

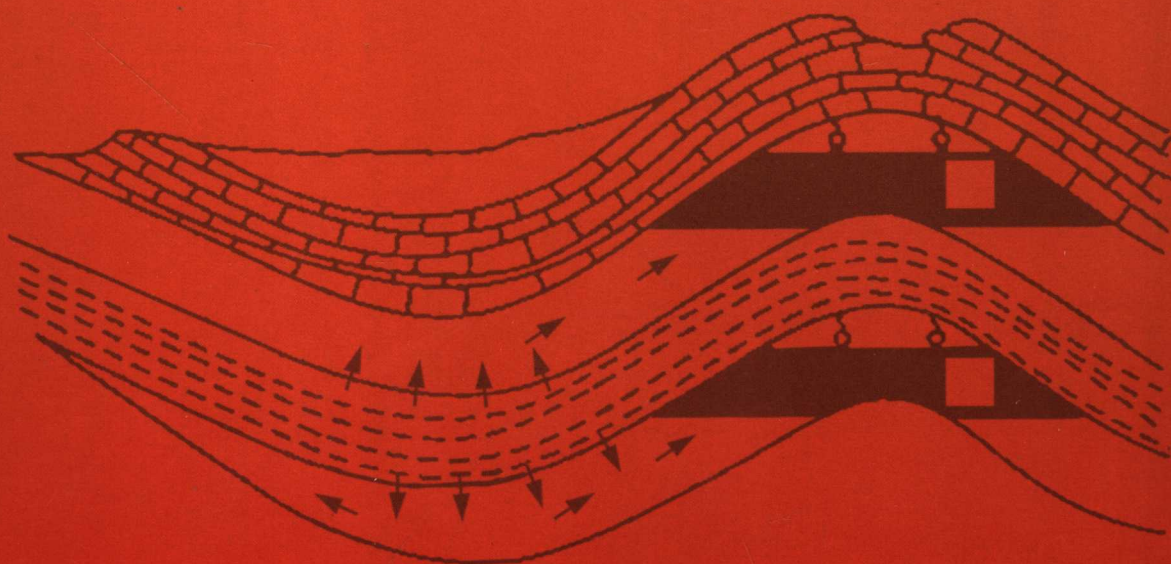
国外油气勘探开发新进展丛书 (五)

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU

Oil Well Testing Handbook

油井试井手册

[美] 阿曼纳特 U. 乔德瑞 著
张继红 张惠殊 孙喜寿 译



石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(五)

油井试井手册

[美] 阿曼纳特 U. 乔德瑞 著

张继红 张惠殊 孙喜寿 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分16章,在简述油井试井的基本概念和基本原理的基础上,重点介绍了油井试井的各种测试技术和方法,主要内容包括:水平井的不稳定试井方法、油井的压降测试技术、油井的压力恢复分析技术、原始地层压力和平均地层压力的估算方法、天然气裂缝油藏的试井解释方法、油井典型曲线拟合的原理、用特殊技术进行流动阶段识别与分析、压力导数在油井试井分析中的应用、大型水力压裂油井的动态分析、钻杆试井方法、干扰试井和脉冲试井的分析方法、注入井不稳定测试与分析、多层油藏系统的试井方法,以及非均质油藏体系的压力分析方法,并用现场实例进行了说明。

本书可供从事试井、试油、采油、油藏工程和地层测试工作的技术人员及管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油井试井手册/(美)乔德瑞(Chaudhry, A. U.)著;张继红,张惠殊,孙喜寿译. —北京:石油工业出版社,2008.5

(国外油气勘探开发新进展丛书. 第5辑)

书名原文:Oil Well Testing Handbook

ISBN 978-7-5021-6471-3

I. 油…

II. ① 乔…② 张…③ 张…④ 孙…

III. 试井-技术手册

IV. TE353-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第010708号

Copyright © 2004, Elsevier, Inc. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elsevier, Inc. 授权翻译出版

中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究

版权登记号:01-2005-5517

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.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2008年5月第1版 2008年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:32.75

字数:790千字

定价:128.00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

《国外油气勘探开发新进展丛书(五)》

编 委 会

主 任：胡文瑞

副 主 任：赵政璋 杜金虎 张卫国

编 委：(按姓氏笔画排序)

刘德来 李忠兴 李相方

张义堂 张仲宏 张明禄

周家尧 章卫兵 魏国齐

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺,推动中国石油上游业务技术进步,本着先进、实用、有效的原则,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量,对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进,并翻译和出版。

从 2001 年起,在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上,从生产需求出发,通过优中选优已经翻译出版了四期 22 本专著。在这套系列丛书中,有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平,有些非常具有实用性,也是生产中所亟需。这些译著发行后,得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎,并在实用中发挥了重要作用,达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可。2002 年丛书第 2 辑整体获得了中国出版工作者协会颁发的“引进版科技类优秀图书奖”,2006 年丛书第 4 辑的《井喷与井控手册》再次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”,产生了很好的社会效益。

今年我们在前四期出版的基础上,经过多次调研、筛选,又推选出了国外最新出版的 6 本专著,即《油层物理》、《钻井液处理手册》、《油井试井手册》、《气井试井手册》、《项目计划与控制》、《现代试井解释模型及应用》,以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员,使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版,并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁

原 书 序

自从人们认识油藏以来,油井测试已经是很实用的技术了,但油井测试技术的概念仅仅在过去的 30 年里才形成。在公开发表的文献里有许多单独的有关此内容的专题论文和数量不多的指南,在一些采油公司的内部图书馆里也只能找到专门介绍油井测试概念的书籍。因此,作者认为非常有必要出版本书。

从广义上讲,油藏工程中油井测试就是通过对非裂缝性和裂缝性气井的中途测试、流量和不稳定压力响应的测量及分析来了解油井(油藏)动态的技术。本书从实用的角度出发,介绍了与油井测试数据采集和解释相关的概念。全书用举例和现场实例的方法强调了这些概念。

在本书中,作者综合研究了油井中流量和不稳定压力响应的测量和分析方法,回顾了基本原理,重点讨论了各种测试技术的适用性和局限性,并用现场实例进行了说明。本书所述材料能使工程师们直接学习相关的油井动态、压力恢复和流量测试等知识。同时,由于更新了文献和参考资料,本书将为直接从事油井压力动态工作的工程师提供指导和参考。作者用完美的方式达到了这一目的。

作者用现场应用实例和现场案例研究描述了在现代生产实践中遇到的油井类型和储层动态。本书对数据的来源、属性、精确度以及计算和分析的研究基础等作为次要内容进行了讨论。本书还提供了大量练习以加深对油井测试方法的原理和应用边界条件的理解。

本书对评估油井(油藏)系统和油井压力特性的工程师是很有必要,也非常重要的。作者在此领域有丰富的经验,是处理此课题的最佳人选。同时,本书也是对石油技术文献的及时补充。

Dilip Borthaker

海湾印度尼西亚资源公司

天然气工程部经理

前 言

写本书的目的就是要提供关于油井测试技术现状方面的实用参考资料。本书介绍了在评估井况和油藏特征时油井测试技术和分析方法的使用。本书中所介绍的技术和数据是现场测试出的,且首次公开出版。例如,本书包括各种试井分析方法的新表 and 对比。大多数技术和应用在现场数据中得到了清晰的展现。为了便于理解,书中包括几个现场实例计算和现场实例研究。

本书是油藏工程师、模拟工程师、采油工程师和专业地质工作者、地球物理工作者及技术经理的必备用书,并且有助于工程教授更好地把实际问题的解决过程呈现给他们的学生。这本书还包含了读者易于理解和掌握的实用计算实例,因而非常具有指导性质。

本书从实用的角度介绍了与试井数据采集和解释相关的基本概念,也简述了此领域的进展,重点介绍了目前最普遍使用的解释方法,主要强调了实用方法和现场应用。用超过 129 个的实例来解释有效的油井测试方法、大多数分析技术及其应用。

介绍的许多方法是基于作者处理全世界范围内各种试井技术和解释的经验。我向众多我曾经多年工作过的公司表示感谢,是他们给了我进行试井分析工作的机会。

适当设计、实施和分析的试井可提供关于地层渗透率、油藏初始或平均压力、井底情况(井损害或增产措施)、泄油面积排量、边界、不连续性、油藏非均质性、诱导裂缝的距离或延伸、地质模型的有效性 & 系统识别(油藏类型和数学模型)方面的信息。

因此,确定油层流体的生产能力及形成油井产能的基本原因很重要。这些数据如结合关于流体和岩石性质方面的开采数据和室内实验数据,可提供评估地层原始储量和采收率的方法,也许可以期望从各种勘探模型下获得油藏的采收率。此外,试井数据和 IPR 性能方程结合生产数据有助于设计、分析、优化总的油井生产系统或生产优化。

严谨的讨论、实用的实例、通俗易懂的方法使得本书是每个石油专业图书馆一个有价值的补充。同事的讨论和建议使从业工程师使用本书非常有价值。使用本书的大多数读者会发现对许多试井问题的解决方法组织合理、易于实用。

应关注本书的一点是,作者在书中插入许多个人观点、评估、分析、建议和结论等。他做此工作很严谨没有特别强调这些是个人观点。如读者没找到特别声明的参考文献或逻辑证明,可假定这是基于作者经验和专业知识的个人观点。

在准备本书时考虑了许多读者的建议。欢迎为本书提出批评和改进意见,请直接与作者联系。

Amanat U. Chaudhry

Advanced TWPSOM Petroleum Systems, Inc.

10070 Westpark Drive #905

Houston, TX 77042

1 - 713 - 783 - 1248

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 油井试井及试井资料在石油工业中的作用	(1)
1.2 油井试井的历史和油井试井的用途	(1)
1.3 油井试井数据的获得、分析和处理	(1)
1.4 选择最佳的油井措施方案	(1)
1.5 油藏系统特性描述方法	(3)
1.6 范围和目的	(3)
1.7 组织结构	(4)
1.8 单位系统及换算	(7)
第2章 地层原油流动分析的基本概念	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 油藏中流体流动的基本方程	(9)
2.3 数值模拟及其应用	(18)
2.4 定向井的非稳态压力分布计算	(22)
2.5 小结	(31)
第3章 水平井的不稳定试井方法	(33)
3.1 引言	(33)
3.2 水平井的流体方程	(33)
3.3 水平井不稳定状态的动态	(64)
3.4 水平油井的不稳定试井技术	(66)
3.5 流态方程和解	(67)
3.6 压力响应方程和分析方法	(72)
3.7 水平井的压力响应和标准化压力导数	(78)
3.8 井筒储存效应	(79)
3.9 小结	(79)
第4章 油井的压降试井技术	(81)
4.1 引言	(81)
4.2 稳产压降试井中的压力—时间情况	(81)
4.3 无限作用油藏的不稳定状态分析	(82)
4.4 不稳定流后期分析—封闭(已开发)油藏	(83)
4.5 半稳态分析—油藏探边测试	(86)
4.6 两流量流动测试分析	(91)
4.7 变流量流动测试	(97)

4.8	多流量流动测试分析	(105)
4.9	压降量归一化法	(111)
4.10	小结	(115)
第5章	油井的压力恢复试井分析技术	(116)
5.1	引言	(116)
5.2	理想状况下的压力恢复试井	(116)
5.3	实际情况下的无限大油藏压力恢复试井	(118)
5.4	无限大油藏压力恢复试井分析	(119)
5.5	有界油藏的压力恢复试井方法	(133)
5.6	多相压力恢复试井分析	(148)
5.7	用 Russel 法进行续流分析	(152)
5.8	两流量流动测试的压力恢复试井	(155)
5.9	变产量压力恢复试井	(158)
5.10	多相、多流量压力恢复试井分析	(161)
5.11	产量归一化技术及过程(压力恢复数据)	(166)
5.12	小结	(178)
第6章	原始地层压力和平均地层压力的估算方法	(180)
6.1	引言	(180)
6.2	无限大油藏的原始地层压力	(180)
6.3	估算油藏平均压力和原始压力	(180)
6.4	计算水驱油藏的含水层恒压	(187)
6.5	小结	(193)
第7章	天然裂缝油藏的试井解释方法	(194)
7.1	引言	(194)
7.2	天然裂缝的确定	(194)
7.3	天然裂缝油气藏的特性	(194)
7.4	典型压降曲线的特征和形状	(195)
7.5	压力恢复曲线形态特征	(195)
7.6	试井解释方法、用途和局限性	(197)
7.7	致密地层基岩的压力恢复分析技术	(207)
7.8	在基岩和裂缝系统中干扰试井的解释	(211)
7.9	水平井压力动态曲线类型	(213)
7.10	双孔隙度油藏水平井产量预测	(217)
7.11	小结	(218)
第8章	油井典型曲线拟合的原理	(220)
8.1	引言	(220)
8.2	常规试井的应用	(220)
8.3	裂缝典型曲线拟合技术	(243)

8.4	水平裂缝油井的典型曲线	(257)
8.5	小结	(264)
第9章	用特殊技术进行流动阶段识别与分析	(265)
9.1	引言	(265)
9.2	裂缝线性流阶段	(265)
9.3	双线性流动	(266)
9.4	地层线性流	(268)
9.5	拟径向流	(269)
9.6	典型曲线拟合法	(270)
9.7	小结	(277)
第10章	压力导数在油井试井分析中的应用	(279)
10.1	引言	(279)
10.2	压力导数在试井分析中的应用	(279)
10.3	压力导数分析方法	(280)
10.4	裂缝油藏	(283)
10.5	其他常见流态的压力导数趋势	(286)
10.6	小结	(286)
第11章	大型水力压裂油井的动态分析	(288)
11.1	引言	(288)
11.2	评价大型水力压裂油井的方法	(288)
11.3	分析无限导流能力的裂缝	(288)
11.4	分析有限导流能力的裂缝	(289)
11.5	评价有限导流性裂缝的地层特征	(292)
11.6	水力压裂试验对象的处理前测试	(297)
11.7	小结	(298)
第12章	钻杆试井方法	(300)
12.1	引言	(300)
12.2	钻杆试井设备和操作程序	(300)
12.3	建议的钻杆试井流动和关井时间	(301)
12.4	钻杆试井压力曲线故障寻找	(303)
12.5	检查钻杆试井数据的有效性和一致性	(306)
12.6	平均流量的计算	(306)
12.7	钻杆试井分析方法、用途和局限性	(307)
12.8	电缆地层测井数据评价	(324)
12.9	小结	(330)
第13章	干扰试井和脉冲试井的分析方法	(332)
13.1	引言	(332)
13.2	干扰试井分析技术	(332)

13.3	脉冲试井的压力动态分析	(335)
13.4	垂直脉冲试井的设计和分析方法	(344)
13.5	不等脉冲的设计和分析	(347)
13.6	小结	(358)
第14章	注入井不稳定试井与分析	(359)
14.1	引言	(359)
14.2	注入井吸入能力测试分析方法	(359)
14.3	压降试井分析方法	(368)
14.4	两级流量注入测试	(381)
14.5	台阶状流量注入试井技术	(386)
14.6	小结	(389)
第15章	多层油藏系统的试井方法	(390)
15.1	引言	(390)
15.2	多层油藏系统的识别	(390)
15.3	多层系统的压力动态分析	(390)
15.4	油层裂缝传导率的概念	(393)
15.5	压力产量关系式	(395)
15.6	窜流类型和连通程度的研究	(396)
15.7	多层油藏中的压力恢复特性	(397)
15.8	混合油藏中油井的压力分析方法	(397)
15.9	影响多层油藏动态的因素	(402)
15.10	层间窜流的经济评价	(402)
15.11	小结	(402)
第16章	非均质油藏体系的压力分析方法	(404)
16.1	引言	(404)
16.2	压力对岩石性质的影响	(404)
16.3	导致岩石非均质的主要原因	(404)
16.4	封闭边界附近的压力响应	(405)
16.5	水力扩散系数对储层动态的影响	(411)
16.6	计算储层非均质性的简单过程及向导图	(412)
16.7	估计裂缝走向或非均质性的一般方法	(413)
16.8	储层参数和裂缝方向的判断	(415)
16.9	通过多井试井来确定储层的非均质性	(416)
16.10	计算裂缝方向的方法	(427)
16.11	垂向干扰试井来计算二维渗透率	(427)
16.12	应用脉冲试井来描述储层非均质性	(439)
16.13	储层描述的不同模型和步骤的正确性判定	(440)
16.14	小结	(440)

附录 A 单位制之间的换算系数 (443)

附录 B 对比表和无因次函数 (449)

附录 C 通过直井、斜井和水平井的压降 (459)

 C.1 Hagedorn 和 Brown 法 (459)

 C.2 Beggs 和 Brill 法 (464)

附录 D 油、水的压力、体积和温度特性及相关状态方程 (468)

 D.1 原油的压力、体积和温度特性及相关性 (468)

 D.2 溶解油气比 (472)

 D.3 原油地层体积系数 (473)

 D.4 总地层体积系数 (475)

 D.5 原油密度 (475)

 D.6 原油黏度 (476)

 D.7 原油压缩系数 (479)

 D.8 储层岩石特性 (480)

 D.9 油层压力、温度、体积下水的特性 (481)

符号说明 (490)

参考资料 (495)

单位换算表 (506)

第1章 绪 论

1.1 油井试井及试井资料在石油工业中的作用

油井试井分析是油藏工程的一门分支学科。试井资料是通过流量和压力的不稳定试井分析获得的,对于判定油藏的产能具有重要意义。不稳定试井(压力的瞬变分析)也是估算油藏平均地层压力的一种方法。油藏工程师必须全面了解油藏(或油井)的状况和特征,以便全面分析油藏动态,预测各种生产运行模式下的产能。采油工程师必须知道生产条件和油藏动态分析中注水井最佳的注水情况。

在油藏工程中,压力是最有价值和最有用的资料,其直接或间接地参与油藏工程各阶段的计算。因此精确地获得油藏参数是比较重要的。通常,油井试井分析要达到以下目的:

- (1) 评价油藏特性和井况(井的措施效果);
- (2) 获得描述油藏的油藏参数;
- (3) 判断油井的所有钻井长度是否都有产层;
- (4) 估算井的表皮系数或钻井、完井的污染。根据污染程度来确定增产措施。

1.2 油井试井的历史和油井试井的用途

油井试井分析技术的大量论文和两篇专题论文^[1,3]已经出版。这些论文扩大了试井分析的范围,提出了很多新的观点和问题,解决了原先不能解决的难题,并且改变了试井分析不同阶段的方法。因此,出版一本最新的试井手册是非常必要的,以提供试井分析技术的最新发展情况。本手册就提供了最常用的不稳定试井分析技术及对适用范围的估计并用100多个油田实例阐明了大多数分析技术。图1-1表示了试井的用途。

1.3 油井试井数据的获得、分析和处理

从油井勘探开发到报废处理的整个生产过程中,要用大量的试井数据描述井的开发和生产状况。需要强调的是,复合型专业人员必须协同合作,才能开发和完成油井试井数据的管理程序。

对每口井及周期性选出的“关键井”进行原始井底压力的录取。关键井应占总井数的25%^[2]。参考文献[2]也表明至少每二三年在所有井中测试压力是有利的,有助于确定标准的油藏模型。另外,还要建立技术规范,确定试井数据采集的数量和间隔、方法和频率。图1-2给出了如何获得逻辑的、系统的、连续的试井数据及分析程序。

1.4 选择最佳的油井措施方案

决定一口井是否适合上优选的增产措施,关键在于诊断井并发现低产的原因。压力恢复、压力降落或中途试井、邻井的岩心分析数据和其他的信息都被用于完成这项工作。诊断之后,就可以进行油井增产措施优化及或大或小的水力压裂设计了。图1-3给出几套评价油井或油藏动态、油藏参数和质量的计算方法,还给出了如何评价为提高原油采收率和盈利能力而进行的优化完井增产措施。

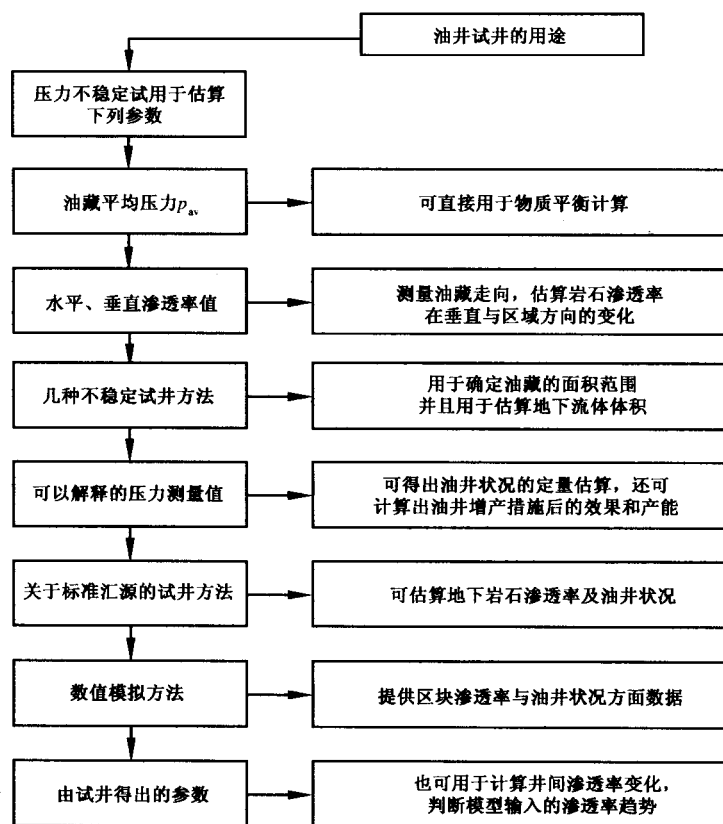


图 1-1 各种油藏参数及其用途

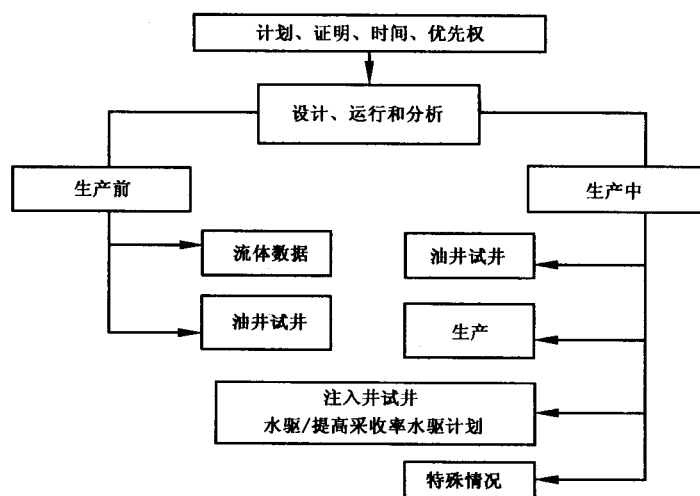


图 1-2 油井试井数据的逻辑获得过程和分析程序

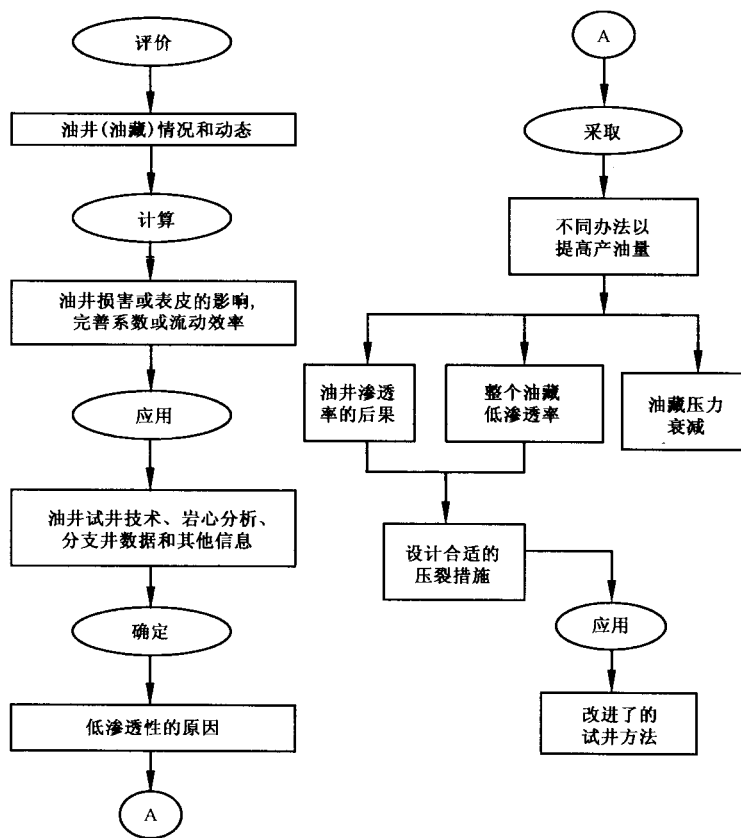


图 1-3 为优化措施选井

1.5 油藏系统特性描述方法

为获得有效的油井试井数据,分析过程需要精心地计划、设计、执行和评价,并需要团队的共同协作才能完成。图 1-4 和图 1-5 表明了油藏描述的常规方法及来源于各工程专业的输入数据。对地层学家选择的岩心样本进行分析、测量,可以为初步判断油藏岩性类型提供数据。与已知的地质和岩心数据对比,使用各种技术的试井结果是合理的。试井研究有助于认识流体边界、裂缝和渗透率的变化。已开采总产量和油藏压力特征的历史拟和就是要调整模型的油藏参数,直到模拟的动态与观察到的或历史动态相吻合。

图 1-5 给出原油流动和压力的分析方法。有效的试井分析理论和实践将在以下各章进行论述。

1.6 范围和目的

本书对于专业的油藏工程师、教师、大学生以及那些评价油藏特性和油井井况的人,都是非常有用的。油藏专业人员可以用本书中的数据设计和运行不稳定试井、分析测试结果以获得真实的油井动态参数。本书的重点是给出了目前最通用的解释方法。

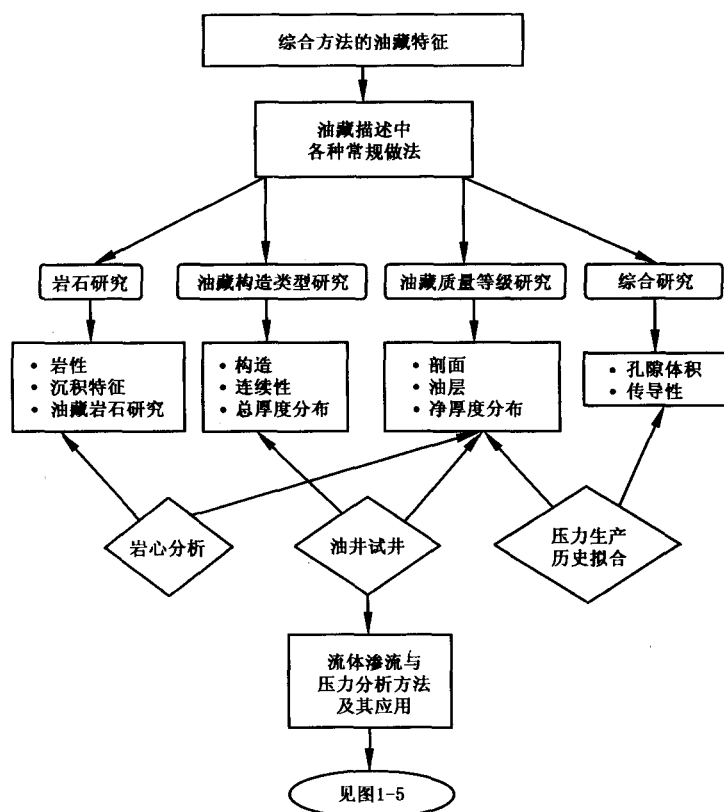


图 1-4 应用综合方法描述油藏系统特征的流程图

1.7 组织结构

本书的内容及作用：

(1) 作为极其重要的、具有指导意义的出版物, 本书提供油井测试的理论和实际方法并指出了其在石油工业中的作用。

(2) 对于石油工业、公司、学者、石油专家和技术管理人员是非常有价值的。

(3) 从实践角度出发, 本书涵盖了油井测试的数据获得及解释的基本概念和方法。

(4) 现代油气井测试的方法和压力不稳定试井分析技术。

(5) 试井分析技术的应用实例。

(6) 与压力不稳定试井的分析技术及其解释相关的、极具实际意义的资源。

(7) 理论、实际相结合的试井方法及其在油藏工程管理中的作用。

(8) 逐步解决现实工程中存在问题的例子, 使问题变得更容易理解。

(9) 各种图表、公式便于迅速查阅, 也便于油井测试及分析工作。

(10) 本书涉及最新的信息、数据和技术, 并通过实例及问题来阐述概念、方法、解释、结果、推荐方法及其在工程中的应用。本书还包括历史文献、总结和参考。

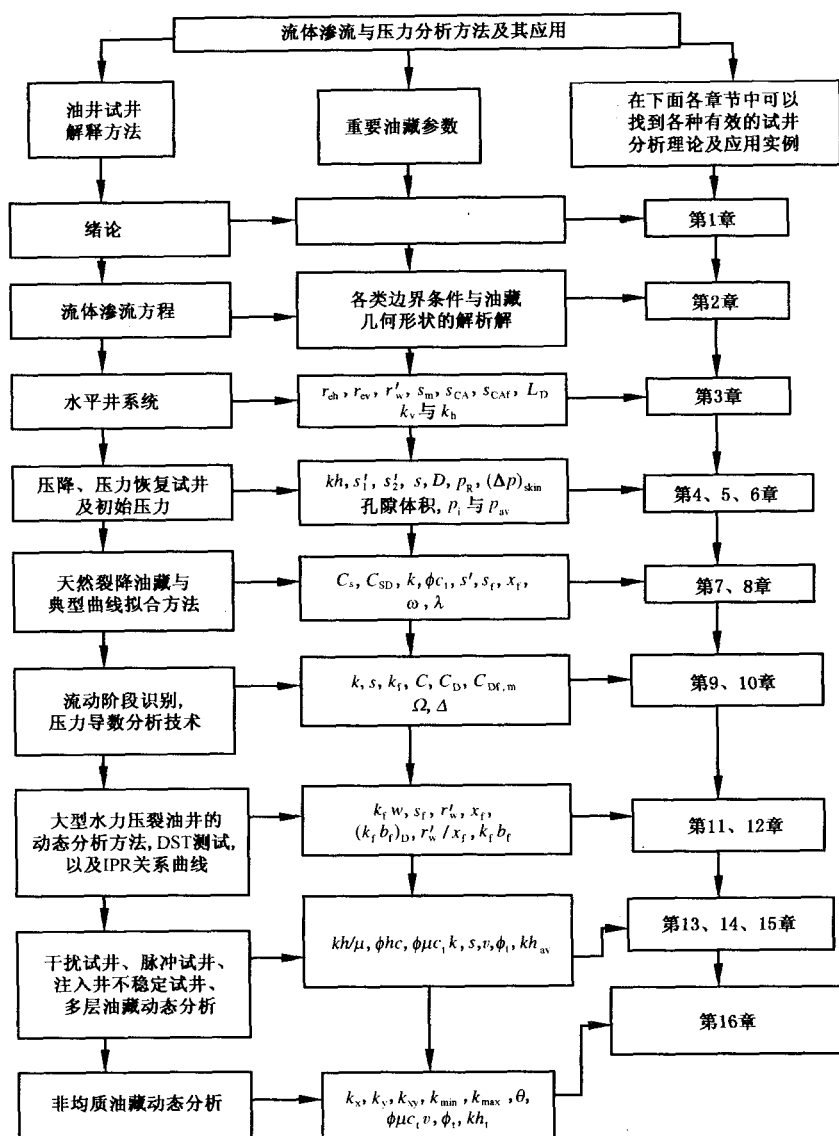


图 1-5 用各种压力分析方法确定油藏的各项重要参数

第1章概述了油井测试和分析技术,还简短讨论了单位换算系数及其SI(公制)单位系统。附录A提供了单位换算表。

第2章介绍了流体流动基本方程以及各种边界条件和油藏几何形状下求出的解。在设计 and 解释流量测试、压力测试时需要用这些解。本章提供了流体流动方程的分析解。讨论了一些对这些方程最有用的解,诸如幂积分、有限差分、图解,讨论了流量分析时方程的选择,重点讨论了幂积分解,描述了径向、不稳定流动。

第3章概括介绍了对油藏水平井的讨论。水平井在给定时期内能增加供油面积,同时高渗透率的油藏减少了近井地带的紊流,提高了油井供液能力。水平井在油藏中有很大的潜力。