

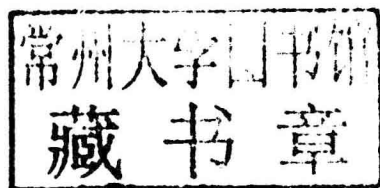
多相流数值试井 理论及方法

张烈辉 向祖平 刘启国 编著

石油工业出版社

多相流数值试井理论及方法

张烈辉 向祖平 刘启国 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了传统不稳定试井分析原理与方法和非结构化正交网格（PEBI 网格）生成算法；分别论述了基于 PEBI 网格的油气水三相流和气水两相流数值试井模型的建立与求解；讨论了油气水三相流、气水两相流和油水两相流数值试井原理与方法；探讨了基于遗传算法的试井自动拟合原理；最后介绍了多相流数值试井软件的设计与主要模块的功能。

本书可供从事复杂油气藏试井工作的石油矿场科研工作者使用，也可作为石油高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

多相流数值试井理论及方法/张烈辉等编著.

北京：石油工业出版社，2010.10

ISBN 978-7-5021-8024-9

I. 多…

II. ①张…②向…

III. 多相流动-数值计算-应用-试井

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 180051 号

出版发行：石油工业出版社

（北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011）

网 址：www.petropub.com.cn

编辑部：(010) 64523580 发行部：(010) 64523620

经 销：全国新华书店

印 刷：中国石油报社印刷厂

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：11.5

字数：272 千字

定价：40.00 元

（如出现印装质量问题，我社发行部负责调换）

版权所有，翻印必究

前 言

常规试井解释方法主要用于单相流体产出的井，即产出流体为液体或气体。多数油井虽然在地面以油或气的形式产出，但在油藏条件下却呈单相状态；气井地面产水时，则是按一定条件将水折合成气体体积来处理。因此，这些情形依然可以采用通用的试井解释理论与方法。但常规试井解释理论与方法对于多井系统、平面非均质性、复杂边界、复杂井网、多相流等问题存在局限性和难度。

油气藏多孔介质中多相流体同时流动的现象十分普遍，特别是在油气藏开发中后期。例如，溶解气驱油藏衰竭开发，当地层压力低于饱和压力时，储层中便呈油、气两相流动；如果有地层水产出，则储层中呈油、气、水三相流动。在反凝析气藏中，当地层压力低于露点压力时，便出现油气两相流，同时如果有地层水产出，则地下依然呈三相流动。多相流动时，在井筒中会出现相分离现象。在储层中，每一相都有减少其它相流动能力的趋势，各相的有效渗透率由于另一相的存在而低于单相流体流动时的渗透率。每一相的相对渗透率是饱和度的函数，随时间和空间而变化。例如，溶解气驱油藏，当井底流动压力低于饱和压力时，则气相出现，气体饱和度增加导致近井带原油的有效渗透率降低，流动能力降低。多相流动时，表皮系数与产量是相关的，不同流动阶段有不同的表皮系数值。显然，储层中的多相流体流动机理远比单相流体流动更复杂，涉及的因素更多。到目前为止，在多相流试井解释研究方面都是对多相流的特征进行简化，如假设三相流体在储层中均匀分布、饱和度恒定不变且与压力无关、忽略毛管压力等。这些假设对于存在多相流体流动的真实油气藏是难以满足的，多相流数值试井理论因此而发展起来，其建立在能够更加精确地描述地层中多相流体流动数学模型的基础上，能够更准确地求解地层参数，反映地层真实情况。

本书共分十章，内容包括传统不稳定试井分析原理与方法；非结构化正交网格（PEBI 网格）生成算法；基于 PEBI 网格的油气水三相流和气水两相流数值试井模型的建立与求解；油气水三相流、气水两相流和油水两相流数值试井原理与方法；基于遗传算法的试井自动拟合原理等。第一章、第三章至第八章

由“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室的张烈辉教授和中国石化西南油气分公司向祖平博士后编写，第二章由“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室的刘启国教授编写，第九章由向祖平博士后、张烈辉教授和刘启国教授编写，第十章及附录由向祖平编写。

作者编著本书的初衷是希望对数值试井理论及方法方面的知识做些探索。本书中对非结构化正交网格（PEBI 网格）生成算法及其在此基础上的多相流数值试井模型的建立和数值试井模型的求解及基于遗传算法的自动拟合原理方面作了详细探讨，希望对从事复杂油气藏试井工作的科研工作者能有所帮助。

本书在编著过程中，因时间仓促，个别参考文献可能漏列，也有一些资料出处未列。同时，因作者水平有限，书中难免存在一些缺点和不足之处，恳求读者批评指正。

在本书编著过程中，得到了有关专家热心指教；得到了西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室及石油工业出版社的大力支持，在此一并致谢！同时也感谢国家重点基础研究发展计划（973 计划）（课题编号：2006CB705808）和国家“十一五”重大专项（编号：2008ZX05054）的支持！

编著者

2010 年 6 月于成都

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 试井理论与方法的发展现状 | 1 |
| 1.2 传统试井理论与方法的局限性 | 2 |
| 1.3 数值试井的提出 | 3 |
| 1.4 本书的内容构成 | 4 |
| 2 传统不稳定试井分析原理与方法 | 10 |
| 2.1 试井分析理论基础 | 10 |
| 2.2 试井解释模型 | 22 |
| 2.3 常规试井分析方法 | 24 |
| 2.4 现代试井分析方法 | 40 |
| 2.5 试井解释过程 | 45 |
| 3 多相流数值试井数学模型 | 48 |
| 3.1 油气水三相黑油模型 | 48 |
| 3.2 气水两相黑油模型 | 50 |
| 3.3 模型中的流体性质 | 50 |
| 3.4 模型中的岩石性质 | 51 |
| 4 非结构化网格剖分理论 | 53 |
| 4.1 基本概念 | 53 |
| 4.2 PEBI 网格生成算法 | 54 |
| 4.3 局部网格特殊处理 | 58 |
| 4.4 PEBI 网格生成实例 | 58 |
| 4.5 2D 和 3D 图形设计 | 59 |
| 5 油气水三相流数值试井的数值模型 | 62 |
| 5.1 油相方程的离散 | 62 |
| 5.2 水相方程的离散 | 66 |
| 5.3 气相方程的离散 | 68 |
| 5.4 油气水三相流数值试井的产量模型 | 71 |
| 5.5 网格误差分析 | 81 |
| 6 气水两相流数值试井的数值模型 | 90 |
| 6.1 气相方程的离散 | 90 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 6.2 | 水相方程的离散 | 92 |
| 6.3 | 气水两相流数值试井的产量模型 | 94 |
| 6.4 | 产量模型的耦合 | 98 |
| 7 | 油气藏模型的初始化 | 101 |
| 7.1 | 典型的油气藏初始饱和度及压力分布 | 101 |
| 7.2 | 油气藏模型的初始化 | 102 |
| 8 | 多相流数值试井模型的求解 | 109 |
| 8.1 | 初始参数场 | 109 |
| 8.2 | 系数矩阵的形成 | 109 |
| 8.3 | 线性方程组的求解方法 | 114 |
| 8.4 | 迭代解法的收敛性分析 | 120 |
| 9 | 多相流数值试井模型 (NWT) 的校验与敏感性因素分析 | 122 |
| 9.1 | 单层均质纯油藏数值试井 | 122 |
| 9.2 | 油气水三相流数值试井 | 126 |
| 9.3 | 气水两相流数值试井 | 132 |
| 9.4 | 与常规试井方法的结合 | 137 |
| 9.5 | 气水两相流数值试井敏感性因素分析 | 138 |
| 9.6 | 油水两相流数值试井敏感性因素分析 | 151 |
| 10 | 多相流数值试井曲线的自动拟合及参数解释 | 158 |
| 10.1 | 试井自动拟合分析方法概述 | 158 |
| 10.2 | 试井自动拟合基本原理 | 159 |
| 10.3 | 试井自动拟合的计算方法 | 159 |
| 10.4 | 试井自动拟合分析的实现步骤 | 165 |
| 10.5 | 计算实例 | 166 |
| 附录 | | 169 |
| 附录 A | 符号说明 | 169 |
| 附录 B | 多相流数值试井 (NWT) 软件介绍 | 171 |
| B.1 | NWT 软件设计思想 | 171 |
| B.2 | NWT 软件简介 | 171 |
| B.3 | NWT 软件结构及流程 | 171 |
| B.4 | NWT 软件主要模块功能 | 174 |
| 参考文献 | | 175 |

1 绪论

油气井试井分析是油气藏工程中油气藏动态描述、动态监测的重要研究内容和手段，已成为油气勘探开发工作中的一个重要组成部分。本书主要探讨复杂的试井数学模型的快速、高效数值求解问题，即数值试井问题，同时研究基于遗传算法的自动拟合试井分析理论，利用数值试井模型来分析多相流试井的一般规律，并指导油田的生产实践。

1.1 试井理论与方法的发展现状

20 世纪 50 年代以来，试井已成为人们认识油藏的重要手段。随着现代科技的发展，特别是进入 80 年代以来，计算机技术的发展以及有效的试井分析新方法的提出，极大地丰富了试井解释功能，有效地提高了分析结果的准确性。

1.1.1 国内发展现状

国内的试井工作开始于 20 世纪 50 年代，主要工作有两方面^[1]：一是测压工作，二是系统试井。到了 60 年代大庆会战期间，我国的试井工作才真正开展起来，主要工作有系统试井和压力恢复试井。从 80 年代开始，引进了国外试井软件和电子压力计，我国试井技术出现了质的飞跃，试井解释从手工画直线分析发展到计算机辅助试井解释、地质模型诊断，一些大学和油田公司合作研制了国产试井解释软件，并在 1987 年几乎同时推出三套试井软件，使得我国的试井工作得到了飞速的发展。

在试井理论方面集中了国内外的许多最新的研究成果。

理论模型方面的研究主要有：储层性质（均质、双孔、双渗、多重介质、多层介质、复合介质、低渗地层等）、流体性质（单相流、两相流、三相流）、井筒条件（即内边界条件，油井的井储、表皮、相态分布、变井储、变表皮；有积液的气井和酸化、压裂措施井）、外边界条件（无限大、定压边界和各种形态的封闭边界）、井别（生产井、注水井）、井型（直井、水平井、斜井和丛式井）。

解法的研究有：解析解法、数值解法（差分法、有限元法、边界元法等）、半解析方法（Laplace 变换法和数值反演法综合应用）。另外还应用分形理论、小波理论等研究试井问题。

国内在数值试井方面的工作起步比较晚，还处于萌芽阶段，目前基本上还没有成熟的数值试井方面的软件推出。国内的一些学者和专家也做了一些理论上的初步探讨，比如石油大学的刘立明、陈钦雷等人曾做了油水两相渗流压降数值试井的一些工作^[2]和单相流数值试井工作^[3,4]，还有中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院的胡勇、钟兵等人做了气水两相并筒—地层组合数值试井模型的建立和求解工作^[5]。

1.1.2 国外发展现状

国外的试井工作从 20 世纪 50 年代以来无论是硬件还是软件都得到了突飞猛进的发展。

硬件方面^[6]：70 年代国外开始使用电子压力计逐步代替精度较低的机械压力计，使测得的数据点更密集，数据更准确，而且可测得关井瞬间的初始段数据，能获得一条早期、中期、晚期同时存在的完整实测曲线，在硬件上有了一个质的飞跃。

试井理论方面^[6]：1951 年 Horner 提出半对数直线分析方法，直到现在仍在使用。它的成功在于具有实用性和扎实的理论基础。后来又发展了 MDH、MBH 等常规试井分析方法，他们都是对 Horner 法的改进和完善。1970 年 Ramey 教授提出图形拟合方法——双对数拟合法，这种方法具有划时代的意义。但这种方法的致命缺点是曲线形态非常相似，多解性较难解决。后来又发展了 Mchlinley 图版法、Earlougher 图版法。Bourdet 在 1983 年提出了压力导数方法并与 Gringarton 合作形成新的 Gringarton 图版，对诸如饱和度、渗透率、原始地层压力、地层表皮系数等油藏特性及井筒存储系数进行分析的图版拟合更显示了强劲的实力。由于常规的基于视觉检验的图版拟合方法比较简单易行，对硬件设备的要求不高，解释周期较短，所以长期以来，这种试井方法一直是试井问题分析的主流。

从 1984 年以来，Gringarton 提出了计算机辅助下的试井分析，并且分析软件同时问世。特别是计算机技术和硬件的飞速发展，使得国外的数值试井工作也得到了飞速的发展。到目前为止，已开发了很多的试井软件，比如 SSI 公司的 Workbench 试井软件、WTSOFTWARE 公司的 Fast 试井分析软件、EPS 公司的 PanMesh 试井解释软件、KAPPA 公司的 SAPHIR 试井解释软件等，这些国外软件模型丰富，功能强大，商品化程度高，并具有生产系统分析等拓展试井资料应用范围的功能。近年来，新推出数值试井解释版本，考虑了多井生产的影响，三维视觉效果使地质模型更接近实际，试井分析成果更具实际意义。

1.2 传统试井理论与方法的局限性

试井在油藏工程领域占有十分重要的地位。它是一种以渗流力学理论为基础，以各种测试为手段，通过对油、气、水井生产动态的测试来研究测试井的各种特性参数和油、气、水的生产能力，以及油气水层之间、井与井之间的连通关系的方法。随着微电子技术的不断发展，测试仪器记录精度的提高和计算机的广泛应用，试井分析方法的发展出现了明显的阶段性。可以简单地归纳为^[2]：（1）以半对数直线段分析为基础的常规试井分析方法；（2）利用压力时间双对数曲线的特征来分析油藏特性的现代试井分析方法；（3）参数自动拟合分析；（4）包括人工智能、神经网络、混合人工智能与神经网络等方法在内的智能分析方法；（5）以捕捉特征点为主要手段的变形拟合法；（6）数值试井解释方法。但无论试井理论和方法如何发展，直至数值试井在 20 世纪 90 年代初被提出以来，解析求解的方法一直是试井数学模型求解的唯一方式。目前传统试井理论与方法仍存在许多有待进一步解决的问题：

（1）试井分析方法方面。尚不能摆脱利用常规或双对数典型曲线图版拟合法求油气藏参数的分析过程。

（2）试井理论方面。随着油田开发的深入，三次采油阶段的开始，出现了许多急需解

决的复杂井的试井问题,如抽油井的试井分析、聚合物驱试井分析、多相流试井分析、非均质油藏的试井问题等。油藏模型精细描述的需求和复杂油藏的出现,同样要求建立更为完善的试井分析模型。

(3) 试井解释成果的综合利用。通过试井解释所获得的地层平均渗透率,目前得到了一定程度的利用。但不同井、不同时期、不同区块的试井资料之间有什么异同点?能说明什么问题?能解决什么问题?这些问题都值得从深层次上加以二次分析。这不但是理论发展的需要,也是很具有实用价值的工作。

(4) 多相流试井的控制方程非常复杂,一般情况下是没有解析解的。目前人们主要在常规油藏试井分析方法的基础上简化多相流试井模型,而常规油藏试井分析所用的公式是在单相流动情况下推导出来的近似公式,有可能掩盖多相流试井曲线的一些重要特征,而使试井解释产生较大偏差,不能得到精确解,因此这些近似公式能否应用到多相流中还值得研究。

1.3 数值试井的提出

随着试井理论和应用技术的发展及计算机技术的发展,对于均质油藏模型范畴的试井设计和分析已经较为容易实现,而且解释结果与实际情况的符合程度也很高。但是对于复杂、多变的非均质油藏的试井问题以及多相流试井的问题,目前尚无公认可行的办法。研究表明,针对复杂的试井问题如果采用求解析解的方法不太可能得到满意的结果,因此提出了数值试井的思想。特别是进入20世纪80年代以来,计算机技术及各种硬件技术的发展,以及有效的试井分析新方法的提出,极大地丰富了试井解释功能,有效地提高了分析结果的准确性。因此,用数值方法来解决试井问题是可行的,并能够提供更精确的解。

多相流试井是促进数值试井理论发展的主要源动力^[7]。20世纪90年代以来,多相流试井问题已成为摆在石油工业面前日益紧迫的问题,并陆续开始有学者在做试井问题的数值分析工作。

数值试井理论发展的另一个主要源动力是复杂边界问题和非均质问题^[2]。特别是复杂边界问题,用数值试井的方法可望得到很好的解决。试井分析技术发展现阶段,对于均质油藏、单相渗流范畴的试井设计和分析已经较为容易实现,但是对于复杂、多变的非均质油藏的试井问题以及多相流试井问题,目前尚无公认可行的解决办法。由于复杂形状油气藏、非均质油气藏、多相流动油气藏等相对于均质单相流问题而言,存在涉及因素多,复杂程度急剧增加,分析求解简化条件太多等问题。即使可以通过数值求解的办法去解渗流方程,再作一些图版出来,考虑到问题的复杂性,这也是相对繁琐的,其实际运用大大地受到限制。从某种意义上说,分析求解生成典型图版,再根据实际曲线与典型曲线的拟合情况得出油藏基本参数和油藏信息的传统的试井分析的思路制约了试井技术的进一步发展。

利用数值方法解决试井问题,拓宽了试井分析的内容,特别是为多相流试井问题的解决提供了一条新途径,并期望能够得到更加精确的解。因此,数值试井的研究不仅具有重要的理论价值,而且具有重要的实际意义。

1.4 本书的内容构成

数值试井理论研究涉及的内容主要包括六个部分：网格剖分、数值试井数学模型的建立、离散数值模型、产量模型、参数解释、具体问题的一般规律。对于数值试井问题的研究首先必须有一套合适的网格，此网格要既能描述和反映开关井后压力的细微变化，又能兼顾较高的计算效率。

1.4.1 三维数值试井模型的建立

自试井分析方法提出以来，人们针对各种不同的油气藏以及油气藏的不同地质条件提出了各种各样用于解决实际问题的试井模型。典型的试井模型有：均质油气藏试井模型，非均质油气藏试井模型^[8]。其中非均质油气藏试井模型又包含双重孔隙介质油气藏、复合油气藏和多层油气藏试井模型等。试井模型根据边界条件的不同又可分为：（1）内边界条件，通常考虑的因素有井筒储集效应、表皮效应、裂缝切割井筒；（2）外边界条件，常见的有无限大地层（无外边界）、不渗透边界、恒压边界、封闭边界等。对于不稳定试井还必须加上油气藏处于原始状态下的初始条件。

以上这些模型都是针对单相流的情况提出来的，多相流动的情况下，为了求得解析解，也是通过一些办法简化成单相来处理的。多相流数值试井则主要针对多相流体渗流，不对微分方程作过多简化，以便更加真实地反映地层流体的流动状况，并以油藏数值模拟为技术手段，将使用最广泛的黑油模型^[9,10]作为多相流数值试井数学模型的基础。

黑油模型是以油、气、水三相三组分为假设前提建立起来的三维油藏模型。它不仅能模拟油气藏的一次、二次采油过程，而且稍加改进就能模拟双孔单渗，乃至双孔双渗问题。此外，如果与相态软件包结合，它还可以用于模拟凝析气藏，反映开发过程中的凝析和反凝析现象，而且计算工作量并不明显增加。因此，黑油模型是迄今为止应用最广泛、最为成熟的模型，大约可以处理75%以上的油气藏模拟问题。

在黑油模型的基础上，对井产量项的耦合加以改进，将试井问题中的井筒储集和表皮效应更加准确的反应到模型中去，以黑油模型和产量耦合模型作为三维数值试井模型。数值试井模型中又包括油气水三相流模型和气水两相流模型，由于地面产量控制的不同，油气水三相流和气水两相流模型的产量模型也有较大差异。

1.4.2 网格剖分

既然数值离散要求将微分意义上连续的物理关系近似地表示成有限个相互联系的、具有一定体积和时间单位的单元体（或节点）间的物理关系，如何构建这些单元体就成了用数值解法求解基本渗流方程的首要任务。构建单元体的过程就是所谓的网格剖分或空间离散。通过网格剖分，将当前研究的整个物理空间分为若干个小的单元体。

数值解法之所以能够用来解基本渗流问题，是源于一个重要的假设：单元体上任意一点的物理性质（对于渗流问题来说，就是压力、油饱和度、水饱和度、气饱和度等）可以利用单元中心点的值及其相邻单元中心点的值用线性插值的方法来求得，这样做引起的误差不

会发散。这也是任何一种数值解法求解问题的基本前提之一。

以上假设同时决定了在网格剖分中必须注意到数值精度的问题,很显然,单元体的体积越小,线性插值的精度越高,在其他条件相同的情况下,就越有可能获得较高的数值精度,但这显然是以牺牲计算效率为前提的。因为单元体积变小,就意味着单元数目的增加,这样会大大增加计算量,减小数值计算的效率。从这个意义上来说,数值计算的精度与效率是一对矛盾体。在这一点上,网格剖分的时候选择合适的网格类型是非常重要的。

长期以来,人们一直试图通过改变网格结构来解决上述矛盾,并由此提出了许多网格种类。网格剖分技术^[8,11]已经有几十年的发展历史了。到目前为止,结构化网格技术发展相对比较成熟,而非结构化网格技术由于起步较晚,实现起来比较困难等方面的原因,现在正在处于逐渐走向成熟的阶段。下面我们简要介绍一些这方面的发展情况。

1.4.2.1 结构化网格

从严格意义上讲,结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元。结构化网格有以下优点:

- (1) 它可以很容易地实现区域的边界拟合,适用于流体和表面应力集中等方面的计算;
- (2) 网格生成的速度快;
- (3) 网格生成的质量好;
- (4) 数据结构简单;
- (5) 对曲面或空间的拟合大多数采用参数化或样条插值的方法得到,区域光滑,与实际模型更容易接近。

这种网格最典型的缺点是适用的范围比较窄。尤其是随着近几年的计算机和数值方法的快速发展,人们对求解区域的复杂性的要求越来越高,在这种情况下,结构化网格生成技术已明显不能满足实际的需求。目前,油气藏模拟计算中广泛采用的结构化网格主要有全局正交网格和局部加密网格。

1.4.2.2 非结构化网格

与结构化网格的定义相对应,非结构化网格是指网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元。即与网格剖分区域内的不同内点相连的网格数目不同。从定义上可以看出,结构化网格和非结构化网格有相互重叠的部分,即非结构化网格中可能会包含结构化网格的部分。

非结构化网格技术从20世纪60年代开始得到了发展,主要是弥补结构化网格不能解决任意形状和任意连通区域的网格剖分的缺陷。由于非结构化网格的生成技术比较复杂,随着人们对求解区域的复杂性的不断提高,对非结构化网格生成技术的要求越来越高。从文献调查的情况来看,非结构化网格生成技术中只有平面三角形的自动生成技术比较成熟(边界的恢复问题仍然是一个难题,现在正在广泛讨论),平面四边形网格的生成技术正在走向成熟。而空间任意曲面的三角形、四边形网格的生成,三维任意几何形状实体的四面体网格和六面体网格的生成技术还远远没有达到成熟。需要解决的问题还非常多,主要的困难是从二维到三维以后,待剖分网格的空间区域非常复杂,除四面体单元以外,很难生成同一种类型的网格。目前,油气藏模拟计算中常采用的非结构化网格有混合网格、角点网格、有限元网格、局部正交网格^[3]。限于篇幅,本书仅讨论局部正交网格^[3]。

狭义上的局部正交网格是指佛德罗意网格 (Voronoi Grid) 或 PEBI 网格 (Perpendicular BI - sectors)。PEBI 网格的灵活性和局部正交性使其区别于目前的大多数网格。自 1908 年提出来以后, 局部正交网格在科技、工程领域得到了广泛的应用。PEBI 网格定义了这样一个空间区域: 在此空间区域内的任意一点到网格中心点 (节点) 的距离均小于此点到其它节点的距离。在此定义下, 任意两节点之间的连线必然被两节点所在网格边界所垂直平分。

由于 PEBI 网格对空间的离散具有很大的灵活性, 很容易用它来构建混合网格和局部加密网格, 与此同时, 油井以及重要的地质特征也可以得到比较精细的描述。油藏数值模拟研究的经验表明^[8], 它对于复杂形态的油藏描述较为灵活, 模拟结果较为准确, 可减小网格的取向效应。PEBI 网格及由此而衍生的混合网格具有一个重要的缺陷, 即由此网格而产生的离散控制方程的系数矩阵的结构非常复杂, 通常不具有规律性。因此, 必须有相应的线性代数方程组的求解方法与之相适应。

PEBI 网格的生成有两种方法: 直接方法和间接方法。两者的区别在于间接方法中存在着三角形剖分的过渡。即在生成 PEBI 网格前, 间接方法需先生成三角形网格, 再在三角形网格的基础上生成 Voronoi 对偶图^[12-16]。相比较而言, 间接方法更能随形就势, 更具有灵活性和随意性, 阵面推进法 (Paving) 是一种较为有效的三角形剖分方法。控制线方法的原理是将整个剖分区域划分为一系列假想的包围控制线的子区域, 在不同的子区域内, 令两节点构成三角形的一条边, 第三个节点的位置由已知两节点的位置来确定。控制线法的算法灵活性很大, 剖分出来的三角形区域也不一定能保证 Delaunay 条件 (病态三角形)。张来平等^[17]提出的弹性平滑和对角线交换技术经实践证明能达到较好的效果。

1.4.2.3 网格自动剖分技术

需要指出的是, 除了全局正交网格这样很规则的网格剖分勉强可以直接用手工来完成以外, 其他类型的网格基本上不可能用手工来完成。由此产生了网格自动剖分技术。网格自动剖分技术的基础是计算几何, 即平面或空间几何图形的数学描述。网格的自动剖分技术可以分为两类: 直接方法和间接方法。间接方法生成的网格是在其它过渡类型网格之上生成的。譬如生成 PEBI 网格的间接方法就是先生成三角形网格, 而后再作网格连线的垂直平分线。值得一提的是, 在非结构网格剖分技术中, 由于在 PEBI 网格和有限元网格中均用到三角形剖分, 所以三角形剖分在油藏数值模拟的网格剖分中占有很重要的地位。

空间网格剖分还需要考虑如下因素: 油气藏大小和地质参数; 流体驱替类型; 期望达到的精度; 可用的模拟软件; 模拟研究的目的; 计算机资源、时限和经费等。油气藏数值计算的早期, 网格数量往往是由后面的几个因素决定的。随着油气藏数值模拟研究和计算机的发展, 网格的选择范围得以较大的放宽。

网格自适应问题与网格的精度和计算效率息息相关。自适应问题在线弹性力学问题中得到了广泛的应用。近年来关于有限元解法的自适应算法的文献很多, 基本思想大致相同, 大多数引用了 Zienkiewicz - Zhu 的误差估计方法来对单元的局部误差进行分析, 通过误差分析的结果, 结合具体工程实际给定的误差上下限, 来判断是否应对单元进行加密或粗化处理。

迄今为止, 采用的网格技术大致有: 全局正交网格、局部加密网格、混合网格加密、角点网格、局部正交网格、控制体有限元网格、混合有限元法、动态网格加密、网格自动剖分技术。无论采用何种网格和技术, 目的不外乎以下几点: 使网格间流动关系易于计算 (正交网格)、较好

逼近流动形态（网格加密，混合网格）、较好近似复杂边界（角点网格，PEBI 网格）、计算效率高、计算精度高等，最终还是为了在提高计算效率的同时尽可能地提高计算精度。

1.4.3 离散数值模型

选取一套合适的网格剖分油气藏区域，用数值方法求解复杂的试井数学模型，必须将数学模型在选定的网格系统下离散，建立试井的离散数值模型，这样才能进行数学模型的计算求解工作。

针对不同网格系统，数值离散的方法差别较大。在结构网格上，通常采用有限差分格式，即用差商来代替微商，最终把微分关系用一个代数关系式来代替；在非结构网格上，可以用有限元方法或者有限体积方法建立数值格式。每种数值离散方法通常都要求特定的网格系统，不同网格上建立数值格式的思路也有比较大的差异，因此，在结构网格上的离散方法，不能用在非结构网格上。例如，采用结构化网格时，需要用到坐标变换，在变换后的坐标系中，建立新的微分方程，并对这个新的方程做通常的数值离散，最具有代表性的就是 Beam - warming 隐式因式分解法^[18]；采用非结构网格时，如三角形网格或四面体网格，也可以是非结构的四边形网格，离散过程不需要对微分方程做坐标变换，因此可以用于复杂区域内微分方程的数值求解，如经典的有限元方法^[19,20]和有限体积方法^[21]。由于其在处理复杂区域上的通用性，商用的数值计算软件通常都是采用基于非结构网格的数值格式。一般说来，不论从网格的生成上还是数值格式的实现上，使用结构网格都要简单得多。因此，各种数值计算方法通常都是首先在结构网格上通过有限差分方法得到的，其中的一些可以在非结构网格上实现，但由于非结构化网格的复杂性，大部分则难以实现。

本书中将针对 PEBI 网格局部正交特性，结合地层流体渗流的达西定律，用有限差分方法分别将油气水三相和气水两相流数学模型离散化，建立相应的数值计算模型。在离散试井数学模型的过程中，还必须要考虑离散的精度问题，但无论数值方法能达到何种精度，它都是一个近似的方法。数值计算的稳定性等问题是空间离散时要考虑的另外一个问题。Puchyr P. J. 等人^[22]在文献中对其工作做了较为详细的介绍，虽然 Puchyr P. J. 的工作针对的是单相流试井问题，但他的工作却能为研究其它试井问题提供很多有益的借鉴。因为数值试井与一般数值模拟相比，要求的精度高，所以对网格大小、时间步长以及网格类型的确定都提出了严格的要求。他在对单相流数值解进行分析的基础上，提出了：（1）外边界的概念。即使测试的油藏存在外边界，也必须确定这样的一个外边界：在整个模拟时间内，此边界上压力的变化应小于某一个给定的容许值。网格剖分应该在这样的外边界之内进行。（2）井眼和油藏的结合方法。当表皮系数大于零时，可采用无穷小表皮的概念；当表皮系数小于零时，可考虑采用复合油藏的模型进行研究，在表皮区内，孔隙度不变，提高渗透率；这种处理表皮系数的方法，比分析求解中采用扩大井眼半径的方法得到的解要精确一些。（3）近井眼网格块尺寸和时间步长的选择。首先应确定井眼处压力变化的范围，根据这个变化范围及实际情况限定每一时间步长内的压力变化，再定出合适的时间步长，由这个时间步长再求出网格块尺寸。

1.4.4 产量模型

电子压力计一般采集到两组数据：随时间变化的压力和温度。其中温度数据所起的只是

参考作用，压力则是作为试井解释的主要输入量，通过分析压力曲线的形态和具体位置便可以得到地层的参数，基于这个考虑，数值试井模型的输出应该是压力（理论解）。也就是说，既然实际测试只能提供压力与之对比，数值试井的输出也就只能是压力。

另一方面，数值试井模型的输入至少要包含压力或产量中的一个。既然压力必须作为输出指标，我们必须给定产量。这个产量如何给定？这是一直困扰着从事数值试井研究工作者的问题。在压力恢复或压力降落的过程中，虽然井口产量可以控制为恒定，但井底续流量是不断变化的。除非我们能比较准确地给出产量与时间的关系式，否则，即使数值模拟器计算的精度再高，也是枉然。曾有人利用指数关系式作过压力恢复的研究。这里边，至少有两点值得商榷。（1）产量果真是指数式变化的吗？压降与压恢的产量具有某种对应性吗？或者说，形式相同吗？（2）这样给定产量通常意味着将油气水井作为点源（汇），以丘比公式来联系油气井网格块压力与井底压力。但丘比公式是一个拟稳态生产条件下的公式，试井过程不满足这点约定。还有一个随之而来的问题，指数关系式各项常数与传统的井筒参数之间有什么对应性呢？换句话说，已知一个量，如何去求另外一个量呢？这些问题决定了数值试井模型绝不是油气藏数值模拟的简单翻版。

因此在数值试井中必须辅以精确的产量模型，并使之与数值试井模型耦合起来，这样才能精确描述地层中流体的流动和地层流体向井筒的流动以及井筒内压力的变化情况。数值试井产量模型应反映井底续流量和井底流压的实际变化情况，其中包括井筒储集效应和表皮效应的影响。

1.4.5 参数解释

Padmanabhan L 曾经证明，试井分析中的参数估计问题是病态问题；而且，各拟合参数之间的相互依赖性很强，所以，很多常规的优化方法都不能解决这个问题。多年以来石油工业运用历史拟合算法的经验使许多研究者认为这个技术不太实际，因此，在这个领域进行研究的人数急剧下降。但近年来，在这两个方面都有了很大的发展。目前，见诸报道的历史拟合方法主要有以下几种：迭代估计方法、非线性最小二乘法、改进牛顿法、高斯—牛顿法、多指标拟合、拟牛顿法或变量标准法、模拟退火法。另外，文献还提到了研究用脉冲光谱技术、梯度法、单纯形法等进行历史拟合研究。对于不易量化的参数，如断层、油藏边界等，直接扰动法可能要比其它方法要来得简单容易。智能方法现在发展也比较快，混合方法可能是一个很好的研究方向。

从具体操作上讲，目前试井工作者主要采用半自动方式进行试井曲线的参数拟合，也就是先给定目标参数的一定范围，让试井软件自动寻优，进行初步拟合，此时得到的解不一定是最优解；然后再手动调节参数值进行拟合。这样得到的解人为因素太大，分析结果存在不唯一性的问题。随着计算机技术的快速发展，人们一直在探索运用计算机自动拟合技术快速准确地求出试井资料的有关参数，以解决试井分析结果的多解性问题。针对数值试井问题的自动拟合目前还没有有效的方法，人们将具有十分顽强鲁棒性的遗传算法引入到试井分析中来解决数值试井的自动拟合分析问题。遗传算法用种群作为基本单位，采用不同的基本算子进行搜索，随时间的增加趋于稳定，不受初始解的影响，而且不因实例的不同而蜕变，因此遗传算法采用了许多独特的方法和技术，可以很好地解决数值试井中的自动拟合问题。

1.4.6 数值试井的一般规律

数值试井所要面临的首要问题是解决多相流试井问题。描述多相流的方程是高度非线性的，在不作较大简化的情况下，没有解析解。现有的方法是在假设、简化后得出来的。在目前关于多相流试井分析的文献中，主要有三类：（1）拟压力法。拟压力法始终围绕着 $\int_p^{p_e} \frac{K_r}{\mu_o B_o} dp$ 这个积分式开展工作。很多研究者作了大量的工作^[7,22-26]。而关于不稳定流、拟稳态流和稳态流下的关系式则是 Fetkovich 通过对气体和微可压缩流体流动进行类比分析后给出的。Fetkovich^[27] 公式中，油相产量与拟压力函数之差成正比关系。Fetkovich 公式与此前工作的显著进步就在于考虑了表皮系数的影响。此表皮系数不但包括近井带的污染，而且包括由于饱和度的增加而引起的附加阻力。Raghavan^[28,29] 正是在 Fetkovich 的基础上推导除了拟压力试井的分析方法。（2）压力法。此方法是 Perrine^[30] 提出来的。Perrine 方法的基本前提是假定地层各相饱和度分布均匀，忽略饱和度梯度的变化。就 Perrine 提出的方法，很多文献进行了广泛的讨论。此后 Weller 和 Earlougher 等人^[31-33] 又用数值的方法对多相流压力恢复过程进行了模拟，证明了其方法的正确性。但是，Weller 同时也指出，若气相饱和度增加，这种分析方法的可靠性有待检验。还有学者研究过压力法对油水两相系统中饱和度梯度的敏感性。他们认为，用压力法可以得到一个较好的流度的估计。但是，只有在饱和度分布一致的情况下才可能分析单相的流度。Ayan 和 Lee^[34] 则考虑了在压力恢复试井过程中泄油区内饱和度分布不一致的情况，认为压力法对由于井眼周围的气锁造成的表皮因子的值估计过大。Thompson 等人^[35] 关于非均质油藏试井的研究用的也是类似的方法。总的说来，压力法对有效相对渗透率的估计偏低，而对表皮系数的估计又总是偏高。但从目前来讲，这种方法仍然是多相流试井分析方法中使用最广泛的。（3）压力平方法。这种方法首先由 Stanford 大学的 Al-Khalifah 等人^[36] 提出。压力平方法公式的推导过程中忽略了重力和毛管力，并根据数值分析的结果得出 $\frac{K_o}{\mu_o B_o} = ap$ 这样一个简单的关系式，其中 a 为常数，这与第一类方法有异曲同工之处。利用上述关系式，最终得到关于压力平方的扩散方程。近几年来，也有人非层流条件下的溶解气驱试井问题，以及非流动试井中多相流问题做进一步研究。

秦峰^[37] 在其硕士论文中采用指数式的续流量近似公式和现有的数值模拟软件研究了油水两相流动数值试井的问题，其主要考虑的是压力恢复的问题。姚军^[6] 采用了基于稳定流线的数值试井方法也对多相流的问题进行了一些讨论。

数值试井对一般问题的研究还可以包括：打开程度、多相流效应（高气油比）、非达西流动、机械表皮、油层连通性等诸多问题。

对数值试井一般规律的研究还分为油水两相流、气水两相流、油气两相流和油气水三相流这四种多相流体渗流过程的规律研究，因为不同相的流体在地层中的流动是不同的，在开发中对于地层中占主导和非主导流体的产量控制方式是不同的，井底续流量的变化也有较大差异。

2 传统不稳定试井分析原理与方法

不稳定试井是确定油气藏类型、求取油气藏参数、判断井底污染状况、分析措施效果、识别油气藏边界、估算单井控制储量及判断层间或井间连通情况等的重要手段之一。把试井提供的动态信息与其它方法所得的静态信息结合起来，可为油气勘探开发提供重要的依据和手段。

2.1 试井分析理论基础

试井资料的解释是建立在不同类型的油气藏及井模型的基础上，应用流体在多孔介质中的渗流理论，通过一定的数学方法，求得有关地层及井的参数信息。这实际上是信号分析问题，属最优匹配的故障查寻系统。

2.1.1 数学上的反问题求解

对一个已知的系统 S ，施加一个已知的输入信息 I ，则系统就会有一个相应的响应，即有一个输出结果 O 。这种已知系统的结构和输入信息，求出未知的输出，称为数学上的正问题求解，记为： $I \times S \rightarrow O$ 。

与此相反，如果系统为未知，而要由已知的输入 I 和已知的输出 O 来反求该系统的结构和特性参数，这称为数学上的反问题求解，记为： $I/O \rightarrow S$ 。

试井分析的实质就是一个反问题求解。它把地层和井看作一个系统 S ，对于定产量生产，产量为已知的输入 I ，测试的压力为已知的输出 O ；对于定压生产的情形，恒定的井底流压为已知的输入 I ，测试的流量为已知的输出 O 。试井分析的目的就是从已知的输入 I （流量/压力）和输出 O （压力/流量变化）以及其它静态信息，去确定系统 S 的结构（储集空间类型及边界形态）和特性参数（渗透率 K 、井筒储存系数 C 、表皮系数 S 、边界距离 d 等）。因此，试井分析研究的主要任务就是建立各种储集空间类型及边界条件下的试井解释数学模型及其参数识别方法。

正问题和反问题是试井分析研究不可缺少的两个方面。在数学上，正问题的求解结果是唯一的，而反问题的求解结果通常是不唯一的，即反问题求解存在多解性。

试井分析属于反问题，其解是不唯一的。

2.1.2 油井不稳定渗流数学模型

不稳定渗流数学模型由一定假设条件下的渗流微分方程、初始条件和边界条件（包括内边界和外边界条件）构成。