

# 油气田开发中的数值试井分析

刘曰武 周 蓉

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

刘 妍

(大庆物探公司研究所, 大庆 163453)

何风珍 杨景海

(大庆油田测试技术服务分公司, 大庆 163153)

**摘要** 综合提出了数值试井分析的概念、数值试井分析方法, 建立了非均质地层的数值试井模型, 说明了数值试井分析和一般试井分析的主要区别和共同点, 阐述了数值试井分析的基本步骤, 并举例说明了数值试井分析的过程以及数值试井分析在油气藏开发动态监测方面的积极意义。

**关键词** 油气田开发, 渗流, 试井分析, 试井模型

## 1 引言

动态预测是由反问题的求解并结合数值模拟技术, 研究地层压力与采出井、注入井生产动态的相互关系, 根据油气井的产量变化预测地层压力场变化, 由注入井压力预测采油井压力, 为进行油气田开发方案编制提供必备的基础数据, 是油气田经济合理开发的必要保障。

试井技术作为动态预测的主要手段是从 20 世纪 30 年代提出, 发展到现在已经有近 70 年的历史<sup>[1-7]</sup>, 主要理论依据是达西渗流理论、1935 年 Theis<sup>[1]</sup>提出的点源函数理论以及 1949 年 Van Everdingen<sup>[2]</sup>提出的 Laplace 变换理论, 主要分析方法是 1951 年 Horner<sup>[10]</sup>提出的半对数直线分析理论和 1974 年 Ramey<sup>[11]</sup>提出的双对数压力曲线拟合理论, 到 1983 年由 Gringarten 和 Bourdet<sup>[12,13]</sup>发展为双对数压力和压力导数曲线拟合理论, 1991 年在外国文献中见到有关试井模型的数值求解的文章<sup>[14-18]</sup>, 1995 年国外已经开始进行试井数值模拟器的研究, EPS 公司的 WELL TEST 软件中已经有了规则几何网格的试井模拟内容, 但这些还不能称为“数值试井分析”, 多数称为“试井数值模拟器”(Well Test Simulator)。

数值试井分析是将地质静态资料和油田开发动态资料数值化与相应的试井模型的数值化求解相结

合的试井分析方法, 它既继承了一般试井在了解油田开发动态方面的特色(获得动态资料的重要手段), 又在解决油田开发中后期的试井资料解释和应用方面有着独特的优点, 如在解决邻井影响问题、地层的非均质性问题、流体分布问题以及求解地层压力分布、渗透率分布以及流体分布等。

目前解析试井理论所用的模型, 无论是 Theis 的点源解模型、Agarwal 的井储模型、Ramey 的井储表皮模型还是 Gringarten 和 Bourdet 的有效井径模型都利用了以下的基本假设: 地层均质、等厚、水平板状、各向同性、流体单一且性质不变, 而这些条件只有在勘探开发初期能有部分满足, 在油田实际开发条件下上述条件已经完全不能满足了, 因此在油田开发的中后期出现了大量解析试井理论和软件不能分析的试井资料, 因此必须寻找新的模型和新的方法解决油田开发中后期的试井资料解释问题, 为油田合理开发提供更多更准确的动态信息, 这就是我们研究油藏动态监测新手段的意义所在。

## 2 基本理论

根据 Gringarten 的思想, 试井是通过输入信号的改变(产量、压力的改变)来分析采集到的输出信号的改变, 最终获得地层系统的信息, 从其数学本质上讲, 试井解释是一个反问题的求解过程, 因此所获得的地层信息结果存在非唯一性的问题, 如何更好地保证解的唯一性, Gringarten 建议尽可能多的考虑地质信息和油藏工程信息, 但如何考虑, Gringarten 没有给出具体的方法, 多年来无论理论研究人员还是现场试井解释人员都只是凭借自己的解释经验和地质或油藏工程背景进行这一方面的工作, 因此, 工作时间长一点、经验多一点的人解释的结果就好一

些,不同的解释人员即使使用同一套解释软件对同一口井解释,也可以得到不同的解释结果.为了解决这一问题,人们在解释方法上做了极大的努力,使试井分析方法从常规的 Horner 分析方法、MDH 方法、MBH 方法、松 I 法等常规分析方法,发展到了现代试井的双对数压力分析方法、压力和压力导数分析方法以及自动拟合方法等现代试井分析方法.但这并没有从根本上考虑 Gringarten 的建议.基于此,我们从地质入手首先考虑地质静态资料如何进入数值试井分析模型,然后将油藏开发的产量和注入量的变化调整加入到数值试井分析模型中.

为了搞清数值试井和一般试井的关系,我们首先看一下试井的目的:

(1) 确定地层渗透率:渗透率是地层性质好坏的标志,它代表着流体在地层中的流动能力,与井的产能密切相关.但是其它方法得到的渗透率各有其局限性,如岩心分析得到的渗透率只能代表井点处地层的绝对渗透率,对确定产能意义不大;测井得到的渗透率精度不高,也只能代表近井附近的情况;只有试井得到的渗透率才能代表一个区域性的平均值,才能确定油田开发过程各种物理化学变化以及井措施造成的渗透率的变化,才是一个原位的动态数据,因此试井的首要任务是确定地层的渗透率.但是随着油田的开发深入,非均质性日益严重,一般试井的理论假设基本上被一一打破,如何利用测试资料确定地层渗透率就成为了一个迫在眉睫的问题.况且我国大多数油田都是注水开发的,在开发中后期,由于地层的非均质性和流体分布的非均质性不再可能存在一个较好的平均渗透率值,而可能是一个渗透率分布.这就为数值试井的发展提供了广阔的天地.

(2) 确定地层的压力:地层压力是地层能量高低的重要表现,也是油田开发的重要数据.随着油田的注水开发原始均匀分布的地层压力已经严重破坏,产出井点的压力在不断降低,而注入井点的压力保持一个高值或是在升高,因此地层平均压力的概念已经没有太大的价值.为了更好了解油田开发状态,了解地层压力分布势在必行.一般试井只能计算地层的平均压力,而数值试井为计算地层的平均压力提供了良好的手段.

(3) 确定油藏边界的性质:油藏边界性质和大小是确定开发方案和开发方式的重要依据,但仅仅依

靠地质和地球物理资料确定地层边界性质和相变界限是非常困难的.一般试井分析方法只能给出规则形状油藏在特定井位条件下的解释,即使已知油藏的形狀也难以给出合理的计算,因此数值试井将在此方面有积极的贡献.

(4) 确定近井带的完善程度:油井是否完善、是否需要进行措施处理、措施处理后的效果如何等都可以通过试井解释获得的表皮系数来表示.表皮系数在某种意义上讲,代表了油井完善程度,也是油田开发和工艺措施的重要参数.

在油田开发中这些参数的获得越来越难,尤其是对大庆油田来讲加密井网部署完成后,测试资料受邻井影响日益严重,流体分布也严重影响了测试资料的可解释性.现场有非常多明显的例子,如本来是非常好的均质砂岩地层,几年后的测试资料特征却表现出双重介质灰岩的特征;原来的测试资料表明此区域内没有封闭边界,而后来的测试资料却表现出存在封闭断层,而且还不止一条,等等各种奇怪而又难解释的问题,我们希望这些问题能够通过数值试井部分地进行解决.

现在来说明数值试井与传统试井的关系问题.数值试井是传统试井理论的深入发展,传统试井理论是数值试井的基础.二者之间是一般与特殊的关系.因此既有着许多的共同之处,又有较多的差异.

其相同之处在于:(1) 具有相同的流动模式:线性流、双线性流、径向流、椭圆流、球形流、半球形流;(2) 具有相同的内外边界概念:内边界包括井筒储存、表皮效应、裂缝、打开不完善等.外边界:包括无限大油藏、封闭边界、定压边界等;(3) 相同的思想方法:利用尽可能多的条件,使反向问题的唯一性更强;(4) 相同的分析目的一致:反求地层参数,更好地为油田开发服务;(5) 相同的分析方法:双对数分析、半对数分析、历史拟合分析等.

其不同之处在于:(1) 解决问题的方法:为了打破解析解和半解析解在实际应用中的许多限制,对问题的求解采用了数值化求解的方法;(2) 解决问题范围:单井在地层中位置的问题,传统试井只能解决矩形中井在中心或在特殊位置上的问题,圆形油藏中井在中心的问题,现在可以解决井在油藏任意位置的问题;(3) 不同的外边界形状和性质:传统试井只能解决圆形、矩形和无限大油藏边界的问题,数值试井可以解决任意多边形,甚至是可以是目前

常规数字手段技术的任意形状的边界内的井的测试问题；(4) 多井问题：传统试井只能近似地叠加上邻井的影响(而这一功能目前的商业化软件都还不具备)。数值试井可以考虑注采于同一层系的相邻井的影响，这非常适合目前大庆加密井的测试资料的解释；(5) 解释成果的信息量不同：传统试井只能给出地层参数：渗透率、流动系数、流度、地层系数、井筒储存系数、表皮系数、地层平均压力、边界距离，而数值试井不仅可以给出传统试井分析的所有结果，而且还可以给出地层中平面压力分布和流体分布，解决平面上压力和流体的问题，这在油田开发中后期有着积极的意义。对注水开发油田，在地层平均压力不存在的条件下，有可能更好地说明测试所得的外推压力的意义。在纵向上：传统试井很难确定各层内部的压力差异，数值试井不仅可以求得各层平均压力差异，而且还可以通过对测试资料的分析，计算出各层内部的压力分布，这为油田深入开发提供了更大信息。在流体分布上：根据压力场的分布可以得到流场状况，从而为研究油水分布打下良好的基础。

### 3 非结构化网格自动生成的理论

这里主要介绍三角形网格的自动划分方法，因为这种网格是目前发展较成熟，速度较快，网格形状优化程度很高的一种方法。其基本思想是：当在平面上给定一个点集分布，则平面可以被分割成互不重叠的 Dirichlet 网格，网格内的任意一点到点集中的一点比到点集中的其它点的距离都近。用公式可以表示为

$$\{V_i\} = \{P: \|P - P_i\| < \|P - P_j\|, \forall j \neq i\}$$

网格所围成的区域都是 Voroni 区域，当把相邻的 Voroni 区域的形成点相连时，就形成了所要求的网格。简单示例如图 1 所示。

$P_1, P_2, P_3, P_4$  是四个给定的点，将平面划分为四个 Voroni 区域，即  $Q_4V_2Q_1$ ,  $Q_1V_2V_1Q_2$ ,  $Q_2V_1Q_3$ ,  $Q_3V_1V_2Q_4$ 。可以看出  $V_1, V_2$  是三角形  $P_1P_4P_2$  和三角形  $P_2P_3P_4$  的外接圆圆心， $Q_2V_1, Q_3V_1, Q_1V_2, Q_4V_2$  分别为对应边上的垂直平分线。依次类推就可以得到所要求的区域上所有的三角形网格。

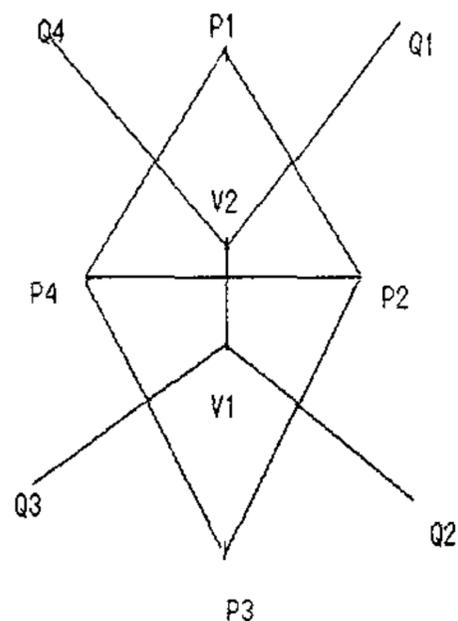


图 1 非结构化网格生成原理图

### 4 数值化求解方法

控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu(x,y)} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu(x,y)} \frac{\partial p}{\partial y} \right) =$$

$$\phi(x,y)C_r(x,y) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件

$$p(t=0) = p_i \quad (2)$$

外边界条件:

无限大油藏

$$p(x,y \rightarrow \infty) = p_i \quad (3)$$

外边界封闭油藏

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0 \quad (4)$$

外边界定压油藏

$$p|_{\Gamma} = p_i \quad (5)$$

混合外边界油藏

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma_i} = 0 \quad p|_{\Gamma_j} = p_i \quad \Gamma = \Gamma_i + \Gamma_j \quad (6)$$

内边界条件

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma_0} = \pm \frac{quB}{khN_i} \quad (7)$$

这一数值试井模型与均质解析模型的差别在

于:考虑了地质条件的影响,这些地质条件包括地层的厚度分布规律、地层的孔隙度分布规律、地层的渗透率分布规律和地层中流体黏度的分布规律.也可以在此模型中等效处理油水两相流动的问题,更精确的办法是将油水两相流动分开,考虑相对渗透率的影响,这种方法将在后面描述.

对于某一井组,根据所建立的静态参数分布模型,利用数值试井方法确定平面上的动态参数的分布,因为试井资料是在完全动态情况下测得的,它才可能反映动态生产下的动态参数分布.但是解析解试井的方法难于处理任意边界和多井存在的情况.数值试井可以用来确定平面上的动态参数分布,主要包括开发层段的压力分布、流动系数分布、渗透率分布和将来要做的相对渗透率分布及流体饱和度分布等.对于所选定的区块中的相邻井可以预测其压力测试曲线.

数值试井研究的基本步骤是:(1)输入地质静态和开发动态参数;(2)确定测试井所在的区块和相邻井的信息;(3)将所确定的区块进行非结构化网格划分;(4)将地质静态参数分布结合到每一个计算结点上;(5)进行数值试井曲线拟合;(6)拟合之后进行历史数据检验;(7)获得压力动态分布;(8)通过拟合所得的渗透率得到动态渗透率分布;(9)结合地层的有效厚度得到流动系数分布;(10)通过获得的动态渗透率分布和地质静态资料分布预测非监测井的压力测试曲线.

## 5 实际资料应用

为了说明数值试井分析的过程以及数值试井分析在油气藏开发动态监测方面的积极意义,我们选择了我国某油田的一个小区块的数值试井分析作为例子.该区块的井位图如图2所示.通过这张扫描位图得到的分析区域及井的关系如图3.

根据地质静态资料的输入数据,利用地质上常用的克里金算法,可以得到地质上的静态参数分布规律,同时也可以通过这些静态参数的分布规律如厚度分布规律、渗透率分布规律和孔隙度分布规律初步判断开发层段的地质沉积特征.反之我们对地质沉积特征比较清楚的井,根据沉积相的特征,通过在地质图上取等值线点给定地质静态参数分布规律的初始值.这里只给出所分析区块的孔隙度的分布规律如图4所示.

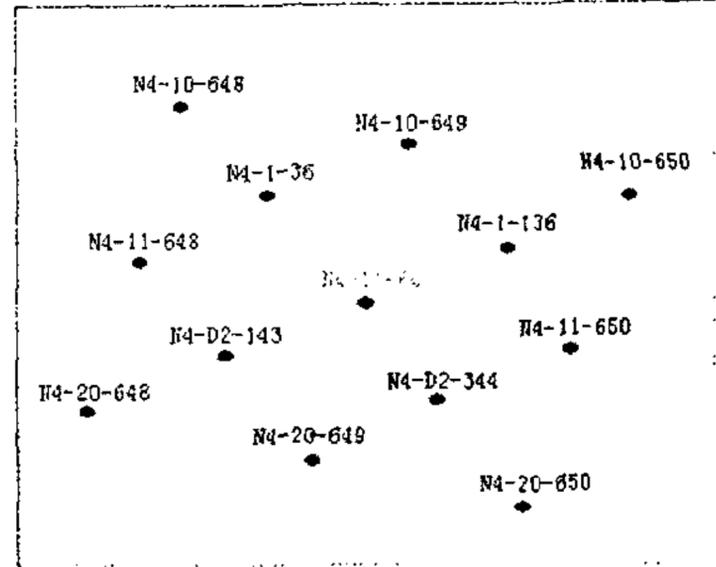


图2 分析区域的井位图

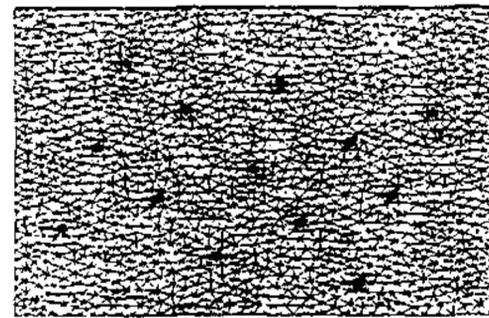


图3 分析区域的网格划分图

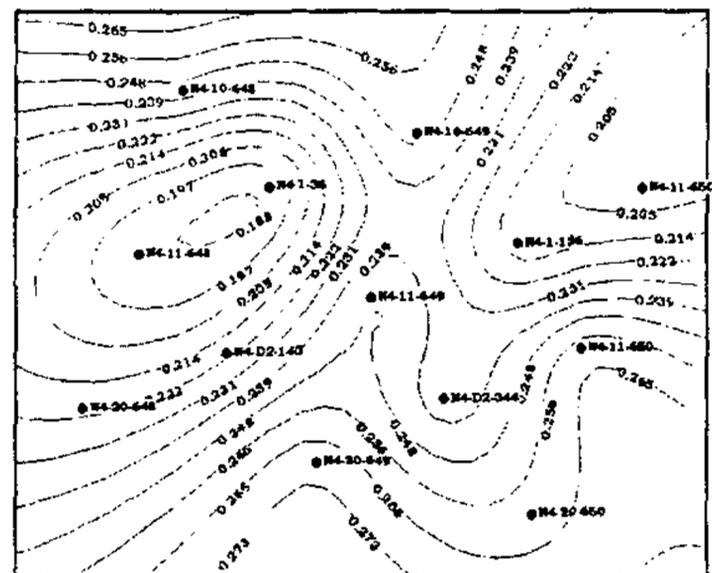


图4 分析区块的孔隙度分布

压力分布计算的理论基础是测试井点的测试资料在数值试井中获得一个较好的拟合.同一般试井问题一样,数值试井同样是一个反问题的求解过程,也必须通过曲线拟合获得井筒储存系数、表皮系数和渗透率的值,在获得这些值的同时我们得到每一个计算结点上的压力,由此即可得到测试层段中的压力分布.测试井点的双对数压力拟合图如图5所示.得到的地层中的各点压力可以用等值线的方式表现出来,分析区块的地层压力分布图如图6所示.

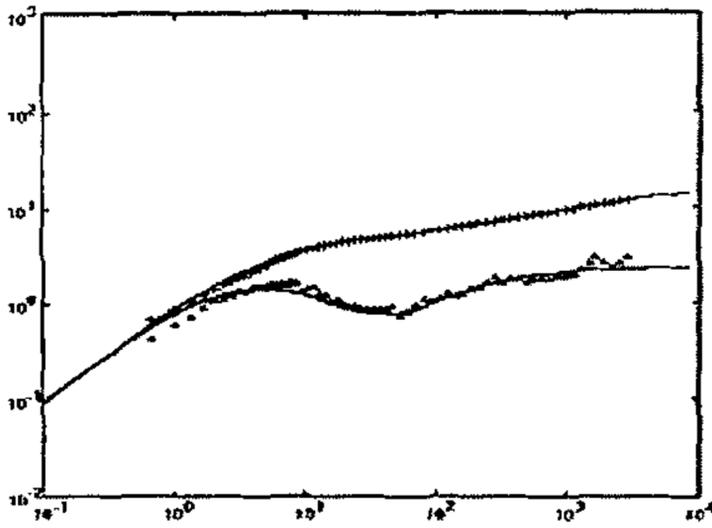


图5 测试井点的双对数压力拟合图

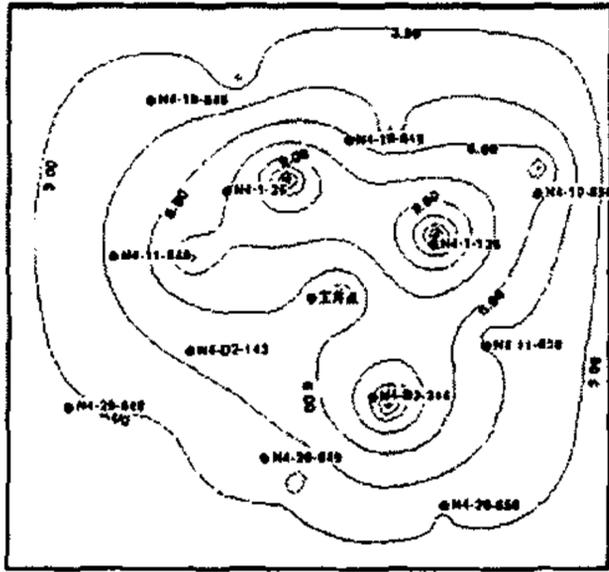


图6 试验区块的地层压力分布图

在实际测试曲线和理论计算曲线获得了较好的拟合之后, 我们得到测试井点的渗透率值, 将此值同地层地质静态资料中的测井渗透率相关联, 就可以得到测试井所在区块的渗透率分布. 该区块的有效动态渗透率分布图如图7所示.

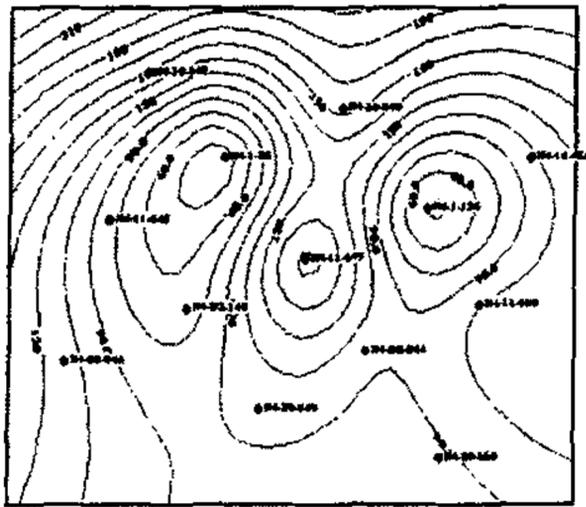


图7 试验区块的地层渗透率分布图

### 6 结 论

数值试井分析作为一种新兴技术方法, 在地质静态资料和生产动态资料利用方面有独特之处; 在理论曲线的建立方面是完全新的思路; 在分析成果方面不仅包含了一般试井分析的结果而且有更多的参数分布. 因此, 它将有光辉的发展前途, 将成为油气藏开发动态监测必不可少的有效工具, 为油气田经济合理开发提供必要保障.

数值试井方法是试井技术发展的必然趋势, 不同的研究者有不同的观点和看法. 有一点是一致的: 就是一般试井分析解析解理论在油田开发中后期的测试资料分析中越来越步履维艰, 必须寻求新的途径和手段. 本文通过将20世纪90年代发展起来的新的网格的应用和对实际工程问题的深化研究, 建立了描述油藏非均质性的模型, 探索性地找到了油田动态监测的一种新手段即数值试井分析方法.

### 参 考 文 献

- 1 Theis C V. The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans AmSoc Civ Eng*, 1935, 519-524
- 2 Van Everdingen A F, Hurst W. The Application of the Laplace transformation to flow problem in reservoirs. *Trans AIME*, 1949, 186: 305-324
- 3 Earlougher R C Jr. *Advances in Well Test Analysis*. Monograph Series SPE, 1977
- 4 Raghavan R. Pressure behavior in circle and elliptical reservoirs. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. *Well Test Analysis*, 1993. 126-164
- 5 Homer D R. Pressure build-up in wells. Proc. Third World Pet. Cong, The Hague sec. II, 1951. 503-523
- 6 Ramey H J Jr. Short-Time Well Test Data Interpretation in the Presence of Skin Effect and Wellbore Storage. *JPT*, 1970, Jan: 97
- 7 Agarwal R G, Al-Hussainy T, Ramey H J Jr. An investigation of wellbore storage and skin effects in unsteady liquid flow: I. *Analytical Treatment. SPEJ*, 1970, Sept: 278-290
- 8 Earlougher R C Jr, Kersch K M. Analysis of short-time transient test data by type-curve matching. *JPT*, 1974, July: 793
- 9 McKinley R M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure buildup data. *JPT*, 1971, July
- 10 Gringarten A C, Bourdet D, Landel P A, Kniazeff V. A comparison between different wellbore storage and skin type

- curves for early-time transient analysis. SPE 8205, 1979
- 11 Bourdet D, Whittle T M, Douglas A A, Pirard Y M. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, 1983, May: 95-106
- 12 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥. 中国科学技术大学出版社, 1999
- 13 Helmy M W, Wattenbarger R A. New shape factors for well produced at constant pressure. SPE 39970, presented at the 1998 SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, March, 1998
- 14 Guo Boyun, Westaway P, Jacquemont J. Field case studies of pressure transient data from complex reservoirs. SPE 63308, presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2000
- 15 Qasem F H, Nashawi I S, Mir M I. A new method for the detection of wellbore phase redistribution effects during pressure transient analysis. SP 67239, presented at the SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma city, Oklahoma, March 2001
- 16 Finley D B, Pahmiyer R C. Well testing in the new millennium-real time. SPE 68757, presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 2001
- 17 Zhao Gang, Leslie G T. Transient pressure analysis of bounded communicating reservoirs. SPE 71032, presented at the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, May 2001
- 18 Archer R A, Roland N. Home, "The Green Element Method for Numerical Test Analysis", SPE 62916
- 19 Coats K H. Simulation of gas condensate reservoir performance. SPE 10512, presented at the 6th SPE Symposium on Reservoir Simulation, New Orleans, LA, Jan 31-Feb 3, 1982
- 20 Puchyr P J. A numerical well test model. SPE 21815, presented at the Rocky Mountain Regional Meeting and Low-permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, 1991, April 15-17
- 21 Warren G M. Numerical solutions for pressure transient analysis. SPE 26177, presented at the Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada, 1993, June 28-30
- 22 Blance G. Contribution of the pressure movements to the interpretation of numerical simulation of well TestECM 5. Presented at the 5th Earoup Conference on the mathematics of oil Recovery, Leoben, Austria, 1996, Sept 3-6
- 23 Blance G. Numerical well test simulation in heterogeneous reservoir poster presented at AAPG, Nice 95
- 24 Pach F. Analytical and numerical simulation well test model ECM 5, Presented at the 5th Earoup Conference on the mathematics of oil Recovery, Leoben, Austria, 1996, Sept 3-6
- 25 Stephen K M. Simulation of transient well-test signature for geologically realistic faults in sandstone reservoirs SPEI March 1998, or SPE 38442

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEST WELL IN RESERVOIR DEVELOPMENT

LIU Yuewu ZHOU Rong

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science,  
Beijing 100080)

LIU Yan

(Exploration Company, Daqing Petroleum Administrative  
Bureau, Daqing 163453, China)

HE Fengzhen YANG Jinghai

(Daqing Logging & Testing Services Company, Daqing  
163153, China)

**Abstract** The concept and method of the numerical well test analysis are developed in this paper which is compared with the general well test analysis. A new well test model for the well in the heterogeneous reservoirs is proposed. The basic analysis steps of the numerical well test analysis are given in detail. Its importance in the reservoir development is shown by the field data analysis.

**Key words** reservoir development, fluid flow mechanics in porous media, well test analysis, well test model