

科技丛书
大港油田

11

大港油田科技丛书编委会编

油气藏探边测试方法与应用



石油工业出版社
P E T R O L E U M

I N D U S T R Y P R E S S

大港油田科技丛书 11

油气藏探边测试方法与应用

大港油田科技丛书编委会编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍大港油田油气藏探边测试技术方法与应用,广泛论述了探边测试的理论基础、解释模型、使用方法、试井设计以及在大港油田勘探开发中应用的各种实例。第一章是引论,第二章至第七章是写探边测试的理论与方法,第八章是试井设计,第九章、第十章介绍应用实例,最后一章是展望。本书力求做到内容新颖、理论透彻、方法可靠、言辞简明扼要。

本书主要读者对象是油气藏工程师,特别适合于年轻的油气藏工程技术人员学习,也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气藏探边测试方法与应用/大港油田科技丛书编委会编.
北京:石油工业出版社,1999.10
(大港油田科技丛书;11)
ISBN 7-5021-2634-1

I. 油…

II. 科…

III. 油气藏—测试技术,探边

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45834 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里一区一号楼)
河北省徐水县激光照排厂排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 250 千字 印 1—2300

1999 年 10 月北京第 1 版 1999 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2634-1/TE·2116

定价: 16.00 元

大港油田精神文明丛书总编委

主 任：王 鹏 姚和清

副 主 任：张德寿（常务）

主任委员：孙希敬 陈玉瑾 高兰成 朱敬成 郭德宝 张大德
俞叔武 于庄敬 薛士荣 刘志谦 王鹤龄 于树方
蒋永佑 华勇魁 于秋云 王兴隆 段新坎 黄建庆
李润寿 张国欣

大港油田科技丛书编委

主 任：孙希敬

副 主 任：张大德 于庄敬（常务） 薛士荣

委 员：吴永平 曲经文 周嘉玺 李文瑞 马世煜 毛立言
宋伯韬 周学仁 李学文 刘鸿斌 牟祥汇 孙宝绪
李 淦 王巧月

序

大港油田三十多年来在勘探、开发和建设方面都取得了长足的进步，物质文明和精神文明建设结出丰硕成果，创造了许多成功经验，这些都是广大职工共同努力，发扬艰苦奋斗、顽强拼搏、无私奉献的创业精神的结果。为了使这些成果和经验系统化、理论化，形成财富，促进油田勘探开发建设进一步发展，经济效益大幅度提高，大港油田领导提出编写大港油田“科技丛书”。这个安排引起油田党委的重视，经过认真研究，决定扩大“丛书”编写范围，于1997年5月油田党、政联合下发文件，决定编撰“大港油田精神文明建设丛书”，成立了精神文明建设丛书编委会，下设七个系列，“科技丛书”是其中之一，并成立了编委会。

“科技丛书”怎样写，以哪些读者为对象，写成什么样的书，对这些问题我们花费了较长时间，听取了各方面的意见，进行广泛深入讨论，逐渐形成了明确的指导思想。大家认为这套“丛书”应有独特的品质，它不同于教科书，不同于科普读物，不同于论文集，不同于经验总结（成果汇编），也不同于工具手册。要突出“科技”和“大港”两个特色。“科技”特色是总结大港油田三十多年极其丰富的科学技术实践和创造发明，做到有理论基础、方法原理、实用程序和实践成果，在“科技”特色的基础上，突出“大港”特色，写出大港发明创造的技术，在国内外有影响的技术，使用过的技术，试验过的技术，并有成功和失败的实例分析，还要讨论一些技术的实用性和发展方向，全书不是简单的技术描述和实际案例分析，而是一次再提高再创造，使读者特别是中青年科学技术人员和各级管理干部，还有非本专业的技术人员，有原理可查，有方法可学，有实例可看，有经验可借鉴，起到承上启下的作用。

这套“丛书”为广大读者提供大港油田科技发展的历程。大港油田三十多年的发展建设，经历了风风雨雨，有成功的经验和失败的教训，学会借鉴前人的经验和教训，少走弯路，杜绝重复劳动，对我们事业的兴旺发达和科技人员成长都有一定的好处。“丛书”还展示了大港油田的科技全貌，反映了大港油田的技术状况，为广大青年技术干部、各级管理人员和非本专业技术干部了解油田技术状况修通了高速公路。还应说明，活跃在大港油田勘探开发早、中期各条战线的技术骨干，现在多数已经退休，在工作上完成了交接。有许多退休老专家参加“丛书”的编撰工作，把他们多年积累的宝贵经验留下来，也算老专家们在技术上对大港油田的干部职工有了个好交代。这套“丛书”正式出版适逢大港油田勘探开发建设三十五周年之际，谨以此书献给为大港油田建设做出卓越贡献的人们。

这套“科技丛书”，按照油田的习惯说法，包括十个专业共24册约800万字。即：

第一册 勘探历程与经验

第二册 第三系石油地质基础

第三册 油气藏与分布

第四册 新区、新层系、新领域

第五册 地质实验技术

第六册 地震勘探资料采集技术

- 第七册 地震勘探资料处理和解释技术
- 第八册 大港油田开发实践
- 第九册 枣园高凝高粘中低渗断块油田开发
- 第十册 提高采收率技术
- 第十一册 油气藏探边测试方法与应用
- 第十二册 钻井工程技术 (1)
- 第十三册 钻井工程技术 (2)
- 第十四册 钻井工程技术 (3)
- 第十五册 滩海工程技术
- 第十六册 录井技术
- 第十七册 测井技术 (1)
- 第十八册 测井技术 (2)
- 第十九册 电泵采油与分层注水
- 第二十册 防砂工艺技术
- 第二十一册 压裂与酸化工艺技术
- 第二十二册 试油与油井大修
- 第二十三册 油田地面工程设计与施工
- 第二十四册 石油炼制

为了编撰好“丛书”，确保达到设计要求，使各分册有个好质量，编委会认真研究精心设计各册编写提纲，这是写好“丛书”的基础。安排章节的作者力争由学科带头人执笔，分册负责人全文贯通，提出修改意见、把关，负责完成初稿，这是保证“丛书”质量的重要环节。然后由编委会组织 6 至 7 名专家进行审查定稿。尽管这方面我们做了不少工作，由于水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

孙希敬

1999 年 2 月 4 日

前 言

探边测试技术是国际上 70 年代以后发展较快的一门高科技技术，它是在油田开发试井技术的基础上应运而生的，目的是为地质人员勘探开发决策提供可靠的信息。随着勘探开发技术发展的需要，在一个新的地区第一口井出油后，怎样能够花最少的钱以最快的速度掌握储油层的各种参数，特别是储油层的分布情况、延伸范围、边界大小、动储量的分布情况等，是非常关键的。这些重要参数，只有通过油井探边测试技术才能较快地获得。这样就使地质勘探人员对地下储层的动态有一个基本了解，给决策人员提供进一步扩大勘探的依据。

本书由崔迪生同志编写，是在大港油田十几年探边测试技术实践与研究成果的基础上编写的，作者为编写此书收集了大量的实际资料，分析了大港油田探边测试作业的各种实例和历年来的研究成果，目的是使读者能够了解大港油田探边测试技术的发展情况、应用方法、开发软件，以及在石油勘探开发中的作用，使年轻的技术人员有方法可学、有实例可借鉴，从而进一步促进探边测试技术的发展。

本书在编写过程中得到了科技丛书编委马世煜、地质研究院副院长何鲜、科技科花新生、油田科技部王巧月等同志的帮助；初稿形成后由郭光前同志负责技术审核，于庄敬同志对该书进行通篇审查并提出修改意见，经作者修改后提交科技丛书专业委员会组织的审查小组讨论，再次提出完善意见。审查会由于庄敬主持，孙希敬、周嘉玺、何鲜、郭光前、王巧月和石油工业出版社叶敬东同志参加。后经作者再次修改成文，最后于庄敬同志审查定稿出版。本书虽经多次审查、修改，仍难免存在不少问题，恳请读者批评指正。

于庄敬
1998 年 12 月

目 录

第一章 引论	(1)
第一节 探边测试释义	(1)
第二节 试井技术发展简要回顾	(2)
第三节 大港油田探边测试技术的发展	(4)
第二章 理论基础	(7)
第一节 概述	(7)
第二节 无量纲变量	(7)
第三节 渗流方式	(8)
第四节 多孔介质渗流方程及其压力解	(9)
第五节 渗流状态	(11)
第六节 探测半径与供油半径	(15)
第七节 叠加原理	(15)
第八节 气井试井	(17)
第三章 解释模型	(18)
第一节 概述	(18)
第二节 试井模型的表述与识别	(18)
第三节 井筒模型	(19)
第四节 储层模型	(29)
第五节 边界模型	(37)
第四章 测试方法	(48)
第一节 概述	(48)
第二节 压力下降测试方法	(48)
第三节 压力恢复测试方法	(50)
第四节 变流量测试方法	(51)
第五节 流压曲线测试方法	(52)
第五章 分析方法	(54)
第一节 概述	(54)
第二节 半对数分析方法	(54)
第三节 双对数典型曲线拟合分析方法	(61)
第四节 无量纲霍纳压力曲线拟合分析方法	(63)
第五节 压力史拟合分析方法	(64)
第六节 特定分析方法	(65)
第六章 地层压力计算方法	(68)
第一节 概述	(68)
第二节 霍纳法	(69)

第三节	MBH 法	(69)
第四节	公式计算法	(72)
第五节	压力导数法	(73)
第六节	压力史拟合法	(74)
第七章	储量计算方法	(75)
第一节	概述	(75)
第二节	压降斜率计算法	(75)
第三节	压力曲线拟合法	(76)
第四节	探测半径计算法	(76)
第五节	物质平衡法	(77)
第八章	试井设计	(78)
第一节	概述	(78)
第二节	明确测试目的	(78)
第三节	基础数据的收集与分析	(79)
第四节	测试方法的选择	(81)
第五节	测试仪器设备的选择	(83)
第六节	测试时间的确定	(83)
第七节	测试梯度数据	(85)
第八节	其它	(85)
第九章	探边测试在油气藏早期评价中的应用	(86)
第一节	概述	(86)
第二节	应用实例	(86)
第十章	探边测试在油气藏开发动态监测中的应用	(110)
第一节	概述	(110)
第二节	应用实例	(110)
第十一章	展望	(127)
第一节	引子	(127)
第二节	探边测试技术的应用必将越来越广阔	(127)
第三节	油气藏探边测试方法必将越来越完善	(131)
附录 A	符号意义与单位	(133)
附录 B	地层流体 PVT 参数计算	(137)
附录 C	气井试井分析常用公式	(141)
参考文献		(143)

第一章 引 论

第一节 探边测试释义

探边测试是从试井中引申出来的。

试井是什么呢？用试井钢丝系上一个铅锤下入井中探测井底深度是最简单的试井，如果井底沉积了压裂砂或地层出的砂子，那么就可以使用这种方法探测砂面深度。虽说使用这种方法探测到的井底深度有时不如使用钻杆或油管探到的深度那样准确，但它使用起来比较方便、省事。用回声仪探测抽油井环空的液面深度和用示功仪测试抽油井深井泵工作状况的示功图也是试井，用来研究抽油井的生产特性，属于低压井试井。最近，似乎要将测量吸水剖面和产液剖面等生产测井项目也要纳入到试井工作范围中来。

但是，真正意义的试井是下压力计到井底测取井底压力，用来研究井和储层的生产特性。如测量从井口到井底不同深度的压力梯度曲线，停在井底测试油层中部的流动压力或静止压力点，测试一段时间油井稳定生产的流压曲线或关井后的静压曲线。如果测取连续几个不同工作制度下生产的稳定流压进行产能分析，就称之为系统试井或产能试井。前述测试都是在井生产或关闭的稳定条件下进行的，所以称为稳定试井。如果连续测取油井改变工作制度条件下井底压力随时间的变化曲线就称之为不稳定试井，包括关井测试压力恢复、开井测试压力下降和改变工作制度测试变流量压力曲线，这些测试是在单井上进行的又称之为单井不稳定试井。还有多井不稳定试井，在一口井或多口井上测试邻近一口生产井通过改变工作制度引起的压力激动传播情况，测试压力变化的井叫“观察井”，产生压力激动的井叫“激动井”。这种方法用来探测两井之间的地层是否连通和在井间地层连通情况下计算井间地层的渗流与储容特性参数。由于不稳定试井有着广泛的用途，使用较多，习惯上将“不稳定试井”称为“试井”。

单井不稳定试井可以用来计算地层压力、地层渗流参数（包括流动系数 Kh/μ 、产能系数 Kh 、流度 K/μ 和地层有效渗透率 K ）和井的表皮系数 S ，是评价地层、完井工艺和措施效果的一种有效方法。特别是利用测试压力恢复来计算地层压力，可以为录取地层压力资料减少关井时间，节约测试成本。这种试井一般测试时间不要求很长，几个小时到 3 天左右，很少有超过一个星期的。

探边测试是试井的扩充，通过延长测试时间来达到了解边界情况的目的。因此，探边测试除了能够提供一般试井所能提供的参数与信息以外，还可以提供井附近的边界信息，井所控制的供油范围。如果在一个新的油气藏中，只有一口井，利用这口井就可以探测整个油气藏的边界和大小，包括确定边界的性质、距离、油藏形状，计算油气地质储量、面积和天然能量的大小。探边测试需要的时间比一般试井要长得多，一般从一个星期到 20 天左右，也有测试一个月或数月之久的。这里通常是指用钢丝或电缆将压力计下入井底进行测压的情况。如果将目前正在兴起的置入井底生产管柱的永久式压力计用来进行探边测试，当然是一种理想的方式，但是它的成本太高，目前难以广泛使用。

探边测试这一提法与一般的试井没有严格的区别。在一般试井中也有油气藏边界问题，只不过不将边界问题作为主要的测试目的。只有将油气藏边界问题列入测试的主要目的或最终目的时，才称之为探边测试。

由于边界的概念有点笼统，探边测试的内涵可以分为两种情况。通常需要通过试井落实井的某一个方向的边界情况，这就可以称为探边测试了，也有的将此称为“边界测试”。如果要想从一口井上探测到油气藏的整个边界或大小，计算含油气面积和地质储量，也称之为探边测试，但是与前者相比，在测试时间和方法上应该有所不同，取得的信息也多了，在石油文献中也有将此称为“范围测试”的。在本书中无论测试目的是属于前者或后者，都称为探边测试。

正如前面已经指出的，探边测试提供的信息是非常多的。尽管如此，但也只是认识和评价油藏的一种方法，它也有局限性。比如探边测试探测的边界无法判定其方位，只能结合地质构造并位图进行综合分析；不能探测与井不连通的邻近油藏或断块的情况；由于井和油藏的复杂多样性，试井解释存在多解性，这些问题只能依靠试井与地质的综合解释来解决。此外，试井解释的成功与否还与解释人员的技术素质、对国内外技术信息的掌握程度、实际经验的多少等方面有关。

第二节 试井技术发展简要回顾

在石油工业中，试井是一门年轻的学科，至今才有五十多年的历史。但是，由于试井有着广泛的用途，试井技术的发展速度是相当快的。另外，电子技术的飞速发展，对试井技术发展的影响起了不可估量的作用，形成了崭新的现代试井技术或现代试井方法。

首先，试井测试技术获得了令人瞩目的发展。

在测试仪器方面，由原来的机械压力计测试压力数据发展到用电子压力计（包括石英晶体压力计）测试压力数据。电子压力计特别是高精度电子压力计的诞生无疑是压力测试仪器的一次革命，由于它的先进性和优越性，使试井测试技术产生了质的飞跃。

1) 大大提高了压力计的测试精度和分辨率，使得测试数据能更好地反映井和地层的微小变化。

2) 测试的信息增多。一方面是单位时间采集的数据比机械压力计要多，可以小到一秒钟采集一个数据点。另一方面，可以同时测取压力和温度随时间或深度变化的数据，获取更多的井下信息，为进行可靠的试井分析提供了更多的资料。

3) 地面直读式电子压力计可以将压力温度信息及时传输到地面，真正实现了压力温度资料的实时采集，这对于及时分析井况、井下仪器的工况和油藏压力反映特征，采取下步措施，指导测试工作，提供了有利的条件和依据，同时对指导勘探开发工作赢得了时间和效益。

4) 大大提高了测试工作的自动化水平，使得压力数据的获取从机械的和手工劳动中解放出来，变成用计算机操作来采集、整理数据。

在测试设备方面，出现了电缆试井车。这种试井车既能用钢丝起下压力计，又能用电缆起下压力计，集发电、注脂和采样于一体，使测试功能大大加强，使用起来更加方便。

在测试工艺方面，不稳定压力测试不再局限在自喷井，在非自喷井上出现了 DST（钻杆测试或地层测试）、RFT（电缆地层测试）和环空测试压力等技术，这些为全面使用试井，

方法评价井和地层特性创造了条件。

其次，试井解释技术的发展更加鼓舞人心。

主要的进展有以下几个方面：

1) 双对数典型曲线拟合分析技术的诞生和应用，打破了半对数分析的一统天下，形成了现代试井分析技术或方法。双对数曲线通常是绘制在双对数坐标上的压力差和压力导数曲线，可以实现实测资料曲线与理论曲线拟合分析。双对数曲线，特别是压力导数曲线，为确定和选择试井解释模型提供了诊断工具。双对数曲线拟合分析又能计算需要的参数，计算参数可以和常规分析方法的计算结果进行对照和检验，同时还可以计算常规方法不能计算的参数，包括常规方法不能分析的资料。

2) 试井解释模型随着对井和油藏的复杂多样性的认识的深化而不断扩充，随着对井的钻采技术发展而发展，并且已经实现系列化和组合化。

试井解释模型是进行试井分析的理论依据，试井分析理论一个主要方面是建立既能满足需要又要符合实际情况的试井解释模型。随着试井理论研究者对井和油藏特性的复杂多样性的深化认识，提出了许多新的试井解释模型。如描述井筒流体性质变化的模型就有定井筒储集效应、变井筒储集效应、相重分布现象等。描述井筒表面的有表皮效应和非达西流动。描述井筒附近地层的经过水力压裂改造的有有限导流、无限导流、均匀流动垂直裂缝和水平裂缝井模型。描述井筒几何形状的模型有直井、斜井、水平井和部分射开井等。特别随着钻井技术的发展为了提高单井产量和采油速度，广泛采用了水平井的技术，从而对水平井试井的解释模型的研究相对增多。在描述储层特性方面，除了均质模型以外，提出了双重以及多重孔隙介质、双重以及多重渗透率介质、复合油藏和多层油藏等模型，特别是对多层油藏试井模型的研究吸引了许多研究者，经过广泛深入的研究已经达到实用水平。另外复合油藏研究也取得了突破性的成果，使得包括二次采油和三次采油在内的许多油藏中渗流特性和储容特性变化引起的压力变化能够给予定量的描述和解释。在油藏边界特性方面，提出了不渗透边界及其组合、渗漏断层、沟渠状油藏（或条带状油藏）、岩性尖灭的压力反映特征，除了定压边界和封闭边界以外，还提出了变压边界的概念。基于人工智能在试井解释中的应用和试井模型在拉普拉斯空间的数学表述取得新的进展，试井解释模型出现系列化和组合化的倾向。系列化是指试井模型可以分为三个组成部分，即井筒、储层和边界，通常在试井分析过程中，将其对应地分为早、中、晚三个期或流动阶段，每个部分可以有許多独立的模型，形成一个系列，如早期井筒模型包括井筒流体特性、井筒几何形状、井筒表皮效应和井筒附近地层渗流性质变化引起的压力反映。其中流体特性又包括井筒储集、相重分布、相变等等，井筒几何形状又包括直井、斜井和水平井等等，井筒表皮效应又包括机械表皮效应和非达西流动引起的表皮效应，井筒附近地层渗流性质变化又包括地层伤害和压裂酸化等改造活动产生的影响。组合化是从三个系列中各取一个或多个部件组合成一个完整的试井解释模型，这样可以根据实际需要，组合出许多模型，大大方便了试井解释的计算机化。

3) 试井解释计算机化，这也是现代试井解释技术的又一个显著特征。包括数据处理、曲线分析、参数计算和结果输出，都由计算机代劳了，大大提高了解释效率和可靠性，使得许多过去人工无法完成的解释工作现在变得轻而易举了。

4) 人工智能的利用使试井解释模型的识别变成自动化，这也是试井解释计算机化的产物，即使解释经验不足的技术人员也能达到专家解释水平，并且，使得一些常规不能分析的资料也可能做出准确的分析。

5) 自动回归分析技术的诞生和经过完善达到实用水平是试井解释技术的又一次重大创新。自动回归技术又称之为非线性回归技术,当试井解释模型确定之后,找出一组需要计算参数的初值,代入相应的试井数学模型中,计算出一组压力值与实测压力进行比较,使得计算压力与实测压力之差的平方和达到最小,满足预定的要求,如果达不到要求,计算一组新的参数值再代入模型,经过反复迭代计算很快就能求到所要求的值。使用这种分析技术能够替代图解法分析,也可以两种分析方法互相对照与检验,这种技术的使用也是试井解释计算机化的结果。

以上概述了试井技术的发展。当然,试井技术的发展也包含了探边测试技术的发展。高精度电子压力计特别是地面直读式高精度电子压力计的出现,为探边测试提供了理想的测试仪器,测试时间可以任意地延长,测试的数据精度可以满足边界分析的需要。各种描述油气藏外部边界和流动系统内部不连续性边界的试井解释模型不断充实,为探边测试资料的解释提供了更多的理论工具。此外,现代的计算机试井解释技术,也为探边测试资料的解释提供了先进可靠的手段,一些用手工分析无法得到的油藏边界信息,通过计算机及好的试井解释软件就能分析出来。所有这些为更好地开展探边测试创造了条件。

第三节 大港油田探边测试技术的发展

大港油田从1988年开始开展了油气藏探边测试。当时从美国引进了一套先进的高精度地面直读式电子压力计测试仪器与设备,包括电子压力计的标定仪器与设备和当时国际上最先进的试井解释软件。为了使用好这套设备,真正地发挥它们的作用,针对大港油田地下情况很复杂,勘探开发程度都比较高的情况,负责引进的有关领导提出开展探边测试,这个主张得到了油田有关领导的赞同和支持,也得到了勘探和开发部门有关同志的支持。十年过去了,大港油田油气藏探边测试技术有了长足的发展,取得了较好的效果,为油田勘探开发工作做出了应有的贡献。

一、测试仪器设备配套不断完善与更新

引进第一套地面直读式高精度电子压力计测试系统以后,做了许多配套工作,特别值得一提的是在压力计标定方面建立了国家技术监督局认可的一等计量标准实验室,获得中国计量科学研究院颁发的“一等活塞式压力计测试合格证”、“工作环境合格证”和中国石油天然气集团公司计量部门颁发的“一等计量检定员证”。这在当时,石油系统是第一家首先达到了这样的标准。为了满足探边测试的需要,又于1994年从加拿大引进了第二套高精度地面直读式电子压力计测试系统和标定系统,这套系统包括了小直径电子压力计,使得能够开展环空测试,为非自喷井的探边测试创造了条件。此外,购置了两台电缆钢丝综合试井车及其它配套设备,为油气藏探边测试的开展提供了物质条件。为了将探边测试技术引入到煤层气测试领域,近年我们又装备了煤层气井测试设备,开展了煤层气的测试工作。

二、在引进新的试井解释软件的同时不断开发自己的试井解释软件

试井解释的计算机化,就离不开好的试井解释软件,对于探边测试来说尤为如此。虽说引进的第一套试井解释软件是当时世界上最先进的软件,但由于是英文的,不便于使用。紧接着就开发出了自己的DHC试井解释软件。这套解释软件除了具备与引进软件相同的功能以外,实现了在汉字系统下操作,所有提示显示的都是汉字,操作命令采用汉语单词“缩拼法”,即用汉语单词的第一个拼音字母组合而成,使操作命令变得短小易记、操作快速。这

套软件的开发成功除了满足自己的使用需要以外，还在全国石油系统进行了推广应用。随着计算机专家系统的诞生与应用，我们又开发出了自己的试井智能解释软件，这个软件除了能够自动识别试井解释模型以外，还能够使用非线性回归方法自动计算参数。后来，又引进了加拿大 FEKETE 公司的 FAST 试井解释软件，美国 SSI 的 WORKBENCH 试井解释软件，后者包括装在工作站上的和微机上的两种版本。我们与石油大学等单位共同开发的试井解释软件平台也已经投入使用。所有这些试井解释软件为大港油田探边测试的开展提供了有力的解释工具。

三、配备高水平的技术干部从事实践与研究，不断培养造就新的技术人才和接班人

为了搞好探边测试，除了做好仪器、设备和解释软件等装备工作以外，配备、培养技术人才是关键。一开始，油田领导就配备了一流的试井技术干部从事这项工作，他们有在油田试井工作岗位上工作十五年以上的经历。有丰富的实践经验和较高的理论水平，使得这项工作得以顺利开展。此外，还配备了从北京大学、石油大学等学校新分配来的大学生，增添了新鲜血液。为了提高技术水平和培养后继人才，先后四次派人出国学习考察，选派年轻的技术干部到大学培训与深造，邀请试井界的老专家（其中有原中科院院士童宪章教授）来油田讲授试井技术，采取以老带新的方法培训技术人才。通过多方面的努力，培养出了一支高水平的测试队伍。这支队伍能够在复杂条件下从事测试工作，具有较高的试井解释理论水平和技术水平，还能开展较高水平的试井科研工作。

四、不断开拓新思路、新领域，使探边测试的技术水平不断提高

油气藏探边测试技术在试井领域中并不是一项新技术，最早在 50 年代就提出来了。但是，由于使用机械压力计存在测试精度问题和不能连续长时间测试的问题，没有引起足够的重视。高精度电子压力计的诞生为探边测试提供了理想的工具。但就如何开展油气藏探边测试，还面临许多技术难题。首先遇到的是方法问题。方法问题中包括两个方面，一是当时流行的用试井计算出储量的方法有许多，同一个资料使用不同方法得出的结论有差异，究竟使用那种方法是正确的呢？二是探边测试需要的时间很长，如果是开井测试压力下降还容易被接受，若要关井测试压力恢复由于影响油气生产就有阻力了。我们使用油藏数值模拟方法编制的单井模拟软件对各种试井计算储量的方法进行了分析与检验，证实了测试压力下降资料计算储量的方法是精确的，对于压力恢复资料只能采取压力曲线拟合的方法先计算面积，然后用容积法计算储量。为了解决关井测试时间长的问题，经过反复探讨与论证，大胆使用了变流量试井进行探边测试，为探边测试的开展拓宽了道路。其次遇到的是非自喷井的测试问题。无论是探井还是开发井，自喷井越来越少，而以前探边测试只能在自喷井上进行，影响了这项技术的广泛应用。为了能够在非自喷井进行探边测试，经过论证，引进了小直径电子压力计，通过环空测试的方法进行探边测试，解决了非自喷井的探边测试问题，填补了油气藏探边测试方面的一个空白。此外，在试井解释方法方面，我们收集调研了大量国内外的技术情报资料，对新的试井理论与方法，特别是各种类型的油气藏边界在不稳定压力曲线上的反映特征与分析方法，进行了广泛的研究。如岩性尖灭边界问题，过去将这种边界和不渗透断层混为一谈，实际上在不稳定压力曲线上它们有着完全不同的反映特征和分析方法。又如连通断层问题，有不完全错开的断层连通和完全错开断层连通的问题。完全错开断层连通有一个沿着断层面流通的问题，随着研究的深入，根据它们的流动特性可以分为许多情形。所有这些只有在不断地跟踪国内外的技术信息情报才能获取。同时，把这些新认识、新方法、新成果不断地注入到探边测试资料的解释工作中来，使解释水平不断提高，解释成果更加符

合实际情况。

五、探边测试结硕果，为油田勘探开发发挥了应有的作用

转眼间过去了十个寒暑，经过对测试设备的配套完善与电子压力计的检定达标；经过对探边理论的探讨、测试方法的推敲和解释技术的不断完善；经过对上百口井的测试，包括油井、气井和注水井，也包括直井、斜井和水平井，测试时间最短的有十多天，最长的近两个月，不论严寒酷暑，每天 24 小时坚守在井上，将一盘盘数据采集回来，再经过解释人员的精心解释，反复推敲，终于结出了一串串硕果，赢得了用户的满意。探边测试在油田勘探开发工作中充分发挥了作用，取得较好效益。有的井经过探边测试油藏储量和面积成倍的增大，加快了勘探开发速度；有的井落实了储量面积，提高了打井的成功率，减少了开发的风险；也有的井经过探边测试发现储量面积比预计的小得多或构造形状有变化，改变了钻井位置或减少了钻井数。十年来经过探边测试落实的储量在 100 万吨级的油气藏就达 6 个以上，通过探边测试避免钻的落空井就达数十口之多。取得的大量的其它参数为油藏评价、措施效果分析、油藏动态分析和下步钻井方案的确定等方面提供了地下信息。

在开展油气藏探边测试的同时，完成了 10 多项试井科研项目并且获得了奖励，其中，有一项获得总公司科技进步二等奖，有两项获得局级科技进步特等奖，有三项获得局级科技进步一等奖。开发的 DHC 试井解释软件在全国石油系统推广应用了 80 多套。在总公司一级的会议上和全国性石油刊物上发表论文 40 多篇，其中有 5 篇获得了优秀论文奖。

除了在本油田开展油气藏探边测试服务以外，还对兄弟油田和中联煤层气公司等进行了测试服务，包括传授探边测试技术、试井资料解释、压力计标定、试井软件操作培训、油气井测试和煤层气测试等项目。从 1995 年开始已经连续 4 年在塔里木油田开展电子压力计测试服务，已完成各类油气井测试共 30 井次，其中包括日产千吨的水平井和深度达 5800m 的深井，受到了塔里木油田有关方面的认可。此外，通过中国石油天然气集团公司推荐，承担并已完成三个有关探边测试和一般试井测试行业标准的编写任务。

大港油田使用高精度电子压力计开展探边测试工作比较早，解释水平也比较高。尽管如此，还存在许多不足，要认真地总结经验教训，不断地完善提高，才能使探边测试在油田勘探开发工作中发挥更大的作用。

第二章 理论基础

第一节 概 述

本章介绍探边测试的理论基础，也是试井的理论基础，包括试井分析中常用的无因次变量、油气渗流方式、渗流方程及其压力解、渗流状态、探测半径和供油半径、叠加原理。

在石油工业中，试井是使用数学知识最多的学科之一。涉及最多是偏微分方程即数学物理方程。此外，数值计算应用也很多，如用数值方法研究试井理论问题，用油藏数值模拟的方法模拟计算井底压力数据，进行非线性回归等。

油气是储存在地下的多孔介质中，通过多孔介质中的渗流才能到达井中并被采出地面。使用数学方法可以定量地描述油、气和水在地下多孔介质渗流的物理变化规律，能够对油气藏的许多特性给予定量的解释。能够反映这种变化规律，并且易于观测到的现象莫过于井底压力了，通过测试井底压力变化就可以研究井筒、油气藏内部直至外部边界的许多特征，包括渗流参数（流动系数 Kh/μ 、流度 K/μ 、有效渗透率 K ）、衡量井的完善程度的表皮系数、边界性质与距离和与井连通的全部孔隙体积及储量。渗流特性主要反映油气被采出地面的速度，而油气藏边界与储量，就是探边测试所关心的问题。可以这么说，渗流速度只影响开采速度，开采速度是可以通过各种改造方法改变的，但是地下是否有油，有多少油是不能以人们的意志为转移的，这是问题的关键，是油气勘探开发领导者所最关心的问题。所以说试井能够探测油气藏的边界与大小比计算渗流参数在某种意义上更加重要，或更容易被油气勘探和开发部门的领导所重视。

下面在介绍渗流方程、渗流状态和探测半径时，有很多地方是与油气藏的储容空间相关的。为了简单起见，本书不介绍公式的推导过程。

第二节 无量纲变量

人们平时研究问题、衡量事物一般使用的量是有量纲的，简言之是有单位的。有时为了某种需要将有量纲加以组合使之无量纲化。试井分析方法中就引入了许多无量纲变量，这样使问题的研究更为简单，使用更方便，导出的公式不受单位制的影响，使理论研究成果具有通用性。为了简单起见，本书在介绍“理论基础”、“解释模型”和“测试方法”时，基本上都使用无量纲变量写出公式，在“分析方法”、“地层压力计算方法”和“储量计算方法”三章中，写出有量纲变量的公式，从无量纲变量表达的公式变到有量纲变量表达的公式是直截了当的。

下面介绍一些试井分析中常用的无量纲变量，并用法定单位（SI）表示出来。注意本书使用的法定单位中渗透率（ K ）的单位是 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 而不是 μm^2 ，这样公式的系数与使用 μm^2 写出的公式是不同的。

无量纲压力 p_D ：

$$p_D = \frac{Kh [p_i - p(r, t)]}{1.842qB\mu} \quad (2-1)$$

无量纲井底压力 p_{wD} :

$$p_{wD} = \frac{Kh [p_i - p_{wf}(t)]}{1.842qB\mu} \quad (2-2)$$

无量纲井底关井压力 p_{wD} :

$$p_{wD} = \frac{Kh [p(\Delta t) - p_{wf}]}{1.842qB\mu} \quad (2-3)$$

无量纲流动时间 t_D :

$$t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} Kt}{\phi\mu C_t r_w^2} \quad (2-4)$$

无量纲关井时间 Δt_D :

$$\Delta t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} K\Delta t}{\phi\mu C_t r_w^2} \quad (2-5)$$

以供油面积定义的无量纲时间 t_{DA} :

$$t_{DA} = \frac{3.6 \times 10^{-3} Kt}{\phi\mu C_t A} = t_D \left(\frac{r_w^2}{A} \right) \quad (2-6)$$

无量纲半径 r_D :

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (2-7)$$

无量纲供油半径 r_{eD} :

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w} \quad (2-8)$$

无量纲井筒储存系数 C_D :

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} \quad (2-9)$$

除了以上常用的无量纲变量以外, 还有一些无量纲变量在用到时再介绍。

第三节 渗流方式

渗流方式指流体在地层中流动的几何形态, 通常有以下四种情况 (图 2-1):

一、径向流

一口完全钻穿油层并且油层全部射开的井, 在油井生产时, 流体从四周汇聚到井底, 这样的一种流动方式称之为平面径向流, 简称为径向流, 这是开采油气时油气在地层中流动的一种主要形式 (见图 2-1a)。此外, 还有垂直径向流, 发生在水平井不稳定压力的早期;