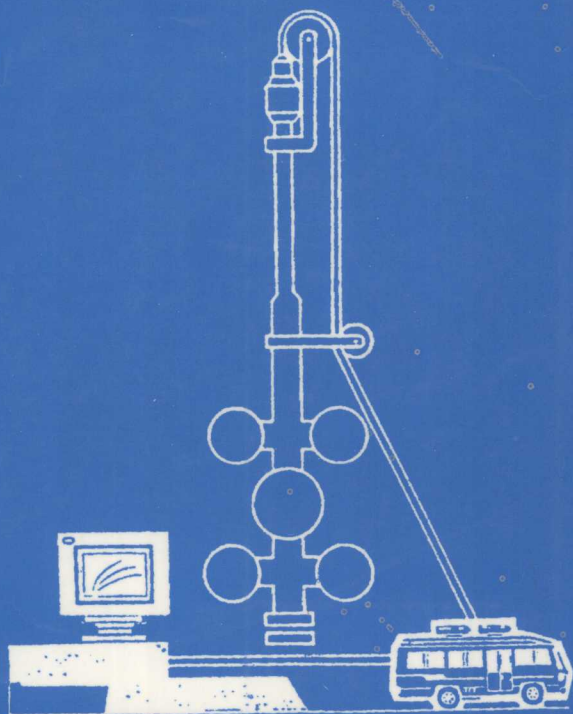


王承毅 等编著

油气水井测试分析方法

上册

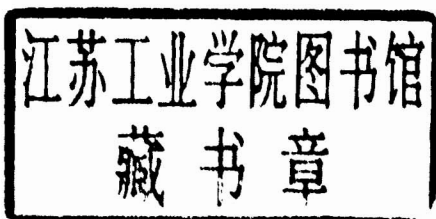


地质出版社

油气水井测试分析方法

上册

王承毅 尹庆文 程远忠 朱亚东
王华崇 罗彦生 赵万优 白武厚 编著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书介绍了不稳定试井理论与实践的最新进展;详细地叙述了INTERPRET II 现代试井分析软件系统在油田勘探与开发工作中的应用,反映了当今国际试井的发展水平。

本书综合了各种试井分析方法,实现了从常规的霍纳分析到最新的压力导数技术的应用以及更高级的样板曲线直观拟合分析的一体化。INTERPRET II 软件系统的界面采用多窗口交互式分析方法,具有直观、灵活和准确的特点,可以分析各种类型的油气水井;其中包括对水平井的试井分析方法。

本书可供从事地层测试、试井、油藏工程和测井方面的地质和工程技术人员以及石油院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气水井测试分析方法.上册/王承毅等编著.-北京:地质出版社,2000.10
ISBN 7-116-03199-5

I. 油… II. 王… III. 油气测井-测试技术-研究 IV. TE15

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第43930号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:戴鸿麟 杨友爱

责任校对:田建茹

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:320 000

2000年10月北京第一版·2000年10月北京第一次印刷

印数:1—1000册 定价:50.00元

ISBN 7-116-03199-5

T·73

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

開發計算機的軟件應用技術
提高油田勘探開發經濟效益

張丁華



一九九九年十月

中华全总原书记处第一书记大港油田党委书记

张丁华为王承毅等同志出版印刷本书题词

发展测试新技术

提高解释新水平

吴永平

中国石油集团大港油田公司副总经理

吴永平于1999年9月为王承毅等同志出版印刷本书题词

坚持思想领先的原则，
才能在科学研究中出
成果、出效益、出理论、出
人才

梁惠琴



一九九九年九月

中国天津大港油田地质勘探开发研究院

原党委书记梁惠琴为王承毅等同志出版印刷本书题词

乘势而上，开拓创新，提
高油田勘探开发经济
效益

刘志谦

中国天津大港油田地质勘探开发研究院党委书记

刘志谦于1999年9月为王承毅等同志出版印刷本书题词

研究現代試井解
釋方法為油田增儲
上產作貢獻

于庄敬



一九九三十二月

中国天津大港油田

原总地质师于庄敬同志于1993年12月为本专业工作题词

序

进入 20 世纪 90 年代,高精度电子压力计测试系统与试井解释软件相结合,产生了现代测试和解释技术。不断研究和发展这种技术,是我国油田勘探与开发工作的需要。应特别指出的是,应用此技术可以指导油田布井、了解生产动态及进行油藏描述,达到搞清地下情况和少投入多产出的目的。因此,该技术已成为我国油田勘探与开发工作必不可少的手段之一。

大港油田地质勘探开发研究院在 20 世纪 80 年代引进了国际最为先进的 INTERPRET I 试井解释软件系统。在此基础上,我们结合我国油田的特点,经过广大科研人员的技术协作与攻关,成功地研制出 DHC 现代试井解释软件,并已在全国油田勘探与开发系统测试单位进行了广泛的推广应用,取得了显著的经济效益和社会效益。

1993 年,我国油田各测试单位在中国石油天然气集团公司开发局的指导下,又成功地引进了 INTERPRET II 试井分析软件系统。这套系统现已成为当今世界石油工业中最强有力的不稳定试井分析系统。它包括了解释工程师需要的不稳定试井设计和分析的所有配置。

为了充分发挥该软件系统在我国油田勘探与开发工作中的应有作用,王承毅等同志经过几年的辛勤工作,编著了本书。

本书还简要地介绍了该软件系统在大港油田的应用成果,以及与油气水井测试分析方法密切相关的生产测井分析技术的理论与实践。

本书从理论到实际操作应用,内容非常丰富,从总体上反映了当前国内在这一领域的水平。如此系统、详细和专门地论述这一问题,在我国尚属首次。本书的出版无疑将对我国现代试井解释方法的研究与应用起到积极的推动作用。

天津大港油田地质勘探开发研究院院长

杨池银

1999 年 9 月

前言

试井的目的意义 通过试井,我们可以获得若干重要的地质参数,从而加深对地下油气藏的认识,为石油勘探与开发的决策提供信息。试井工作分为取得数据和资料解释两大环节,两者互相联系、互相制约。然而,取得准确的解释结果是试井的最终目的。

20 世纪 80 年代以来,特别是近十年,随着高精度压力传感器的问世、现代试井解释理论图版的诞生,以及电子计算机的广泛使用,使测试技术和资料的解释方法都进入了一个新的阶段。现代方法要求原始数据精度高,要求有较完整的压力和时间数据。

于是,高精度电子压力计就这样应运而生了,与之相适应的计算机试井分析软件也已呈现在人们的面前。它们的出现与结合,使试井技术的发展达到了一个新的水平,大大地提高了试井在油田勘探与开发工作中的地位。特别是在新探区的重点探井或开发区的评价井上进行测试和解释,更加显示出它的生命力和经济价值。

试井的主要作用 使用地层测试系统测试(电子压力计的精度高),现代试井解释软件解释,再结合其他地质资料,就可以取得以下几个方面的参数和信息:

1. 确定供油半径,估算油气藏的储量和面积。
2. 确定油气藏边界的性质、距离和形状(注水井可确定水线的推进前沿位置)。边界性质的确定包括:断层、岩性尖灭等不渗透边界、定压边界和流体(油水、油气、气水及水油)边界。计算的边界参数包括:边界距离、两条边界的夹角、岩性尖灭上下界面的夹角。通过计算形状因子或边界的组合关系,即可确定油气藏的形状。
3. 确定天然能量的大小和驱动类型。包括计算砂体孔隙体积、流体储量和面积、水油储量比、单位压降产量。

以上三个作用,可以避免钻低效评价井和落空井,为制定合理的开发方案以及开采方式提供决策依据。

4. 确定油气藏的渗流特征及参数。确定渗流特征包括油气藏是均质的,还是非均质的。非均质油气藏包括:双孔隙、多孔隙、双渗、多渗、多层及岩性组合油藏等类型。计算的渗流参数包括:渗透率(k)、导压系数(α)、地层系数(kh)、流动系数(kh/μ)、流度(k/μ)、弹性储容比($\phi h C_D$)、串流系数

(λ)。注水井还可以计算油区的渗流参数，为计算油气产能提供基础资料。

5. 确定地层压力、温度及其梯度。包括提供原始和目前平均地层压力、流动压力，流、静压梯度，流动和地层温度，流动和静止温度梯度。油气井可以提供压力与温度的产液剖面，注水井可以利用温度确定吸水剖面。

6. 评价井的完善程度。计算的参数包括表皮系数 (S)、垂直裂缝半长 (X_f) 及导流系数，以了解油气藏的真实产能，评价措施效果，或为选择增产措施提供依据。

《油气水测试分析方法》概况 本书分为上、下两册，有 80 多万字，图表 500 多张，由六大部分组成。第一部分：现代试井分析教程；第二部分：计算机试井分析操作的菜单与选项；第三部分：现代试井分析教程的附录；第四部分：INTERPRET II 软件在大港板桥油田油气藏评价中的应用；第五部分：生产测井分析技术在大港油田油气藏评价中应用；第六部分：参考文献。

第一部分，现代试井分析教程由两章组成：第一章，概况，有九节内容。首先概括地介绍了 INTERPRET II 试井分析软件系统是由一系列窗口菜单组成的。

本系统的菜单栏有：① DATA—试井分析数据输入并选择流动期；② VALIDATE—数据确认，包括两项内容，即 VALIDATE GAUGES—对多量程做数据分析、VALIDATE FLOWRATE—编辑产量和估算未测量的产量；③ ANALYZE—进行试井分析，包括两项内容，即：DIAGNOSE—诊断解释模型、MATCHING—检验解释模型；④ DESIGN—试井设计；⑤ JUMP—直接找到所有要访问的菜单；⑥ TOOLS—产生数据和图象，包括两项内容，即 PLOTS—产生曲线图格式、HARDCOPY—产生报告和曲线图并输出到打印机或绘图仪；⑦ HELP—在进行试井分析时，可向你提供指导。

然后，分别对每一个菜单功能进行了概括介绍。在你取得了许可证的情况下，该软件系统也可以对多层测试 (MLT) 数据进行分析。

第二章，现代试井分析教程，有十七节内容。每一节含有从数据输入开始的每一步的具体说明，从开始到结束，每节内容的复杂性逐渐增加，第一节最简单，后面几节的内容比较复杂。这些内容说明了怎样从菜单到整个分析任务完成所进行的操作，在这些内容中，将对你使用的选项作更具体的描述。

首先推荐了试井分析的“一般”方法。从准备数据开始，分析步骤依次为启动解释系统；检查系统单位制；输入压力史数据；为压降流动阶段输入平均产量；输入井、油藏和 PVT 数据。

当你分析实际测试资料时，如果没有适当的井及油藏资料，可以使用缺省值。一旦这样做了，你就只需要基本数据了。前面进行的所有分析将会被自动修改。

完成数据准备之后，即可进行试井分析了。这一过程也称之为解释模型的识别。在 Interpret II 试井分析系统中，你可以用双对数和霍纳诊断曲线识别测试中的各种流动状态。根据这些流动状态，Interpret II 试井分析系统自动选择适当的解释模型。然后，根据双对数分析辨认各种油藏特性、得到初步估算的分析参数。

分析步骤如下：第一步开始分析，选择 ANALYZE 菜单选项；第二步作井筒储集分析，选择 Early 菜单中的 Wellbore Storage 菜单选项，得出井筒储集系数和任意油藏特征的时间拟合；第三步作均质径向流动段的分析，选择 Middle 菜单中的 Radial Flow 菜单选项，得出均质油藏的外推压力 p^* 、 kh 和 S 值。

接着，利用双对数样板曲线检验分析，有六步操作：第一步，产生多流量样板曲线；第二步，利用数据移动调整图形；第三步，手工调整样板曲线；第四步，利用回归改善样板曲线拟合；第五步，在窗口中增大图形尺寸；第六步，无因次双对数拟合和模型检验。

然后，利用霍纳叠加曲线检验分析，包括产生霍纳拟合曲线图、调整诊断期间获得的平均初始压力估算值、手工调整模型参数以改善拟合。利用模拟整个测试分析作检验，即利用模拟整个测试压力史来检验分析质量。

最后，产生解释报告，有两步操作：第一步产生报告及浏览它的内容，应用 Report 菜单中的 Create 和 Browse 选项；第二步停止软件使用，即退出 Interpret II 试井分析系统。

进行霍纳分析，首先准备数据，启动 Interpret II 试井分析系统并检查单位制；然后，使用霍纳叠加分析诊断解释模型。你将学习到：在霍纳叠加图上识别油藏特征；根据常规霍纳分析取得分析参数的初步估计。步骤如下：第一步霍纳分析，第二步双对数诊断，第三步模型检验。在你达到一个良好的测试模拟后，就可暂停软件的应用。

从第 2.3 节开始，介绍了包括水平井、井或油藏中存在多相流动的试井分析方法在内的典型范例，还介绍了多层测试数据的分析方法。

第二部分，逐个介绍了计算机试井分析操作的菜单与选项，共有九章内容（第 3~11 章）。第三章是对 Interpret II 试井分析系统常用的菜单和选项命令的总论，以后每一章重点介绍一个主菜单中各个命令的操作与功能。

当你一个接一个地变换菜单操作时，会发现有些菜单或选项是重复的。例如所有菜单框都有一个文件菜单 (File)、一个跳跃菜单 (Jump)、一个工具菜单 (Tools)、一个帮助菜单 (Help)、一个浏览菜单 (View)。与那些菜单一致的选项和从菜单到菜单框略有不同，但菜单选项本身总是具有相同的通用功能。

第三部分，现代试井分析教程的附录。这一部分由三个附录组成，即附录 A、附录 B 和附录 C。

附录 A——试井解释模型，本附录给出了试井解释模型的定义，其模型用无因次形式，并由井筒附近效应、油藏特征和边界效应表示其特性。

在诊断和样板曲线分析过程中，你可以改变解释模型的一个或多个部分。混合各种边界条件给出 1600 多个模型供你在试井分析中选用。你应仔细地选择适用的模型组成，结合参阅定义的模型曲线，将有助于选用适用于你数据的解释模型。

所有计算方程适用于单相油井，所有模型是基于 p_D 与某些无因次时间 t_D 、 t_{De} 或 t_D/c_D 形式的关系。同一公式用于气井时，用气体校正的拟压力 $[m_n(p)]$ 表示。

附录 B——编辑试井分析记录，本附录详细讨论了 Edit→Record option 的功能 (PLOTS 菜单条) 以及怎样使用它们，同一功能也可以从工具菜单 (Tools Menu) 的编辑 (Edit) 选项→专家方式 (Expert) 中取得。

B1: 试井分析的内部储存系统记录，Interpret II 试井分析系统在记录中储存着输入的数据和计算的结果。基于两点来确定一个记录：代码 (整数)；名字 (字符串)。在每个记录中，Interpret II 试井分析系统指定标题、注释线、标示和 X 及 Y 值的列表所占的空间。

记录采用预先规定的方法，像压力史记录，已经预定了名字和代码。试井分析产生数据输入和分析处理的记录，在记录中自动储存该信息。书中列出了试井分析预定的代码和名字以及对它们的简要描述。

B2: 编辑记录，使用 Records 或 Expert→Edit option 产生、输入和修改 Interpret II 试井分析系统预先确定的记录和其他产生和定制的记录。记录选项提供了若干组编辑的可能情况，包括：产生一组样板曲线、多层油藏无越流模型、用于稳定压力测试的产量下降曲线、用于多井分析的干扰校正。

当你编辑记录时，应谨慎使用正确的代码和名字，特别是当你用标示的代码 (如 FPnn.PDT) 产生一个记录时更是这样。如果你从第二个流动期编辑一个记录，例如用它的名字则使用 FP02。

如果要产生列表中没有规定的函数关系，你就必须给出它们的代码，这样记录就会由 Interpret II 试井分析系统自动储存。表 B-2 按字母顺序列出了 Interpret II 试井分析系统中所有 Records 或 Expert→Edit 命令的代码。

B3: 记录编辑命令，使用命令编辑记录，有以下几种类型分类：①内部储存和检索记录；②从 ASCII 码文件输入或输出的数据；③单个记录操作，加点或删除点，分选，修改 X 或 Y 值，求导；④有两个记录的操作；⑤样板曲线命令，包括单层油藏中的定产量压降、恢复、多流量的样板曲线，有效时间、霍纳时间和叠加时间的转换和完整的多产量试井模拟的样板曲线。

B4: 试井解释模型，书中给出了早期、无限作用和晚期特征和参数的试井

解释模型名称表。

附录C——气井产能分析步骤,本附录是根据续流的压力平方,等时和改进的等时测试,在简化的气体回压方程的基础上,给出了计算天然气产能的方法。

气井产能分析步骤含有假设基本的压力和产量数据已经输入了 Interpret II 试井分析系统,还假设完整的分析了测试中出现的压力不稳定特征。在你开始天然气产能计算以前,需要知道 $(p_{av})_i$ 值。

开始气井产能分析,启动 Interpret II 试井分析系统并调用前面用 File→Open option 储存的对话,然后选择适当的对话名,接着进行 23 步计算机操作,以完成气井的产能分析。

第四部分,介绍了 INTERPRET II 软件在大港板桥油田油气藏评价中的应用。首先介绍了板桥油田地质概况,从构造、储集层、油气藏类型、油气性质、凝析油气藏的相态特征、地层水性质等方面加以论述。然后总结归纳了该油田应用高精度电子压力计探边测试,INTERPRET II 试井解释软件分析所取得的成果。所取得的这些渗流参数是实验室和现场其他手段无法获得的。我们把 INTERPRET II 软件计算得出的流体储量等参数与实际开采情况加以对比,其结果基本一致。这些分析结果为板桥油田油气藏评价提供了基础资料;也为 INTERPRET II 软件的应用提供了良好的范例。

第五部分,介绍了部分生产测井分析技术在大港油田油气藏评价中应用。首先介绍重复式电缆地层测试器(RFT)的工作原理、测试资料的解释基础以及在大港油田油气藏评价中应用。然后分别介绍了用测井方法研究大港油田剩余油的分布及含油饱和度的计算;用测井技术评价大港油田的火成岩地层;气层测井识别技术应用;评价大港油田的水淹层(放射性中子测井找水、井温测井找水);注入和产出剖面测井分析技术应用;C/O 测井分析技术应用。

第六部分为参考文献,收录了作者近十几年来翻译的国外油藏工程专业论文 15 篇。这些论文从不同角度,论述了油气水井测试分析方法的理论与实践,是我们从事试井分析工作应该熟练掌握的经典之作。

《油气水测试分析方法》的适用范围 本书系统地介绍了国内外油田地层测试和解释理论与实践的最新进展,它既是 INTERPRET II 试井解释软件的用户指南详解;又可单独作为石油院校师生培训学习的教学参考书。特别是书中的典型实例,由简单到复杂,由浅入深,既适合于从事油藏测试和解释的初学者,也对专家学者撰写专业科技论文具有极好的参考价值。

《油气水测试分析方法》达到的水平 本书是在参考了大量国内外油田试井专业文献资料的基础上编著的。其中包括 INTERPRET II 软件在大港板桥油田油气藏评价中的应用,以及与试井分析密切相关的生产测井分析技术在大港油田油气藏评价中应用。在此基础上,完成了本书的著述工作。

资料基本成形之后，我们邀请了多位有经验的同志参加有关工作。最后，我们还邀请了国内著名油藏工程专家朱亚东同志对本书进行了审定工作，在此表示感谢！

天津市大港油田测井公司经理

大港油田采油作业区经理助理

尹庆文
1999年9月

程远忠
1999年9月

目 录

上 册

第一部分 现代试井分析教程

第一章 概况	(1)
1.0 引言	(1)
1.1 数据菜单：输入数据	(1)
1.1.1 数据输入类型	(2)
1.1.2 输入数据	(2)
1.2 确认菜单：检查多支压力计数据和流量数据	(4)
1.3 分析菜单：进行分析	(4)
1.3.1 解释方法	(4)
1.3.2 双对数分析菜单：模型诊断	(5)
1.3.3 用双对数分析确定的特征	(6)
1.3.4 反褶积法	(7)
1.4 霍纳分析菜单：诊断解释模型	(9)
1.4.1 用霍纳分析识别的特性	(9)
1.5 拟合分析菜单：模型检验	(10)
1.5.1 双对数拟合图：多流量样板曲线拟合	(10)
1.5.2 霍纳样板曲线拟合图	(12)
1.5.3 试井模拟图	(13)
1.6 多层测试 (MLT) 分析	(14)
1.7 试井设计菜单：测试设计	(15)
1.7.1 测试设计的好处	(15)
1.7.2 敏感性分析	(16)
1.8 绘图菜单：制定和编辑图形及数据记录	(16)
1.9 图形硬拷贝菜单：产生硬拷贝图和报告	(17)
第二章 现代试井分析教程	(18)
2.0 引言	(18)
2.1 对试井分析推荐的步骤	(18)
2.1.1 准备数据	(18)

2.1.2	进行诊断	(22)
2.1.3	利用双对数样板曲线检验分析	(23)
2.1.4	利用霍纳叠加曲线检验分析	(26)
2.1.5	通过模拟整个测试分析进行检验	(28)
2.1.6	产生报告	(29)
2.2	霍纳分析	(29)
2.2.1	准备数据	(29)
2.2.2	霍纳分析	(30)
2.3	缺失早期数据的分析	(32)
2.3.1	准备数据	(33)
2.3.2	数据分析	(35)
2.3.3	检验分析	(36)
2.3.4	硬拷贝报告	(38)
2.4	缺失径向流动段数据的分析	(39)
2.4.1	调用分析数据	(39)
2.4.2	进行分析	(39)
2.4.3	检验分析	(41)
2.5	压裂井的分析	(43)
2.5.1	调用分析数据	(43)
2.5.2	具有井筒储集和表皮效应的模式分析	(44)
2.5.3	具有裂缝的模式分析	(47)
2.5.4	具有有限导流裂缝的模式分析	(47)
2.5.5	对第五节的讨论	(48)
2.6	双孔隙特征的分析	(49)
2.6.1	调用分析数据	(49)
2.6.2	双孔隙分析	(51)
2.6.3	检验分析	(55)
2.6.4	对第六节的讨论	(55)
2.7	干扰试井分析	(56)
2.7.1	准备数据	(56)
2.7.2	进行分析	(58)
2.7.3	检验分析	(60)
2.8	具有单一封闭断层井的分析	(61)
2.8.1	调用分析数据	(61)
2.8.2	进行分析	(62)

2.8.3	检验分析	(64)
2.9	封闭矩形油藏井的分析	(65)
2.9.1	调用分析数据	(65)
2.9.2	半无限大模型分析	(67)
2.9.3	检验分析	(69)
2.9.4	封闭矩形油藏模型的分析	(70)
2.9.5	封闭油藏、无限或有限导流裂缝模型的分析	(73)
2.10	变气产量分析	(74)
2.10.1	调用数据	(74)
2.10.2	气井测试分析	(78)
2.11	水平井分析	(83)
2.11.1	调用分析数据	(83)
2.11.2	均质、无限大油藏分析	(84)
2.12	具有不密封断层井的分析	(93)
2.12.1	调用分析数据	(93)
2.12.2	数据预处理	(95)
2.12.3	数据诊断	(98)
2.12.4	检验分析	(100)
2.12.5	二次衰减测试分析	(103)
2.13	多相流动井的测试分析	(107)
2.13.1	调用分析数据	(107)
2.13.2	晚期压力恢复分析	(109)
2.13.3	其他压力恢复分析	(112)
2.14	油藏中多相流动的分析	(114)
2.14.1	调用分析数据	(114)
2.14.2	压力恢复分析	(116)
2.14.3	以气相为主的测试分析	(120)
2.15	有多支压力计测试资料的分析	(121)
2.15.1	开始软件应用和调用数据	(121)
2.15.2	调用增加的压力计数据	(122)
2.15.3	有多支压力计的操作	(123)
2.15.4	筛选数据点和测试分析	(129)
2.16	试井设计	(134)
2.17	用反褶积法进行多层测试分析	(140)
2.17.1	准备数据	(140)