样板曲线,因为即使在资料中看出有边界影响,一般情况下也不能对它进行定量分析。但是,多次产量的样板曲线应该加以应用,如果在特殊的人机交互处理条件下,有足够的时间推出这些曲线的话。

如果时间拟合和压力拟合都能够合适地选定了,那么数据和样板曲线之间,包括边界影响在内,都应该完全拟合。由于井壁影响,或者由于无限边界作用径向流动的稳态不够清楚而需要作小量的调整工作,可以通过人机交互处理方法,移动数据点来完成。如果需要进行大的调整,那就说明数据和解释模型之间存在不一致的现象。这就需要从样板曲线系统中通过内插法来确定模型的无量纲参数(例如在一个均质油藏中一口带有井筒储存和井壁阻力影响的井的 C_{De}^{*} 值),这样做需要把显示屏幕上的游标调放到数据点的适当部分来完成。举一个例,对于一个双重孔隙度油藏中一口带有井筒储存和井壁阻力影响的井来说,需要把游标依次指向压力或导数数据点的早期时间段(在导数曲线上相当于极大值位置)、中期时间段(导数的极小值位置)和晚期时间段(导数的平稳位置),以分别确定和裂缝流动相应的(C_{De}^{*})_f,和过渡阶段相应的(λe^{-1})以及和总系统动态相应的($(C_{De}^{*})_{f,m}$)各项无量纲参数。然后,把实际的多次产量样板曲线和针对模型参数值的导数计算出来,并且把它们和数据一同显示(图12)。如果模型和模型参数是正确的,则所得到的压力和导数的拟合结果都应该完全合适。如果需要对模型参数进行微调,可以应用试凑法,或者应用一种适用于在边界影响出现以前的压力导数^[28]对数值的自动拟合算法,在计算时应用目前的模型参数作为最初猜测数值。

正象前面所提到的那样,边界影响对压力导数曲线的形状特征有很大作用。在一个单一的断层情况下,压力导数表现为超越无限边界作用稳定线的上翘趋势,然后稳定在两倍于无

限边界作用稳定值的位置。这一段相当于常规分析中 Horner 斜率的两倍。在存在多边界的情况下最后的稳定水平值等于无限边界作用和这一系统中总井数乘积的稳定值。总井数包括一口井（所试的井本身）加上表现若干边界所必需的镜像井数。一般情况下，在压力导数中具有足够的分辨力以判明每一口或一组镜像井，并能探索出它们和所试井之间的距离。在图13中用一个例子可以说明。图13所表现的是一口压力恢复试验井的压力导数和选用的导数样板曲线之间的拟合图，这一口井就是 Horner 在他所发表的那一篇著名的报告^[6]中所分析的CB-123井。在图13中显示有三个平稳线段，它们分别相当于无限边界作用径向流动阶段，最近的一口镜像井的影响段和位于第一口镜像井5倍距离处的两口镜像井的影响段。另一个例子见参考文献^[36]。可以应用人机交互处理的方法来确定镜像井的数目和它们的距离，在进行工作时需要把游标指向数据中第一个偏离无限边界作用样板曲线点子的位置，然后根据需要尽量增加镜像井的数目以求得拟合。等到新的样板曲线又和数据偏离时，从这一点又重复上述过程，一直等到得到能和全部数据拟合的样板曲线为止。不这样做的话，也可以应用一种自动拟合程序来求得镜像井的数目及其距离。然后可以象在图13中那样，用简单的几何方法得出这些边界的分布状况。但是这些边界的分布状况一般不是唯一的解答，因为在试井过程中能起作用的镜像井数是有限的。

如果能获得一次油藏边界试井的资料，则上述的方法同样可以用于一个封闭性的油藏。在这种情况下，压力导数曲线最后趋近于一条斜率为1的双对数直线。另一方面，如果只有压力恢复曲线可以利用的话，则压力导数曲线的斜率向下折转为零，这样就很难判定确实的边界状况。

5. 解释模型的确认

一旦推出了一条能够和所研究的流动阶段全部数据都能拟合的样板曲线以后，对解释模型的选定工作就已完成，这时所有和模型有关的井和油藏参数都能从压力拟合值、时间拟合值以及样板曲线拟合参数计算出来。下一步为了确认分析的结果，就需要证实试井数据和解释模型的所有性质都能取得一致。为了完成这一目的就要进行一系列的检验程序，通过对分析结果一致性提出逐步增加严格性的要求，使这些程序相辅相成。

首先，通过样板曲线拟合辨认出各种流动状态，并且必须把相应的数据点子用适当的常规方法进行分析。正象前面所讨论的那样，对符合于某一给定流动状态的井和油藏参数计算的结果，应该在一定允许误差范围内和用样板曲线拟合法所求得的一致。根据经验，对于渗透率-厚度乘积 kh 值和井筒储存常数 C 值说来，允许误差不应超过10%，而井壁阻力系数的误差则不超过0.5。更大的误差说明解释结果的不一致性，这可能是由于错误的解释模型或者是不可靠、不完全的资料所造成的。

应用上述的方法来验证解释模型一般是有效的。为了验证模型参数，下一步可以应用无量纲的Horner曲线^[4]，在同一幅图上绘制以下各项：

- (1) 和解释模型相对应的Horner法或广义Horner法样板曲线；
- (2) 把所分析流动期间的实测压力数据绘制成无量纲的 Horner 或广义 Horner 式曲线。

Horner样板曲线定义为：

$$P_D[(t_p + \Delta t)_D] - P_D[(\Delta t)_D]$$

其中 $P_D[(\Delta t)_D]$ 代表的是压力降落样板曲线。

无量纲Horner式定义为:

$$PM^*[\bar{P} - P(\Delta t)],$$

其中 $\bar{P}$ 代表的是外推压力, 原始压力或平均油藏压力, 根据实际可用资料而定。在压力恢复试井情况下, 把实测数据和样板曲线相对于Horner时间—— $\log[(t_p + \Delta t)/\Delta t]$ 绘制; 在多次产量试井情况下, 则相对于无量纲叠加函数(无量纲的Horner时间)

$$|q_n - q_{n-1}|^{-1} [\sum_{i=1, n} (q_i - q_{i-1}) \log TM^*(\sum_{j=1, i} \Delta t_j + \Delta t) + (q_n - q_{n-1}) \log TM^*(\Delta t)]$$

绘制。需要用来推算无量纲Horner式的各项参数(包括压力拟合值 PM , 时间拟合值 TM 和 $\bar{P}$ 值)都是从分析中得出的。换一种方法, 也可以用实值的Horner样板曲线和Horner数据进行对比。为了获得一致的分析结果, Horner样板曲线和无量纲Horner实测数据应该能彼此拟合(见图14)。在无量纲Horner曲线图中直线段的斜率等于1.151。

即使在应用导数的情况下, 无量纲的Horner曲线也要比双对数拟合曲线对误差更为敏感, 尤其是当无限边界作用稳定段没有搞清楚或者不存在的时候更是这样: 一个相当好的双对数拟合结果可能导致不一致的Horner拟合结果。但是一个不满意的Horner拟合结果却可能对改善分析工作提供有用的信息。

在图15中表明在测定外推压力 $\bar{P}$ 时所造成的一个错误。由于这一个错误的结果, 实测曲线和Horner样板曲线平行地偏离了一段和 $\bar{P}$ 的误差成比例的距离, 这一偏差是可以调整的。通过人机交互处理, 把实测数据移动一下使其和样板曲线拟合, 就很容易完成这一调整工作。

在图16中说明的是错误地选择了Horner直线段, 其结果导致一个错误的压力拟合 PM 值。在实测数据的无量纲曲线上确实显示出斜率为1.151的Horner直线段, 虽然存在这一直线段, 但它和Horner样板曲线相比却旋转了一个角度。通过人机交互处理, 旋转数据曲线, 使它和样板曲线拟合, 就可以调整 PM 值。

图17说明的是在选择模型参数时有一个差错。作为这一个例子的是位于一个均质无限边界油藏中, 具有井筒储存和井壁阻力的一口井, 在选择 C_{De}^{2*} 时出了差错。这种情况在使用低分辨率图象屏幕, 通过人机交互处理来选择样板曲线拟合时常会发生, 但在双对数拟合中并不容易发现。当把实测曲线覆盖在样板曲线上时, 除了在早期部分而外, 实测曲线和大部分样板曲线都能拟合。在图17中, 可以看出所选择的 C_{De}^{2*} 值是太大了。

在试井过程中, 当某一个特殊的流动阶段的长度不足以用来不含糊地确定模型参数时, 也可以借助于无量纲Horner曲线以解释试井数据。如前所述, 在试井工作中经常会碰到这种情况, 整个试井过程可能很长, 但每一个别流动阶段的时间却仍有不足。在图18中所表现的就是一个例子。呈现在图中的是用双对数表示的压力和导数曲线, 这一段是由井筒储存控制的。在这种情况下, 只可能假设油藏动态是属于无限边界作用和均质的。在不知道无限作用平稳段位置的情况下, 只能假定它的位置如图18所示。平稳段的选择确定了压力拟合、时间拟合、曲线拟合以及外推压力等数值。所选择稳定段的可靠性可随后用无量纲Horner曲线来检验。从双对数分析在外推压力拟合、压力拟合或曲线拟合等方面所产生的任何差错, 如图15、16和17所说明的, 都会使无量纲Horner曲线图上表现出不成功的拟合。在这种情况下, 可以用试凑法调整各项拟合参数, 直到在无量纲Horner曲线图上获得象图19所显示的那种使人满意的拟合为止。

前面所述的检验程序能够保证对于所研究的某一流动阶段的分析结果达到一致。但是,

还需要证实全部试井分析结果也都是可靠的。为了达到这一目的,就得应用实际产量历史、解释模型以及从分析所得到的井和油藏参数的数值,模拟试井压力的变化过程。然后,把计算出的压力变化过程和在试井过程中实测压力进行对比(见图20)。又一次,必须获得良好的拟合结果以证实分析的一致性。

在解释过程的这一阶段,任何的不一致性通常都是由于产量计量的不准确而产生的,特别是在多相流动的情况下更是这样。一般产量误差不小于10%,这样就会在对比计算的和实测的压力时产生显著影响。为了估计产量计量影响的大小,可以用产量历史的上下限分别模拟压力变化的历史过程。

把实测的和计算的压力变化过程进行对比,最有利于暴露试井过程中任何井或油藏特征的变化,例如当油藏压力降到饱和压力以下时井壁阻力的增加,或者是在裂缝油藏中注入或压降试井中井筒储存的变化。如果一个具有双重孔隙率动态的无限油藏,在解释时错误地应用了一个代表均质封闭性油藏的模型,应用这种对比方法也是很有用的。在这种情况下,压力恢复分析可能看起来很一致,但常会得出一个小得不现实的小油藏。其结果,模拟出的压力下降速度比实测的压力要大得多,甚至可能得到负值。

本文作者多年来使用上述的检验方法,发现它在加强一个解释工程师的解释能力、信心和结果的一致性方面极为有效,而且对初学者和富有经验者都是如此。这种方法的一个明显的好处在于,用它可以有把握地发现错误的解释,并且证明解释的矛盾,因而可以省去象文献中常发生的那些解释者们的辩论。特别是,它可以防止人们错误地使用常规方法。图21是从参考文献[26]中摘出的一个例子,它表明在一个双重孔隙率油藏情况下所作出的一次不正确的试井解释。从实际的叠加数据和由分析结果导出的有量纲Horner样板曲线之间的分歧,可以证明解释结果是错误的。把这种检验的方法加以发展,也可以避免在无法确认解释模型的适用性时做出可能的答案;它可能通过对解释模型的否定来给出一个无解的结果,在没有实际分析结果的情况下,这也不失为一个很有用的信息。

六、结 论

尽管在试井解释工作中应用计算机已有多年历史,但一般都未能发挥出它的全部潜力。由于低价高能的个人计算机的大量使用而编出大量的试井解释软件,这一点就变得更为明显。

其主要的原因在于,大多数试井分析软件的开发者们把重点放在提高解释工程师的工作效率方面(这是简捷易行的办法),但却没有帮助他们改进解释技能(这需要对解释程序有通盘的理解)。因此,试井分析计算机化常常和手工分析法遭遇到完全相同的偏见和局限性等麻烦。其后果是,解释者们一般只能加快解释,而不是把解释做得更好一些。

但是,计算机应用的真正的目的和最有益的经济效益,在于帮助解释人员把分析工作做得更好一些,特别是当他们遇到一些单凭个人知识和经验无能为力的试井解释工作时尤其是这样。为了达到这一目的,试井解释软件的开发应该着重解决的方法是:(1)有助于确认适用于试井资料的解释模型;(2)落实分析的结果。为了加强人们接受试井是一种强有力的地层评价手段这一看法,上述的目的是非常必要的。

一般说来,应用压力导数可以比较容易地确认解释模型。这一方法的最终表现将是一种配套的技能系统,通过它能够识别曲线形状,辨明解释模型的各种不同的流动状态部分,并

且利用上经验知识。这是一种典型的人工智能应用，它肯定是未来很多研究工作的主题。

现在已经可能做到的是分析结果的落实，这项工作可以通过本文中所描述的方法论的途径有效地予以完成。在前面所讨论的各种检验程序中吸取了大量的试井解释技术并把它转换成为一种接近完整的科学，这样就使得非专家的解释人员能完成具有专家水平的解释工作。现在还缺少的是对结果中不可靠性的探索能力。造成解释错误的来源有很多种，包括压力和产量计量精度和灵敏度的局限性，模型选择的不准确，以及与所选定的解释模型拟合时的不肯定性等等。在分析工作中应该把所有这些因素结合起来，对分析结果提供一个可靠性的范围。

最后要说的是，最明显的计算机应用，譬如说有关更精密的解释模型的计算工作，不大可能对试井分析的进步有多大贡献。很明显，可能利用的更好的计量手段和更清楚的分析方法，象压力导数的应用，将会揭露新的特点^[53]，而它们又将要求对已有的解释模型作出一些修正。但是大体说来，所有需要的各种解释模型都已发表。遗憾的是，在这些日子里对过去工作成果的认识好象并不怎么普遍，而较大的吸引力将会是借助于个人使用的计算机和一些易于应用的数学方法，例如 Green 函数^[54]以及 Stehfest 的数字化 Laplace 反转算法^[55]，来进行一些重复的工作。可以预见到的是，在未来的年代里，一些无用的解式将充斥石油文献。

符 号 说 明

C_D —无量纲井筒储存系数^[30]；

E —在最优化算法中的目标函数；

h —地层厚度；

I —输入信号；

k —油藏渗透率；

O —输出信号；

P —试井压力；

$\bar{P}$ —平均油藏压力；

P_D —无量纲压力；

P_1 ，计算—计算的试井压力；

P_1 ，观察—实测的试井压力；

PM —压力拟合值；

ΔP —一个生产阶段的压力变化值；

$\Delta P_{拟合}$ —拟合点的 ΔP 值；

S —未知系统；

S —井壁阻力系数；

S_t —叠加时间；

t_D —一般性无量纲时间，象在参考文献[30]中所定义的无量纲时间；

t_{Df} —压裂井的无量纲时间^[30]；

TM —时间拟合值；

t_p —Horner 生产时间；

Δt —流动阶段经过时间；

Δt —拟合—拟合点的 Δt 值;
 β —解释模型的参数;
 λ —孔隙间流动系数;
 π —3.14159;
 Σ —解释模型;
 Ω —解释模型的输出。

角注

D —无量纲;
 f —在双重孔隙介质中最大渗透率介质;
 $f + m$ —在双重孔隙介质中全部系统;
 m —在双重孔隙介质中最小渗透率介质;
 m —在解释模型中参数的数目;
 n —在目标函数中所用压力计量值的数目;
 n —在叠加函数中产量变化的次数。