

中国石油大学(华东)“211工程”建设重点资助系列学术专著

Streamline Numerical  
Well Test  
Interpretation Theory and Method

# 流线数值试井 解释理论与方法

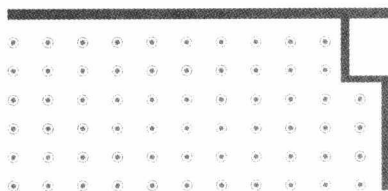
□ 姚 军 吴明录 著

中国石油大学出版社

中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著

# 流线数值试井 解释理论与方法

Streamline Numerical Well Test  
Interpretation Theory and Method



姚 军 吴明录 著

中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

流线数值试井解释理论与方法/姚军,吴明录著. —东营:中国石油大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-5636-2543-7

I. 流… II. ①姚…②吴… III. 试井—数值模拟—地质解释 IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 019735 号

书 名: 流线数值试井解释理论与方法  
作 者: 姚 军 吴明录

---

责任编辑: 袁超红

封面设计: 九天设计

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791,8392563)

开 本: 185×260 印张: 17.25 字数: 441 千字

版 次: 2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

总序

“211 工程”是新中国成立以来,由国家立项展开的规模最大、层次最高的高等教育建设工程,是国家为振兴高等教育、建设人力资源强国而做出的重大教育发展决策。“211 工程”抓住学科建设、师资队伍建设等决定高校水平提升的核心内容,通过重点突破带动高校整体发展,探索出了一条高水平大学建设的成功思路。经过 10 多年的努力,“211 工程”取得了显著成效,在学科建设、人才培养、科技创新等方面取得了丰富成果,使中国的高等教育产生了重大变化,大幅度拉近了我国高等教育与世界高等教育的距离,对于相关高校整体水平的提升产生了巨大的推动作用。

1997 年,中国石油大学跻身“211 工程”重点建设高校行列,形成了学校更好地开展高水平大学建设的重大历史机遇。经过“九五”、“十五”两期建设,进入“十一五”第三期建设,三期建设有机衔接,从重点学科建设到学科群建设,再到创新队伍建设和创新人才培养,学校“211 工程”建设始终围绕提升学校水平这个核心,不断拓展建设思路和建设内容,其“以优势带整体,以特色促水平”的建设思想与学校发展整体思路实现了高度吻合。10 多年来,“211 工程”建设的轨迹就是标识学校发展的一条主要线索。

“211 工程”建设所取得的成效带来了学校办学水平的全面提升。依托“211 工程”,经过 10 多年的建设和发展,学校主干学科优势和特色更加突出,带动了相关学科水平的提高,学科结构更加优化,学校进一步获得了国家对“优势学科创新平台”项目建设的支持;师资队伍建设成效显著,高层次人才明显增加,特别是培育发展起一些高水平团队;科技创新能力大幅提升,突出了在基础理论研究、应用研究等方面的优势,已初步建立起具有学校特色的科技创新体系,在 10 多个研究领域居于国内领先水平,有些达到国际先进水平,科技成果转化取得巨大社会效益和经济效益;人才培养质量明显提高,逐步建立起以素质教育为主导的、科学的教育教学体系,有效保证了创新人才培养;国际学术交流与合作不断深入,学校开放办学和国际化程度得到大大推进;办学条件大幅改善,建成了先进的公共服务系统,形成了良好的软硬条件支撑。总体上,在“211 工程”建设的推动下,学校办学水平大幅提升,办学特色更加鲜明,开创了学校建设高水平大学的良好局面。

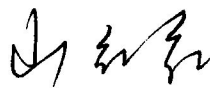


“211 工程”建设所取得的经验是学校办学的宝贵财富。首先,重点突破的策略保证了学校可以抓住影响办学水平的学科建设、创新能力等重点工作和任务,集中资源、队伍和时间进行重点建设和发展,有效提升了学校的核心竞争力;其次,滚动发展的思路保证了学校找准优势并不断强化优势,以点带面不断完善整体结构,促进了学校的协调发展和可持续发展;另外,以项目为平台进行系统组织的机制保证了学校加强统筹规划、资源集成、队伍整合,加强了对各个环节、各种因素的系统优化,建立了一系列行之有效的工作制度。

“211 工程”建设也锻炼形成了一支甘于奉献、勇于创新队伍,促进了全校在这样一个综合平台上的协同配合。在 10 多年的建设过程中,许多同志全身心投入有关工作,坚持不懈地追求更高水平和更高目标;有关部门协调一致,切实保证了各项建设任务的顺利实施。所以,“211 工程”也是学校的一项事业工程、合力凝聚工程。

学校现在已经展开“211 工程”三期建设,同时正在进入建设“国内著名、石油学科国际一流的高水平研究型大学”的奋斗征程,“211 工程”建设将继续成为学校实现新的发展目标的重要支撑。总结前期“211 工程”建设的成功经验,充分展示“211 工程”建设的丰富成果,对于更好地推动“211 工程”建设,实现学校的奋斗目标,具有重要的现实意义。为此,学校决定设立专项资金,资助出版“211 工程”建设有关的系列学术专著,分门别类地介绍和展示学科建设、学术发展、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。“211 工程”建设作为一项综合性的重大工程,虽然对其进行系统全面的总结存在一定难度,但相信这套丛书完全可以从不同的侧面、从一些具体的内容,展示我校“211 工程”建设的巨大成绩和发展思路,对今后“211 工程”建设和学校总体发展起到应有的启示和促进作用。

中国石油大学(华东)校长



二〇〇八年十月



姚军教授所著《流线数值试井解释理论与方法》是在数值试井领域多年积累的科研成果和应用经验基础上总结提炼而成的专著,集中体现了该领域理论与方法的前沿和发展趋势,具有鲜明的独创性和实用性,为试井测试资料用于油藏动态精细描述,尤其是定量确定剩余油分布提供了有效方法。该书也非常注重理论的系统性和完整性,为读者真正了解流线数值试井解释理论与方法提供了基础信息。

该书在理论与方法方面具有以下特色:

1. 创新性强。首次将流线方法应用于数值试井解释,突破了为一个测试井建立一个试井方程的传统理念;基于真实油藏模型,考虑生产历史、油层非均质、流体多相且非均匀分布、多井干扰、层间窜流及复杂油藏边界等因素的影响,建立了由生产和测试两个阶段的数学模型组成的流线数值试井解释模型。生产阶段的数学模型用于模拟生产历史,用流线方法快速求解测试时刻的压力分布、饱和度分布和流线分布等;测试阶段的数学模型由测试井周围的每条流线的渗流方程组成,用于模拟测试阶段的井底压力变化,求取测试井的理论压力响应,实现了对地层和流动的精细刻画。

2. 系统性强。数值试井解释模型相当齐全,从单层油藏模型到多层油藏模型,从水驱油藏模型到化学驱(聚合物驱、碱驱以及碱和聚合物二元复合驱)油藏模型,从砂岩油藏模型到碳酸盐岩双重介质油藏模型,从完全射开井模型到部分射开井模型,从规则污染井模型到不规则污染井模型,从垂直测试井模型到水平测试井模型,形成了流线数值试井解释的理论和方法体系。

3. 实用性强。流线数值试井解释方法避免了常规试井和数值试井解释方法的不足,其试井解释模型能考虑开发和地质等复杂因素的影响,更加符合油藏实际;解释功能强、结果可靠,不仅能提供常规试井参数信息,而且可获得剩余油、聚合物浓度等动态参数的分布。另外,由于采用了流线方法求解和多种群遗传算法,其试井解释速度快,应用规模大幅度提高,现场实用性强。书中介绍的流线数值试井理论与方法已形成功能齐全、实用可靠、具有自主知识产权的流线数值试井解释软件,并已在国内胜利、中原、南阳、大港等油田推广应用,取得了较好的

经济效益。

全书图文并茂、内容翔实,不仅具有较高的学术价值,而且具有广阔的应用前景,可供石油领域和相邻领域的科技人员、工程技术人员及高等院校师生阅读、参考。

中国科学院院士

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the Chinese Academy of Sciences Academician Gao Ping.

二〇〇八年十月

# — 前 言 —

正确评价已开发油藏的动态参数,尤其是剩余油分布是科学、合理制定增产措施或提高采收率方案的基础,利用试井测试资料确定储层参数和剩余油分布是一种简便、经济、可靠的实用方法。

20 世纪 50 至 60 年代发展了以 Horner 方法为代表的、利用测试曲线(直角坐标或半对数坐标)的直线段斜率和截距反求地层参数的常规试井解释方法,此外还有 MDH、MBH 和 Y 函数方法等。这些方法主要用于处理中、晚期试井资料,适用于探井或开发早期的测试资料的解释。这些方法的优点是原理简单、使用方便。缺点则是:直线段必须出现,否则无法解释;直线段起始及斜率确定不准确。这些缺点给常规试井解释方法的应用造成了困难。

20 世纪 70 至 80 年代引入了系统分析方法,提出了理论典型曲线与实测曲线拟合的试井解释方法,即现代试井解释方法。它的理论基于油藏概念模型和单相渗流理论,利用拉普拉斯变换进行解析求解。现代试井解释方法从均质油藏发展到双重介质油藏、从常规井发展到压裂井和水平井、从无限大油藏发展到可考虑具有圆形和直线边界的油藏。现代试井解释方法自 20 世纪 70 年代提出以来逐步发展与完善,形成了实用软件,是较为实用的试井解释方法,应用较为广泛。但是,该理论是建立在油藏概念模型和单相渗流理论基础上的,不能考虑生产历史、油藏非均质性、多相流以及井网等影响,对于开发后期和非均质油藏的实用性较差,难于满足后期油藏动态描述的要求。

随着国内外大多数油田进入中期和后期开发阶段,油藏所呈现出的复杂流动特征(储层非均质、流体非均匀分布、多井相互干扰、多层油藏之间的窜流等)已无法用基于对理想模型(储层均质、单相流、流体均匀分布或以测试井为圆心的圆环状分布、油藏等厚等)解析求解的常规试井和现代试井方法进行解释,常规试井和现代试井解释方法已不能满足油田开发与评价的需要。于是,20 世纪 90 年代提出了数值试井解释方法。该方法基于油藏真实模型,考虑油藏的复杂边界、生产历史、多相流动、非均质、井网以及井型等因素建立试井解释模型,采用数值方法进行求解,利用自动拟合方法进行多参数试井解释。为区别于基于解析求解方法的试井解释方法,将之称为数值试井解释方法。目前,对数值试井解释模型的求解方法主要采用有限差分方法、有限元法、边界元法和 Green 元法等,都是基于对研究区域进行二维或三维网格划

分的基础上,通过对井点网格加密的方法实现对测试井压力动态的精细模拟,其求解的速度和精度难以同时达到数值试井解释的要求。因此,目前的数值试井解释方法实用性较差,没有得到广泛应用。

自1999年承担中国石油天然气股份有限公司“九五”科研项目“试井分析理论模型求解新方法研究”以来,我们一直致力于数值试井方面的研究。经过10年的不懈努力,将流线方法引入试井解释中,提出了流线数值试井解释方法。该方法目前已从单层油藏发展到多层油藏,从砂岩油藏发展到裂缝性双重孔隙介质油藏,从水驱油藏发展到聚合物驱、碱驱和化学复合驱油藏,形成了完善的试井理论体系和解释方法,极大地丰富了数值试井解释方法,同时还形成了具有自主知识产权的流线数值试井解释软件,并已在胜利油田、中原油田、河南油田以及大港油田等推广应用,形成了通过试井资料确定渗透率分布、剩余油分布的实用方法。

本书是作者近10年来在该领域系统研究的成果。全书共分十二章。第一章简要叙述了试井理论的发展历史,分析了现代试井解释方法的局限性,并由此提出了数值试井的概念及其技术路线等重要问题。第二章介绍了流线数值模拟理论与方法的基本原理、求解步骤等关键问题,可为以前未接触过流线数值模拟方法的读者提供较大帮助。第三章至第九章系统研究了多种类型油藏和井的流线数值试井解释模型:从单层油藏流线数值试井解释模型发展到多层油藏流线数值试井解释模型,从单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型发展到多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型,从多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型发展到多层砂岩化学驱油藏流线数值试井解释模型及考虑组分的流线数值试井解释模型,从单重孔隙介质流线数值试井解释模型发展到双重孔隙介质流线数值试井解释模型,从常规内边界条件为油层全部射开发展到油层部分射开、考虑射孔位置影响和不规则污染的复杂近井边界条件,从常规井(直井)的流线数值试井解释模型发展到复杂结构井(水平井)的流线数值试井解释模型,尤其是首次将数值试井解释方法拓展到化学驱和双重孔隙介质油藏,丰富和发展了数值试井解释方法,形成了更为完善的方法体系。第十章研究了基于双种群遗传算法的多参数流线数值试井自动拟合解释方法,为数值试井的快速自动拟合奠定了基础。第十一章介绍了在前述理论研究的基础上编制的具有自主知识产权的流线数值试井解释软件。第十二章介绍了流线数值试井理论与软件的应用研究,采用所编制的软件对不同油田的多种类型油藏进行了实际矿场应用。

本书各章节的编写工作如下:第一章至第三章、第七章、第十章和第十二章由姚军编写,第四章至第六章、第八章、第九章和第十一章由吴明录编写。姚军负责全书的统稿工作。

在本书出版之际,向胜利油田、中原油田、南阳油田和大港油田等单位的领导及专家的大力支持表示衷心感谢。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211工程”建设经费的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中定有许多不完善和欠妥之处,敬请各位专家批评指正。

作者

2008年5月



## 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第一章 数值试井解释理论与方法</b> ..... | 1  |
| 第一节 试井概述.....                | 1  |
| 第二节 试井理论发展历史.....            | 1  |
| 一、测试仪器的的发展历史.....            | 1  |
| 二、试井理论与解释方法的发展历史.....        | 2  |
| 第三节 现代试井解释方法的局限性.....        | 3  |
| 一、均质油藏试井解释模型.....            | 3  |
| 二、试井解释模型的局限性.....            | 4  |
| 三、原因分析.....                  | 5  |
| 第四节 试井解释的本质.....             | 6  |
| 一、从系统分析的角度看试井解释.....         | 6  |
| 二、从油藏建模的角度看试井解释.....         | 7  |
| 第五节 数值试井方法简介.....            | 7  |
| 一、与数值试井有关的基本概念.....          | 7  |
| 二、数值试井的分析步骤.....             | 8  |
| 三、数值试井的技术路线.....             | 9  |
| 四、流线数值试井解释理论与方法.....         | 9  |
| 本章小结.....                    | 11 |
| <b>第二章 流线数值模拟理论与方法</b> ..... | 12 |
| 第一节 流线方法概述.....              | 12 |
| 第二节 流线数值模拟器计算步骤.....         | 13 |
| 第三节 时间步长讨论.....              | 13 |
| 第四节 流线追踪.....                | 15 |
| 一、压力场计算.....                 | 15 |
| 二、速度场计算.....                 | 19 |
| 三、追踪流线的半解析方法.....            | 20 |
| 四、传播时间.....                  | 22 |
| 五、流线追踪时的流量分配.....            | 22 |
| 六、无流线经过网格的处理.....            | 22 |
| 第五节 流线参数计算.....              | 23 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第六节 流线的更新 .....                     | 24 |
| 一、流线更新的必要性 .....                    | 24 |
| 二、流线更新的主要步骤 .....                   | 25 |
| 第七节 网格参数计算 .....                    | 25 |
| 第八节 井的处理方法 .....                    | 26 |
| 一、求解压力场时井的处理方法 .....                | 27 |
| 二、流线追踪时井的处理方法 .....                 | 29 |
| 三、网格参数计算时井的处理方法 .....               | 29 |
| 本章小结 .....                          | 29 |
| <b>第三章 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型</b> ..... | 30 |
| 第一节 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的建立 .....     | 30 |
| 一、生产阶段的渗流数学模型 .....                 | 30 |
| 二、测试阶段的流线数学模型 .....                 | 31 |
| 第二节 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的求解 .....     | 32 |
| 一、生产阶段渗流数学模型的求解方法 .....             | 32 |
| 二、测试阶段流线数学模型的求解方法 .....             | 35 |
| 第三节 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型解的计算方法 .....  | 36 |
| 第四节 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的正确性验证 .....  | 37 |
| 一、均质无限大油藏压降试井模拟计算及结果分析 .....        | 37 |
| 二、均质水驱油藏压降试井模拟计算及结果分析 .....         | 38 |
| 三、非均质油藏压降试井模拟计算及结果分析 .....          | 41 |
| 第五节 单层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的压力响应特征 ..... | 47 |
| 一、污染系数对压力响应的影响特征 .....              | 47 |
| 二、井筒储存系数对压力响应的影响特征 .....            | 47 |
| 三、油水黏度比对压力响应的影响特征 .....             | 48 |
| 四、生产历史对压力响应的影响特征 .....              | 48 |
| 五、井网形式对压力响应的影响特征 .....              | 49 |
| 六、高渗透条带分布形式对压力响应的影响特征 .....         | 56 |
| 本章小结 .....                          | 65 |
| <b>第四章 多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型</b> ..... | 67 |
| 第一节 多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的建立 .....     | 67 |
| 一、生产阶段的渗流数学模型 .....                 | 67 |
| 二、测试阶段的流线数学模型 .....                 | 69 |
| 第二节 多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的求解 .....     | 70 |
| 一、生产阶段渗流数学模型的求解方法 .....             | 70 |
| 二、测试阶段流线数学模型的求解方法 .....             | 70 |
| 第三节 多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的压力响应特征 ..... | 71 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 一、井筒储存系数对试井解释模型压力响应的影响特征 .....           | 71         |
| 二、表皮系数对试井解释模型压力响应的影响特征 .....             | 73         |
| 三、纵向与横向渗透率比对试井解释模型压力响应的影响特征 .....        | 75         |
| 四、存在复杂窜流的多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型特征 .....      | 76         |
| 五、油水两相流多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型特征 .....        | 79         |
| 第四节 多层砂岩水驱油藏流线数值试井解释模型的分层流量响应特征 .....    | 82         |
| 本章小结 .....                               | 84         |
| <b>第五章 复杂近井条件下的流线数值试井解释模型 .....</b>      | <b>86</b>  |
| 第一节 部分射开井的流线数值试井解释模型 .....               | 86         |
| 一、部分射开井的流线数值试井解释模型 .....                 | 86         |
| 二、部分射开井的压力响应特征 .....                     | 87         |
| 第二节 不规则污染井的流线数值试井解释模型 .....              | 91         |
| 一、不规则污染井的流线数值试井解释模型 .....                | 91         |
| 二、不规则污染井的压力响应特征 .....                    | 93         |
| 本章小结 .....                               | 96         |
| <b>第六章 多层砂岩化学驱油藏流线数值试井解释模型 .....</b>     | <b>98</b>  |
| 第一节 多层砂岩聚合物驱油藏流线数值试井解释模型的建立 .....        | 98         |
| 一、生产阶段的渗流数学模型 .....                      | 98         |
| 二、测试阶段的流线数学模型 .....                      | 100        |
| 第二节 多层砂岩聚合物驱油藏流线数值试井解释模型的求解 .....        | 101        |
| 一、生产阶段渗流数学模型的求解方法 .....                  | 101        |
| 二、测试阶段流线数学模型的求解方法 .....                  | 102        |
| 第三节 多层砂岩聚合物驱油藏流线数值试井解释模型的压力响应特征 .....    | 102        |
| 一、单层聚合物驱油藏试井解释模型压力响应特征 .....             | 102        |
| 二、多层聚合物驱油藏试井解释模型压力响应特征 .....             | 106        |
| 第四节 多层砂岩碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型及其求解方法 ..... | 111        |
| 一、生产阶段的渗流数学模型及其求解 .....                  | 111        |
| 二、测试阶段的流线数学模型及其求解 .....                  | 115        |
| 第五节 不同驱动方式试井压力响应特征对比分析 .....             | 116        |
| 本章小结 .....                               | 117        |
| <b>第七章 考虑组分的流线数值试井解释模型 .....</b>         | <b>119</b> |
| 第一节 组分模型 .....                           | 119        |
| 一、基本假设 .....                             | 119        |
| 二、组分模型 .....                             | 119        |
| 第二节 状态方程及相态平衡 .....                      | 122        |
| 一、PR 状态方程 .....                          | 122        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 二、相平衡计算 .....                         | 123 |
| 第三节 组分模型的 IMPES 解法 .....              | 128 |
| 一、有限差分方程 .....                        | 128 |
| 二、累积项的展开 .....                        | 130 |
| 三、产量方程 .....                          | 132 |
| 第四节 考虑组分的流线数值试井解释模型 .....             | 132 |
| 第五节 考虑组分的流线数值试井解释模型离散 .....           | 134 |
| 一、试井解释模型的差分 .....                     | 134 |
| 二、内边界条件的差分 .....                      | 136 |
| 三、外边界条件的差分 .....                      | 137 |
| 四、方程组的矩阵形式 .....                      | 138 |
| 第六节 沿流线组分及饱和度的计算 .....                | 139 |
| 第七节 模拟实例分析 .....                      | 140 |
| 一、基础数据 .....                          | 140 |
| 二、测试模拟 .....                          | 140 |
| 三、测试曲线分析 .....                        | 141 |
| 本章小结 .....                            | 144 |
| 第八章 双重孔隙介质多层油藏流线数值试井解释模型 .....        | 145 |
| 第一节 双重孔隙介质多层油藏流线数值试井解释模型的建立 .....     | 145 |
| 一、物理模型 .....                          | 145 |
| 二、生产阶段的渗流数学模型 .....                   | 145 |
| 三、测试阶段的流线数学模型 .....                   | 147 |
| 第二节 双重孔隙介质多层油藏流线数值试井解释模型的求解 .....     | 148 |
| 一、生产阶段渗流数学模型的求解方法 .....               | 148 |
| 二、测试阶段流线数学模型的求解方法 .....               | 149 |
| 第三节 双重孔隙介质多层油藏流线数值试井解释模型的压力响应特征 ..... | 149 |
| 一、层间渗透率级差对压力响应的影响特征 .....             | 149 |
| 二、弹性储容比对压力响应的影响特征 .....               | 151 |
| 三、窜流系数对压力响应的影响特征 .....                | 152 |
| 本章小结 .....                            | 153 |
| 第九章 水平井流线数值试井解释模型 .....               | 155 |
| 第一节 水平井流线数值试井解释模型的建立 .....            | 155 |
| 一、生产阶段的渗流数学模型 .....                   | 155 |
| 二、测试阶段的流线数学模型 .....                   | 157 |
| 第二节 水平井流线数值试井解释模型求解方法及正确性验证 .....     | 158 |
| 一、生产阶段渗流数学模型的流线求解方法 .....             | 158 |
| 二、测试阶段流线数学模型的求解方法 .....               | 158 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 三、水平井流线数值试井方法的正确性验证 .....        | 158 |
| 第三节 水平井流线数值试井解释模型的压力响应影响特征 ..... | 161 |
| 一、表皮系数对压力响应的影响特征 .....           | 161 |
| 二、井筒储存系数对压力响应的影响特征 .....         | 163 |
| 三、储层相对厚度对压力响应的影响特征 .....         | 164 |
| 四、水平井相对位置对压力响应的影响特征 .....        | 165 |
| 五、渗透率比对压力响应的影响特征 .....           | 165 |
| 六、油水黏度比对压力响应的影响特征 .....          | 165 |
| 七、不同井网形式下的压力响应特征 .....           | 174 |
| 本章小结 .....                       | 179 |
| 第十章 多参数流线数值试井解释方法 .....          | 180 |
| 第一节 数值试井自动拟合解释原理与方法 .....        | 180 |
| 一、自动拟合解释原理 .....                 | 180 |
| 二、修正的最小二乘法 .....                 | 180 |
| 第二节 双种群遗传算法解释原理 .....            | 182 |
| 一、双种群遗传算法总体方案设计 .....            | 182 |
| 二、全局种群的遗传操作设计 .....              | 182 |
| 三、局部种群的遗传操作设计 .....              | 184 |
| 本章小结 .....                       | 185 |
| 第十一章 流线数值试井解释软件编制 .....          | 186 |
| 第一节 概 述 .....                    | 186 |
| 一、设计背景 .....                     | 186 |
| 二、主要性能 .....                     | 186 |
| 三、主要特色 .....                     | 186 |
| 第二节 软件主要功能简介 .....               | 187 |
| 一、地质建模模块 .....                   | 187 |
| 二、生产历史计算模块 .....                 | 187 |
| 三、图形显示模块 .....                   | 188 |
| 四、试井解释模块 .....                   | 188 |
| 本章小结 .....                       | 188 |
| 第十二章 流线数值试井解释软件矿场应用实例 .....      | 189 |
| 第一节 实例一 .....                    | 189 |
| 一、断块地质和开发概况 .....                | 189 |
| 二、流线数值试井解释 .....                 | 189 |
| 第二节 实例二 .....                    | 198 |
| 一、断块地质和开发概况 .....                | 198 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 二、流线数值试井解释 .....  | 198 |
| 第三节 实例三 .....     | 248 |
| 一、断块地质和开发概况 ..... | 248 |
| 二、流线数值试井解释 .....  | 248 |
| 本章小结 .....        | 257 |
| 参考文献 .....        | 258 |

# 第一章 数值试井解释理论与方法

## 第一节 试井概述

要在油气田开发中获得最佳的开采效益,必须建立符合地下实际情况的油藏模型。利用油藏模型和各种油藏工程方法可以模拟各类油气田开发方案和措施方案,准确预测油藏和井的动态特性,为合理开发提供科学、合理的决策依据。建立油藏模型要用到地质数据、地球物理数据、测井数据、岩心分析数据、生产动态数据等,这些必要的数据可通过直接测量(如岩心、地层流体取样等)和解释数据(如地面地震资料、测井、试井及 PVT 分析等)得到。地震资料、测井数据及岩心分析数据可提供油藏的静态描述,只有试井数据能够提供油藏和井的动态信息,它是油藏建模的主要依据。

通过试井分析可得到油藏和井的多种动态信息,包括有效渗透率(地层系数、流动系数)、地层的初始压力或平均压力、近井污染或改善情况、动用储量、油藏的断层及边界、井间的连通情况等。

目前,试井测试技术已在油田普遍应用,并已成为油气田勘探、开发中的主要技术和基础工作之一。由于很多注水油田已开发到晚期以及特殊类型油藏的投入开发,目前的试井理论与解释方法已不能满足实际生产的需要。下面将通过对试井发展历史的回顾及其现状来分析试井中存在的问题。

## 第二节 试井理论发展历史

试井是油气藏工程监测的组成部分,它涉及油藏地质、油藏物理、储层物性、流体性质、渗流理论、最优化理论、计算机技术、测试工艺和仪器仪表等各个方面。试井理论的发展是随着测试仪器的的发展而发展的。

### 一、测试仪器的的发展历史

从半个多世纪前仅能通过记录笔记录井下最高压力的简单的玻璃管压力计开始发展到现在,压力计的设计和制造已十分精细,并日臻完善。由记录、走时和感压三大关键系统组成的机械压力计已能录取井下压力变化的各种特征,测量压力的精度已达到 0.2%,井下工作时间可达到 360~480 h,工作温度达到 150~370 ℃,种类已有几十种之多。



近 40 年来,飞速发展的计算机技术也应用到了试井领域。20 世纪 60 年代末,美国 HP (Hewlett-Packard) 计算机公司研制成功了世界上首个石英晶体电子压力计,测量精度达到 0.025%,灵敏度达到 0.000 14 MPa,采样速度达到每秒 1 个测点。石英晶体电子压力计可遥控测试,井下压力变化可从二次仪表观测,测试时间的长短可根据需要控制,从而显著地提高了试井测试资料的质量及分析的有效性。目前电子压力计产品已有几十种,有的能在地面直接读取井下压力、温度参数,有的可将录取的资料在井下仪器中储存起来,待仪器取到地面后再进行回放。石英晶体电子压力计是目前精度和灵敏度最高的压力计之一。高精度电子压力计的出现进一步促进了试井解释理论的发展,使得试井解释结果的可靠性大大增加,拓宽了试井技术的应用领域。

## 二、试井理论与解释方法的发展历史

在数值试井解释方法之前,试井解释方法的发展历史可分为两个阶段。

### 1. 20 世纪 70 年代以前的常规试井分析方法

20 世纪 40 年代以前,由于压力计只能测试油层的静压,人们也只能认识到静压。之后,发现静压的测取与时间有关,并认识到压力恢复时间的长短反映了井周围地层渗透性的好坏,等等。1933 年 Mocre 等最早发表了利用压力动态数据确定地层渗透率的论文。而 1950 年两篇文章的问世则奠定了试井理论的基础。一篇是 Horner 发表的,提出用图解法解释测试压力资料,即压力恢复值与 Horner 时间的对数为线性关系(Horner 方法)。另一篇是 Miller, Dyes 和 Hutchinson 发表的,提出压力恢复值与关井时间的对数为线性关系(MDH 方法)。这两种方法目前都在使用。一般来说,Horner 方法适用于油田尚未全面开发的新油井,而 MDH 方法适用于已开发一段时间的老油井。这些方法是常规试井分析方法的代表。所谓常规试井分析方法,就是指以 Horner 方法为代表的,利用直线段的斜率和截距反求地层参数的试井解释方法。另外,常规试井分析方法还有 MBH 法、Y 函数法等。

常规试井分析方法主要用以分析各向同性的均质油藏的测试资料,其优点是理论上较为完善、原理简单、易于实际应用。但是常规试井分析方法也存在多种缺点,例如:

(1) 常规试井分析方法以分析中、晚期压力资料为主,这就要求油井测试时间较长,从而影响生产。尤其是对于渗透率很低的油藏,要取得中、晚期的测试资料更为困难。

(2) 应用常规试井分析方法时,直线段的选择将影响后面的解释结果,但方法中对此只能人为选择,从而不可避免地产生一些误差。

(3) 常规试井分析方法对早期数据分析不够,无法准确估算井筒储存的特性。

(4) 常规试井分析方法有时获取的数据有限,给油藏模型的识别带来一定的困难,有时同一条曲线形状反映出的却是不同油藏模型的特征。

### 2. 20 世纪 70 年代以后的现代试井解释方法

从 20 世纪 60 年代末发展起来的现代试井解释方法在一定程度上克服了上述问题。这些方法的原理是从原始的油藏模型着手,重新建立考虑各种边界条件的数学模型,用解析方法或半解析方法求解数学模型,并绘制分析用的试井解释图版。例如,1969 年 H. J. Ramey 发表论文提出无限大均质地层中一口具有井筒储存和表皮效应井的典型曲线,后来 A. C. Gringarten 对该图版进行了修正,使得图版具有了更广泛的适用性,减小了解释的多解性;1976 年 A. C. Gringarten 等发表了具有垂直裂缝井的典型曲线的论文;1980 年