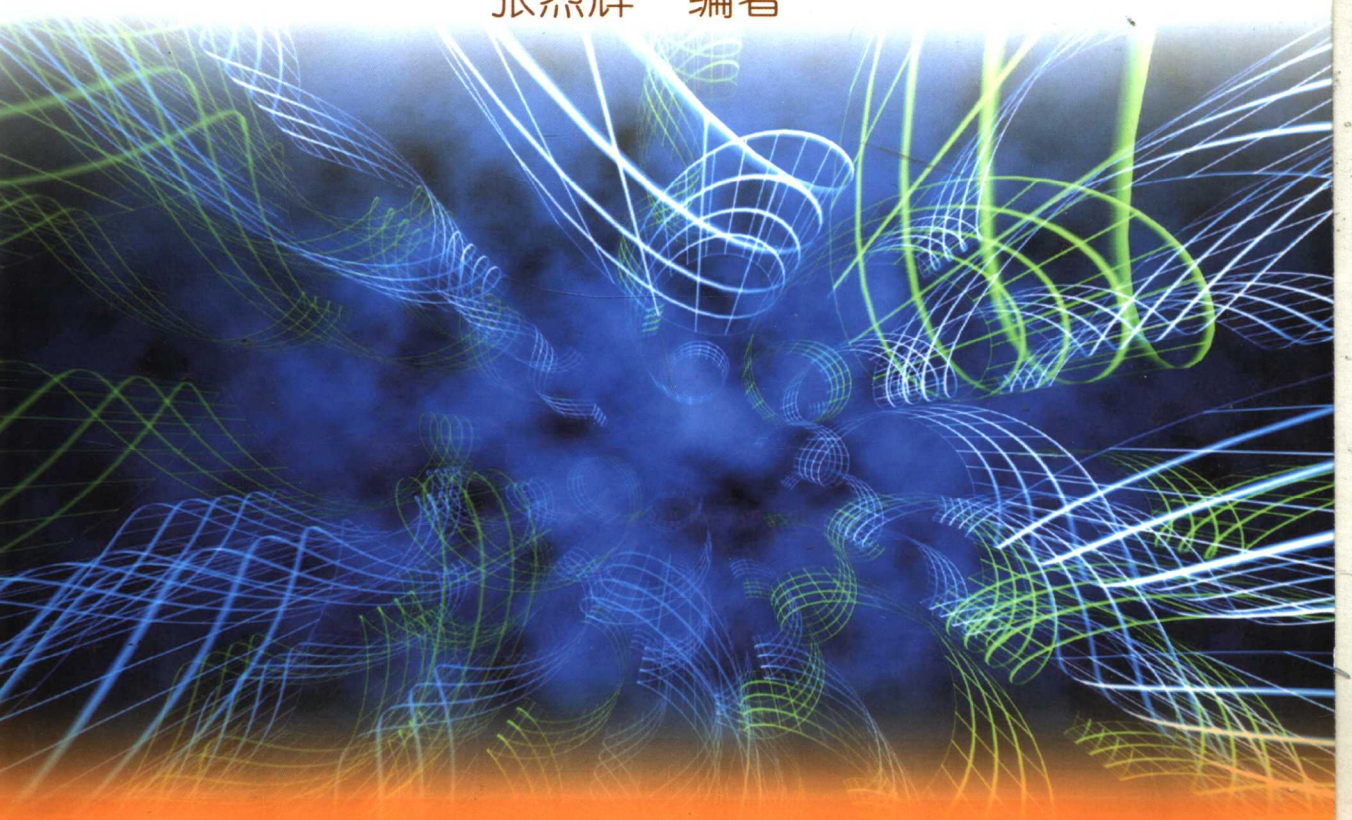




高等院校石油天然气类规划教材

油气藏数值模拟 基本原理

张烈辉 编著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

P618.130.2
Z-479-2

高等院校石油天然气类规划教材

油气藏数值模拟基本原理

张烈辉 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了油藏数值模拟的基础理论和技术。内容包括油气藏数值模拟的基本概念、油气藏数值模拟的发展现状、油气藏渗流微分方程的建立、流动方程的有限差分方法、井的处理、单相流的数值解法、多相流的数值模拟方法、油气藏数值模拟中特殊问题的处理、油气藏数值模拟的实际应用等。

本书主要作为高等院校石油工程专业教材,也可供其他相关专业人员学习使用,同时本书也可供从事油气田勘探和开发的研究人员和技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气藏数值模拟基本原理/张烈辉编著.

北京:石油工业出版社,2005.8

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 7-5021-5117-6

I. 油…

II. 张…

III. 油气藏-数值模拟-高等学校-教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 062634 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

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17

字数:432 千字 印数:1—2000 册

定价:25.00 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

大约在半个世纪以前，高速运算的计算机就已经成为人们生活的一部分，并涉及许多不同的领域，在过去的 20 年中，我们目睹了电子技术的迅猛发展，它将油藏数值模拟从一种神秘的方法转变成一个具有巨大重要性的实用工具箱。通过使用该工具箱中的各种工具，今天的工程师们才有机会更好地认识日益复杂的油藏中流体流动机理的复杂性，并简中流体流动机理的特征，射孔孔眼附近区域的流体流动状态，垂直井、水平井和多分支井与油藏之间的相互作用以及储层特性的复杂性。这些只是数值模拟所能解决的一小部分。此外，还有许多具有挑战性的问题；如在烃类油藏的优化开发和一些可以用数值模拟来检验的资金密集型项目的优化实施中，该项技术起着关键性的作用。

油气藏数值模拟技术作为油田开发科学决策的工具，在理论上用于探索多孔介质中各种复杂渗流问题的规律，在工程上作为开发方案设计、动态监测、开发调整、反求参数、提高采收率的有效手段，能为油气田开发中各种技术措施的制定提供理论依据。狭义地说，它仅仅是研究油气藏内流体的运行规律；但广义而言，它能够对整个石油开采系统，包括油藏、地面装置及任何相关的重大活动进行定量描述。对一个油气田或油气藏的开采，在现实中只能有一次机会，在这个过程中所犯的任何错误都将是不可弥补的，但是模拟研究可以很容易地在计算机上重复计算不同开发方式下的开发过程，并从中选择出能得到最大经济效益的方案。因此，油气藏数值模拟技术的应用，不仅能提高油气田开发的技术水平，而且可以获得少投入、多产出的经济效益，油气藏数值模拟技术已成为油气田开发领域的一项重要技术。

最近十多年来，随着计算技术和计算机技术的飞速发展，油气藏数值模拟技术与方法的发展也很快，每年有大量的研究成果和学术论文、专著问世，但迄今为止，国内尚缺乏一本较为系统的、全面的、较为基础的、从理论到实践全面介绍油气藏数值模拟基本原理及应用的本科教材，因而高等学校的师生们和初次从事该项技术的技术人员，在学习和使用该项技术时会遇到困难。所以，编写这本书的目的，既不是要把它作为一本油藏数值模拟的手册，也不是想要一本包括许多模拟方法的用户操作说明，目的是编写一本使油藏数值模拟的初学者（或工程师）能够很自如地掌握油藏数值模拟原理的教科书。

本教材的特点是：

(1) 读者对象是石油工程的高年级本科学生和一年级研究生。它是一本专业性很强的教材，它与一般专业基础性课程有着同等重要的作用。它融会了基础课程、专业基础课程中的知识，因此，在学习本课程之前，学生应具有计算数学、计算机技术、油层物理、油藏工程、渗流力学、流体力学、采油工程、石油地质、流体实验等相关的知识。

(2) 加强了基础理论知识介绍，又具有很好的导向作用，克服了仅以数学模型代替渗流过程中物理机理的抽象化的研究方法。

(3) 内容广而新，深入浅出，不仅清晰阐明了基本原理，而且突出了基本理论和实践、本课程和渗流力学、流体力学、油藏工程、采油工程、石油地质等其他课程的结合；并且，保持了结构上的严谨性、系统性和逻辑性。

(4) 给学有余力的学生留有一定的自由空间，保证一定的深度和广度，保留一定的自学

内容，以供自学。本书介绍的方法涉及模型建立的不同阶段，从而读者就可以寻求更加复杂领域问题的解；同时，本书也为更加复杂的过程、方法的处理和讨论提供了基础。本书目录中带“*”的内容，为本科生自学内容或一年级研究生学习内容。

(5) 突出了实用性。书中以相当篇幅列出了实际油气田油藏数值模拟研究时需要的地质、工程、生产动态、实验资料等的准备、分析和处理，使学生能有很好的感性认识，有结合实际的学习效果。

全书共分九章，主要内容有：油藏数值模拟的基本概念及发展现状；流体基本流动方程的建立；流动方程的有限差分近似方法；井处理方法；线性差分方程系统的解法；单相流方程的数值解法；油藏的多相流模拟方法；油藏数值模拟中的特殊问题的处理；油藏数值模拟的实际应用等。本书也可以作为现场专业技术人员的参考书和继续工程教育的参考书籍。

本书由油气藏地质及开发工程国家重点实验室（西南石油学院）张烈辉教授编写，在编写过程中还参考了国内外的有关教材和专著，受到不少启发和帮助。此外，在本书编写过程中得到了西南石油学院石油工程学院、油气藏地质及开发工程国家重点实验室（西南石油学院）的各位领导及石油工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免有缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编著者

2005年3月于成都

目 录

1 绪论	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 油藏数值模拟的必要性	(1)
1.3 传统模拟方法	(1)
1.3.1 类比法	(1)
1.3.2 实验法	(2)
1.3.3 数学方法	(3)
1.4 油藏模拟方法	(5)
1.4.1 数值模型	(5)
1.4.2 油藏模型的划分	(6)
1.4.3 典型的油藏模拟研究步骤	(7)
1.4.4 油气藏数值模拟的应用	(9)
1.5 油气藏数值模拟发展概述	(10)
1.5.1 油气藏数值模拟发展回顾	(10)
1.5.2 油气藏数值模拟技术发展现状	(11)
1.5.3 油气藏数值模拟应用发展现状	(15)
2 基本流动方程的建立	(17)
2.1 引言	(17)
2.2 质量守恒定律	(17)
2.3 达西定律	(17)
2.4 不同流动几何空间的连续性方程	(18)
2.5 广义单相基本流动方程的推导	(22)
2.5.1 直角坐标系中的流动方程	(22)
2.5.2 柱坐标系中的流动方程	(25)
2.5.3 单相基本流动方程的简化	(27)
2.6 多相多组分流动方程的推导	(31)
2.6.1 多相流系统一般流动方程	(31)
2.6.2 基础流动系统的流动模型	(34)
2.6.3 多组分渗流基本流动方程	(38)
2.7 定解条件	(39)
2.7.1 边界条件	(40)
2.7.2 初始条件	(41)
3 流动方程的有限差分近似方法	(43)
3.1 引言	(43)

3.2	有限差分方法	(44)
3.2.1	有限差分算子	(44)
3.2.2	导数和有限差分符号的关系	(45)
3.3	有限差分网格的建立和网格性质	(48)
3.3.1	块中心网格系统	(48)
3.3.2	点中心网格系统	(49)
3.3.3	平面网格的几何形态	(50)
3.3.4	垂向网格体系	(52)
3.3.5	非邻近网格连结	(53)
3.4	空间导数的有限差分近似	(54)
3.4.1	一维网格的近似	(54)
3.4.2	多维情况下网格的近似	(55)
3.5	时间导数的有限差分近似	(57)
3.5.1	流动方程的向后差分近似法	(58)
3.5.2	流动方程的向前差分近似法	(58)
3.5.3	流动方程的中心差分近似法	(59)
3.6	线性代数方程组的矩阵结构	(59)
3.6.1	一维流动问题的差分方程	(59)
3.6.2	二维流动问题的差分方程	(61)
3.6.3	三维流动问题的有限差分方程	(63)
3.7	网格块排序	(65)
3.7.1	自然排序	(65)
3.7.2	D4 排序法	(66)
3.7.3	双循环(红—黑)排序法	(67)
3.7.4	D2 排序法	(68)
3.8	初始条件和边界条件的实现	(68)
3.8.1	初始条件的实现	(69)
3.8.2	边界条件的实现	(69)
3.9	显式和隐式有限差分方法	(74)
3.9.1	显式	(74)
3.9.2	隐式	(75)
3.10	有限差分法的截断误差、稳定性分析*	(75)
3.10.1	截断误差与截断误差分析	(76)
3.10.2	稳定性与稳定性分析	(77)
4	井处理	(80)
4.1	引言	(80)
4.2	井底流压与产量关系的回顾	(81)
4.3	油藏模拟中的井模型	(83)

4.3.1	井格块压力的解释	(84)
4.3.2	井穿过单层的井模型	(84)
4.3.3	井垂直穿过多个油层的井模型	(86)
4.3.4	穿过多个油层的井的显式处理	(89)
4.3.5	穿过多个油层的井的隐式处理*	(90)
4.3.6	水平井模型	(93)
5	线性差分方程系统的解法	(96)
5.1	简介	(96)
5.2	矩阵形式的差分方程	(96)
5.3	直接求解法	(97)
5.3.1	高斯消元法	(97)
5.3.2	高斯—约当 (Gauss—Jordan) 降阶法	(98)
5.3.3	Crout 分解法	(98)
5.3.4	Thomas 算法	(100)
5.3.5	直接求解算法的改进	(101)
5.4	迭代求解法	(103)
5.4.1	简单迭代 (Jacobi) 法	(104)
5.4.2	高斯—塞德尔 (Gauss—Seidel) 迭代法	(105)
5.4.3	逐次超松弛 (SOR) 方法	(106)
5.4.4	迭代的交替方向隐式法 (ADIP)	(112)
5.4.5	近似分解技术	(114)
5.4.6	强隐式 (SIP)	(117)
5.4.7	预处理共轭梯度法*	(119)
5.5	线性代数方程组求解方法的对比	(121)
6	单相流方程的数值解法	(124)
6.1	前言	(124)
6.2	单相 (微) 可压缩流体流动问题	(124)
6.2.1	单相流体流动方程	(124)
6.2.2	(微) 可压缩流体流动问题的有限差分近似	(125)
6.2.3	(微) 可压缩流动方程的矩阵表示方法	(132)
6.2.4	用矩阵符号处理边界条件	(133)
6.2.5	(微) 可压缩流动问题的有限差分方程求解	(134)
6.3	(微) 可压缩流体流动问题的物质平衡检验	(135)
6.4	油藏模拟中物质平衡计算的分析	(136)
7	油藏的多相流模拟	(140)
7.1	引言	(140)
7.2	流动方程的有限差分近似	(141)
7.2.1	多相流方程的离散化	(141)

7.2.2	多相流动方程的线性化	(146)
7.2.3	有限差分方程	(157)
7.3	求解多相流差分方程的方法	(163)
7.3.1	IMPES 方法	(163)
7.3.2	联立求解法 (SS 方法)*	(167)
7.3.3	IMPES 和 SS 求解方法的比较与选择*	(173)
7.3.4	自适应隐式方法*	(175)
8	油藏模拟中的特殊问题	(180)
8.1	定解条件的处理	(180)
8.1.1	初始条件的处理	(180)
8.1.2	边界条件的处理	(183)
8.2	流体产量的处理	(185)
8.2.1	射开单一网格块井的产量	(185)
8.2.2	穿过多个网格块井的生产	(187)
8.3	注入流体的处理	(188)
8.3.1	在单个的网格块中井的注入	(188)
8.3.2	井注入穿过多个网格块的情况	(188)
8.4	气相非连续性的处理和变泡点方法*	(190)
8.4.1	变量替换法	(190)
8.4.2	拟溶解 GOR 方法	(190)
8.5	自动选取时间步长	(191)
8.6	拟函数*	(192)
8.6.1	块间拟函数	(192)
8.6.2	井拟函数	(199)
8.7	相对渗透率斜率及相对渗透率和毛管压力滞后的处理*	(200)
8.7.1	相对渗透率斜率的处理	(200)
8.7.2	相对渗透率和毛管压力滞后	(201)
9	油藏模拟的实际应用	(204)
9.1	引言	(204)
9.2	研究目标	(206)
9.3	数据分析	(206)
9.3.1	地球物理和地质数据	(208)
9.3.2	工程数据	(211)
9.3.3	数据相互矛盾的解决	(228)
9.4	模型的建立	(228)
9.4.1	模型的选择	(229)
9.4.2	网格和时间步长的选择	(235)
9.4.3	网格单元性质赋值	(242)

9.5	历史拟合	(246)
9.5.1	历史拟合目标	(246)
9.5.2	历史拟合方法的选择	(247)
9.5.3	选择要具体化和要进行拟合的生产数据	(248)
9.5.4	选择要调整的油藏数据	(251)
9.5.5	调节油藏数据来拟合生产历史	(252)
9.5.6	历史拟合质量	(254)
9.6	油藏动态预测	(254)
9.6.1	预测方案的选择	(254)
9.6.2	油藏模拟中的油藏管理	(255)
9.6.3	验证和分析模拟预测结果	(257)
9.7	最后的建议	(258)
	参考文献	(260)

1 绪 论

1.1 简 介

油藏数值模拟是结合物理、数学、油藏工程以及计算机程序来预测各种开采条件下烃类油藏动态的一种有效工具。本书主要介绍了该方法的基础知识及基本原理。这一章回顾了石油工程师们有用的预测技术，重点强调了在实际应用中的局限性。为了更加清楚地认识到油藏数值模拟在优化开发、开采烃类油气藏方面的作用，本章也总体上介绍了油藏数值模拟过程以及它在烃类油气藏开采方面的应用，同时还介绍了油藏模拟技术和应用的发展现状。

1.2 油藏数值模拟的必要性

油藏数值模拟源于石油工程师在不同开采条件下准确预测油藏开发动态的需要。这种需要是由于在烃类开采项目中（这样的开采项目也许会涉及上亿美金的投资），与所选择的开发方案有关的风险必须进行评估并且达到最小化。影响该风险的因素包括：由油藏非均质性和岩石各向异性引起的油藏复杂性；流体性质和相对渗透率随区域的变化；烃类开采机理的复杂性；以及其他预测方法的适用性，这些预测方法可能具有局限性，使得它们不适用于某种条件下的油藏。前三个方面的因素不受工程师的控制，在油藏数值模拟中它们是通过输入油藏模型数据和选择适用于不同提高采收率方法的模拟器来考虑的。第四个因素可以通过对可靠的工程实践和油藏数值模拟的正确使用来控制。

1.3 传统模拟方法

传统的预测油藏动态的方法通常可分为三类：类比法、实验方法和数学方法。类比法利用已开发油藏的特性来预测目标区域或目标油藏的动态，该已开发油藏与目标油藏在地理性质或岩石物性上具有相似性。实验方法测量实验室模型的物性（如产量、压力或饱和度），然后将这些结果放大到整个烃类油气藏。最后一种是数学方法，它是应用方程式来预测油藏动态的一种方法。本章接下来的部分将进一步讨论这些方法。

1.3.1 类比法

在钻井前，当受到某些方面的限制或是不能获取有关数据时，油藏工程师进行经济预测的惟一方法就是类比法。在该方法中，处于同一地质盆地或省份，或是具有相似岩石物理性质的油藏将用来预测目标油藏。这种方法可以估计开采因素、初始产量、递减率、井网布置和油藏开采机理。将两个相似油藏进行对比并采用类似的开发策略就能得到可靠的结果。但是，如果考虑到不同的开发策略，这种方法将遇到困难，并且，无法判断敏感性因素。

油田分阶段试验就是一种类比方法，它为二次和三次采油开采提供了最可靠的预测结果。这种方法先将一些有代表性的候选井网转入新的开采过程，并对其生产动态进行监测。这些油田试验结果可能要花费一年或两年时间才能获得，并且将会用于其他井网，从而就可

以预测油田的动态。油田开发管理决定通常取决于油田分阶段测试的结果。

1.3.2 实验法

实验法，不管是模拟法还是物理方法，在对油藏的认识中都起着关键的作用。模拟模型使用较少，目前，经常使用的有岩心驱替模型、填砂模型和细管模型等。

1.3.2.1 模拟模型

在现代油藏研究中，模拟模型使用很少，但关于模拟模型有两点值得我们探讨。第一，从历史的观点来看，在早期的研究中模拟模型是很重要的，尤其是在将波及效率与水驱计算相结合方面。第二，阻容网络（RC）与等势模型的不同之处说明了离散模型与连续模型之间的区别。

模拟模型利用流体在多孔介质中的流动现象与其他物理现象（如表 1.1）的相似之处来模拟油藏动态。表 1.1 中控制方程是模拟模型的基础，这些模型可用来代表实际油藏，并且也对一些适当的参数值进行了测量（如代表压力和流量的参数）。这些参数可以通过控制方程转化为相应的多孔介质模型。下面我们将讨论三种模拟方法：RC 网络法、等势模型法和 Hele - Shaw 模型法。

表 1.1 物理现象与多孔介质中流体流动的类比

现象	流体通过多孔介质的流动	流体通过水平板的流动	流体通过电路的流动	传导过程中的热流动
控制方程	达西定律 ^① $q = \frac{\beta k A \Delta p}{\mu \Delta L}$	哈根-泊肃定律 $q = \frac{w^2 A \Delta p}{12 a_c \mu \Delta L}$	欧姆定律 $I = (1/R) \Delta E$	傅立叶定律 $Q = \frac{KA \Delta T}{\Delta L}$
性质	体积流量 q 传导系数 $\frac{\beta k A}{\mu \Delta L}$ 流体粘度 $\frac{\beta k}{\mu}$ 压力 p	体积流量 q 水力传导系数 $\frac{w^2 A}{12 a_c \mu \Delta L}$ 水力传导性 $\frac{w^2}{12 a_c \mu}$ 压力 p	电流 I 电传导系数 $1/R$ 电导性 ^② $1/r$ 电压 E	热流量 Q 热传导系数 $\frac{KA}{\Delta L}$ 热传导性 K 温度 T

注：①水平流动；

$$\textcircled{2}R = \frac{r \Delta L}{\Delta L}$$

RC 网络法，通过类比流体在多孔介质中的流动与电流流动来模拟油藏动态。Bruce 将这种方法应用于石油工业，以模拟水驱状态下未饱和油藏的不稳定动态。图 1.1 所示为该问题的 RC 网络。在这些模型中，电容用来模拟空间上某一点的流体储集，而电阻则用来模拟各点之间的传导率。电容器放电表示与表 1.1 所列性质相对应的油藏的不稳定状态。总的来说，

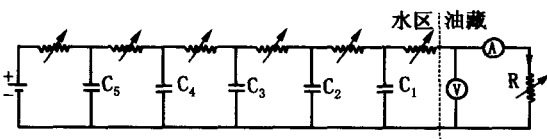


图 1.1 简单烃类油藏/含水层系统的电路图
C₁~C₅—电容；R—电阻；A—安培表；V—伏特表

尽管这些电路模拟了油藏的不稳定状态，但它们还是离散模型。也就是说，电容器代表的是油藏中一些离散点的流体储集层。

电路模型的一种连续形式是等势模型。等势模型是一种油藏或井网的比例模

型。它由连续的导电物质组成。电压被应用于井场中，模型中任何一点的电压值都可以测量，这就与 RC 电路形成了对比。在 RC 电路中，测量只能在油藏的一些离散点进行。RC 网络与等势模型第二个不同之处在于等势模型只能模拟稳定流动。大多数对水驱井网波及效率的早期研究是在如图 1.2 所示的模型中进行的。

通常，必须按实际情况建立不同油藏的电路模拟模型，这样就使得它们很难应用于其他油藏。离散的 RC 网络模型还受到电路组成部分（电容器、仪表、电阻）的微小故障以及它们所需的巨大空间（几间房屋）所限制。除了这些缺点以外，这些模型还局限于只能模拟多孔介质中的单相流动，或最多模拟具有统一流度比的两相流动。

Hele - Shaw 模型可以适用于不同的流度比的情况。该模型通过对多孔介质中流体的流动与平行板间流体的流动的类比来模拟二次、三次采油规则井网中的油藏动态。这种模型由两块平行放置的平板所组成。两板中间充填了要驱替的流体，同时驱替流体通过注入井注入，由此，就可以确定油藏井网的波及效率。

1.3.2.2 物理模型

与模拟模型相反，物理模型用来对孔隙介质中流体的性质进行直接测量。石油工业中所使用的物理模型有两种类型。第一类模型不考虑油藏中流体流动的几何形状。岩心驱替实验就属于这种类型。这些实验可能是当今石油工业使用最普遍的模型，它们通常在线性岩心中进行。几乎每一个油田或者气田都使用这种方法来确定油气藏性质，比如孔隙度和渗透率，同时还用来确定其开采机理。这些实验的一个不利方面是它们的规模不能代表实际油藏规模。因此，实验所得出的结果必须放大到更具代表性的规模。这一类型的其他一些物理模型还包括细管模型和填砂模型。

第二类物理模型使用了几何、机械、热力相似性概念。也就是说，模型的平面几何形状、厚度、孔隙度和渗透率，以及流体性质都按一定规模缩小，从而使该模型在形状和空间几何上（同时也包括有效作用力的比）都与实际油藏一致。这类比例模型的动态就反映了实际油藏动态。其中一个实例是 Sobocinski 和 Cornelius 的单井锥进模型（如图 1.3 所示）。这类模型可以确定临界锥进量、水突破次数和突破后的产水率。然而，值得注意的是，在油藏工程问题中，要模拟油藏所有物理特性通常是不可能的，所以，实际比例模型的应用受到极大的限制。因此，可以用在放大过程中只考虑了大多数重要特征的比例模型来代替。

1.3.3 数学方法

数学方法可能是现代石油工程师使用最广泛的方法。这些方法包括：物质平衡法、递减曲线法、统计法和解析法（试井）。在使用这些方法时，通常需要大量的手工计算或作图处理。然而，随着计算机技术的发展，人们已经开发出大量可以完成这些工作的软件。下面，我们着重介绍这些方法的理论基础和在实际应用中的局限性。

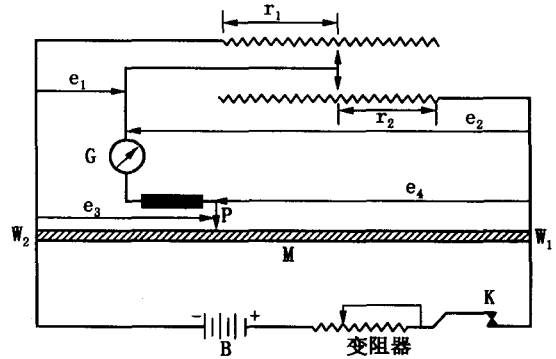


图 1.2 确定二维体系中势分布的电路图
 B—电池； $r_1 \sim r_2$ —电阻；G—电流计； $e_1 \sim e_4$ —势下降；
 M—电位计； $W_1 \sim W_2$ —电极，表注入井和生产井；
 P—探测电极；K—控制键

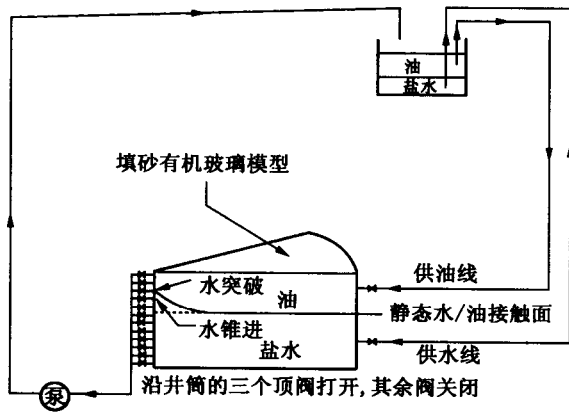


图 1.3 实验室水锥进模型

物质平衡方程包含有大量的物理因素（反映在驱替机理方面），这些物理因素决定了原油从油藏中的采出。但是，物质平衡分析的可靠性取决于有关数据的准确性和基本假设的符合程度。物质平衡方程不考虑岩石和流体性质在空间上的变化、流体在多孔介质中流动的水动力学因素、流体分异、油藏的几何构造、井的位置或不同流体的产量。同时，还假设物质平衡方程中所使用的 PVT 参数（压力、温度、体积）是在相同气体逸出过程（闪蒸和差异分离）中获得的，这个过程在实际油藏中是很活跃的。物质平衡方程对油藏压力测量的不准确性也很敏感；正如在压力保持过程中一样，当油藏压力没有下降到一定的幅度时，这个模型就不适用了。

1.3.3.2 递减曲线分析

指数递减、双曲递减和调和递减分析方法常用来描述原油开采过程中产量的递减情况。递减曲线方程的统一形式为：

$$D = Kq^b = -(dq/dt)/q \quad (1.1)$$

其中： $b=0$ 时，为指数递减； $0 < b < 1$ 时，为双曲递减； $b=1$ ，为调和递减； $K = D_i/q_i^b$ 。

在递减曲线分析中，利用方程（1.1）给出的产量—时间方程来拟合生产历史数据。一旦选定了递减模型，历史生产数据就可以通过选择递减参数 D_i 和 b 来拟合。由此，就可以使历史生产数据与产量—时间方程之间的误差最小化。应用适当的方程将历史数据外推就可以进行油藏动态预测。其他的一些外推技术不适合于方程（1.1），包括水/油比或累积产油量的对数与 t 的关系曲线。

任何外推技术的主要假设是所有在过去发生的过程都会在将来继续发生。因此，如果实际操作实践在以后的开发过程中不期望发生变化，那么，它将是一种十分强有力的技术。如果操作实践会发生变化，那么，就不能使用递减曲线分析方法。所以，递减曲线分析法不能应用于假设性分析。

1.3.3.3 统计法

统计方法使用一些经验关系来预测油藏动态。这些经验关系来自对大量油藏过去生产情况的统计分析。因此，这种方法可以看做是类比法（1.3.1 节）的一种延伸。每一种相关关系都来自于相同区域（如 Texas 或 California）、具有同一岩性（如砂岩或碳酸岩）、具有相

1.3.3.1 物质平衡方程

传统的物质平衡方程或储罐模型是油藏或排驱体积的数学表示。该模型的基本原理是质量守恒，即在一定开采阶段后，在油藏中剩余物质的量（油、气或水）等于油藏中原始物质的量减去由于开采引起的油藏中减少的物质质量，再加上由于注入或侵入作用而增加的物质质量。物质平衡方法就是对所有流入、流出油藏以及滞留在油藏中的流体的一个综合描述。已有大量文献列出了某些形式的物质平衡方程，这些方程都是由一种普通的形式演变而来。

同的开采驱油机理（如水驱或溶解气驱）的成熟油藏所取得的数据。比如，Guthrie 和 Greenberger 提出了一种原油采收率因子关系式，对于在完全或部分水驱情况下生产的砂岩油藏，它是渗透率、孔隙度、地层厚度、原油粘度和初始含水饱和度的函数。要确定所使用的经验关系式是否合理，油藏性质必须介于用于建立该关系的回归数据范围内。统计关系式也许可以为油藏整体上提供一个合理的准确估计。但是，同一关系式应用于油藏的某一区域时，由于流体在油藏中的运移，可能得出不符合实际的估计。这些技术的预测误差通常高达 20%~50%。此外，这些关系式只能用来估计最终采收率，而不能建立起产量—时间关系。

1.3.3.4 解析法

解析法是基于对理论模型的精确解。压力瞬态分析和 Buckley - Leverett 分析都是解析模型的例子。这些模型的建立过程保留了对油藏中所发生过程的物理描述，但是，通常会得到十分复杂的方程式，这些方程用现在的数学处理方法一般是无法求解的。要使用解析的方法求解这些方程，就必须使用假设条件来减小模型的复杂性。所以，解析法能得出简化问题的精确解。用于压力瞬态分析的假设包括：水平油藏、均质厚度、单相流动、小压力梯度以及线性流动条件。而在 Buckley - Leverett 分析中所应用的假设有：不可压缩线性流、不计毛细管力和重力影响，还有生产亏空补偿。

虽然在数学求解时必须使用这些假设条件，但这个问题本身的物理意义仍然存在，因此，解析法通常用来确定不同的参数对油藏动态的影响程度。此外，这些方法还提供了模拟研究所需要的大量重要数据。

1.4 油藏模拟方法

油藏模拟作为油藏动态预测的工具在石油工业中越来越正规化。它的广泛使用应该归功于：计算设备的不断改进，尤其是计算速度和计算机储存能力的增加；求解偏微分方程（PDE）的数值技术的不断进步；油藏模拟器的综合化使得模拟器可以应用于油田模拟；油藏描述技术的发展；以及日趋复杂的油藏开采技术的发展，否则，就不可能对油藏动态进行分析。在油藏模拟方法中，偏微分方程（PDE）与适当的初始和边界条件一起形成了数学模型，这些数学模型可用来近似预测油藏的动态。这些方程式与发生在油藏中的最重要的物理过程相一致，这些物理过程包括：流动的流体分离成油、水、气三相和不同相态之间的质量转移。通过广义达西定律方程可以考虑粘滞力、毛细管力和重力对流体流动的影响。这种方法的优点在于它对油藏非均质性、相间传质以及与流动相关的作用力/流动原理所做的假设最少。此外，在油藏模型中，岩石性质、流体性质以及相对渗透率特性在空间上的变化都得到了精确的体现。

1.4.1 数值模型

数值模型用高速计算机求解描述油藏中物理过程的数学方程式，从而得到该油田油藏动态的数值解。图 1.4 描述了建立油藏模型的主要步骤。在该图中，列出了有关油藏模型的基本假设，使用了精确的数学术语来描述这些假设，并且将它们应用于某一均质油藏中的控制体。根据该图所描述的过程，最终可以得出一系列描述多孔介质中流体流动的非线性偏微分方程。

如果准确求解这些方程，就会得到压力、饱和度和产量关于时间和空间的连续函数。由于这些方程是非线性的，所以不能用解析的方法求解，而必须用数值方法进行求解。与解析

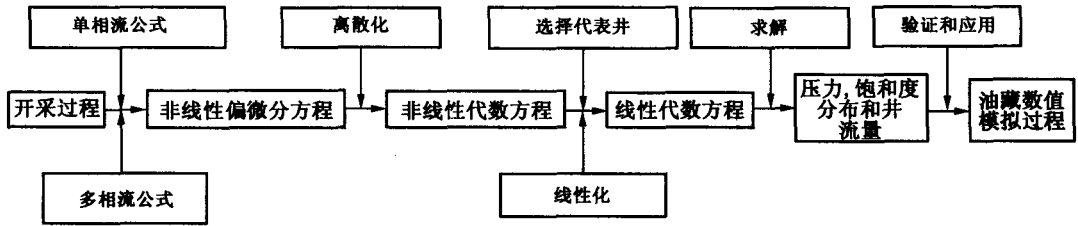


图 1.4 建立油藏模型的主要步骤

解相比，数值解只能得到油藏中一些离散点的压力和饱和度值。将偏微分方程转换为代数方程的过程就是离散化。总而言之，解析法能得出简化问题的准确解，而数值方法能得出准确问题的近似解。

有几种数值方法可以用来离散流动方程，石油工业中最常用的方法是有限差分法。其离散过程得到的结果是一系列非线性代数方程。通常，这些方程不能使用代数方法求解，而在求解前必须进行线性化（转化为线性方程的形式）。一旦对模型方程进行了线性化，就可以使用线性方程求解方法求解。这些方法分为两类：直接法和迭代法。在直接法中，通过固定的数学运算就可以求出方程的准确解（其精确度受到机器舍入误差的限制）。本书中所讨论的直接解法都是高斯消去法的变形。在迭代法中，初始的估计值得到不断地改进，直到十分接近准确解。获得近似解所需要的数学运算量是不确定的，它取决于所选择的初始值所要求的精确程度和迭代方程系统的性质。本书中所讨论的迭代法包括：雅可比迭代法、高斯—塞德尔迭代法、逐次超松弛法、交替方向隐式法、强隐式法和共轭梯度法。

1.4.2 油藏模型的划分

目前划分油藏模型的方法有多种。划分油藏类型最常用的标准是油藏类型、需要模拟的油藏流体类型和目标油藏中所发生的开采过程。油藏模型也可以根据模型所使用的坐标系、空间维数和相态数来划分。

以油藏和流体类型来划分，其模型有：气体模型、黑油模型和组分模型；以开采过程来划分，其模型包括：常规油藏、化学驱、热采和混合驱模型。在该书中，常规油藏模型和黑油模型是同一种类型。图 1.5 列出了这些模型对应的开采方法。

以油藏和流体描述为基础的油藏模型分为两类：黑油模型和组分模型。黑油模型用于开采过程中，对油藏流体组分变化不敏感的情况。黑油模型假设质量转移完全取决于压力变化。在这些模型中，流体性质 B_o 、 B_g 、 R_s 决定 pvt 的变化。

组分模型则应用于开采过程中对组分变化敏感的情况。这些情况包括：挥发性油藏和凝析气藏的一次衰竭采油阶段，以及压力保持阶段。同时，多次接触混相过程通常也采用组分模型进行模拟。在组分模型中，使用三次状态方程表示 pvt 变化。

根据开采过程划分油藏模型时，一次采油机理，如溶解气驱、气顶膨胀驱、重力排驱和水驱，都可以使用常规模型或黑油模型来描述。此外，二次采油机理，如：注水或注气（忽略传质影响）也可使用黑油模型模拟。化学驱过程，如：聚合物驱或表面活性剂驱，则需要化学驱模型。化学驱模型与黑油模型有所不同，因为其附加的守恒方程是用来表示驱油过程中的某种化学用剂的变化。热力采油，如：蒸汽驱和火烧油层，需采用热采模型来进行油藏预测。这类模型除了物质平衡方程外，还使用了能量平衡方程。总的来说，热采模型中也运

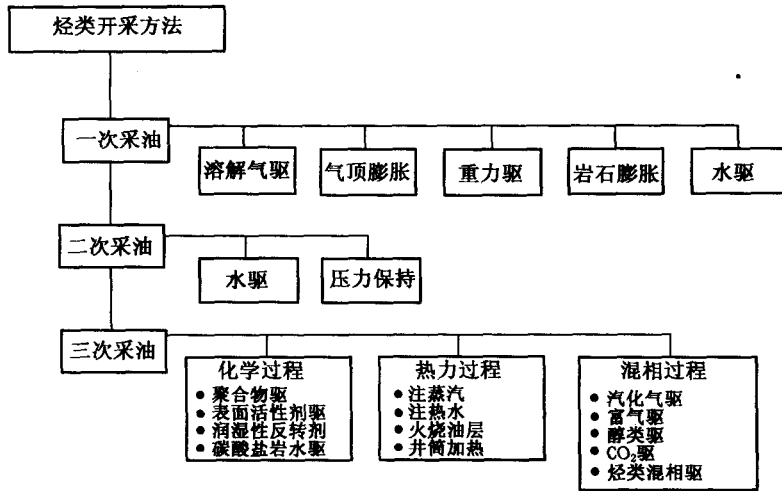


图 1.5 烃类油藏开采方法

用了组分模型的方法。近期发展起来的一个油藏模拟模型是多功能油藏模型。这些模型采用了最灵活的假设条件和计算方法，因此，它们可以模拟前面提到的所有开采机理。

油藏模型及其应用也可以根据它们的几何形状和维数来分类。例如：直角坐标 (x, y, z) 中的三维 (3D) 模拟模型可应用于完整油田模拟；同样，直角坐标中的二维 (2D) 模型可用于平面 (x, y) 模拟或者剖面 (x, z) 模拟；柱坐标 (r, z) 中的二维模型可用于单井锥进的模拟；一维模型可用于有关实验室岩心驱替的模拟。

尽管，前面我们列出了模拟模型的几何形状、维数以及它们的传统应用。但是仍然没有一种单一的流动几何形状能充分描述油藏中的流体流动。图 1.6 描述了流动几何形状随原油产出的变化。在远离井筒的地方，流体流动接近线性流动，适合采用直角坐标描述。当流体流动发生在井筒附近时，流体流动的几何形状呈柱状，因此，适合采用柱坐标系。最后，当流体在单个射孔孔眼附近流动时，流动主要为球状流，这时适合采用球坐标系。因此，只使用一种坐标系，其结果通常为近似的。

根据几何形状和维数来划分模型已经不像早期那样普遍。这是因为，随着 20 世纪 60 年代末和 70 年代初计算机行业的飞速发展，大多数数值模拟程序都增加了解决三维问题的能力。如今，所有的商业模型都具备了这样的能力。

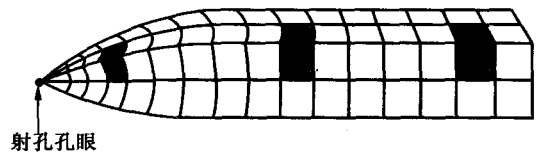


图 1.6 流体流动几何形态的变化

1.4.3 典型的油藏模拟研究步骤

对一个油藏进行综合的数模研究，往往要花费较大的精力和较长的时间（有时会达一年，甚至更长的时间），同时还对计算机硬件和油藏工程技术人员有很高的要求。然而，尽管在不同的项目中，面对的问题会千差万别，但大多数油藏数值模拟的基本研究过程是一样的。为了使读者一开始就对数模工作的整体有一个明晰的概念，下面简要介绍一般情况下油藏模拟的研究步骤和时间分配。

(1) 找出问题，确定研究对象 (5%)。这是任何一次成功的模拟研究的第一步，其目的