

## 序

复杂结构井是目前提高单井产量的主要井型，广泛应用于各类复杂油气藏及致密油气藏、页岩油气藏和煤层气等非常规油气藏的开发。近年来，随着油气开采过程中钻井技术的发展，复杂结构井渗流及试井理论发展很快，出现了各种复杂井型的试井分析新模型和新方法，并已广泛应用于这些油气藏，为复杂结构井井眼轨迹优化、储层物性测试、开发动态描述及开发方案优化等提供重要技术支持。

程时清教授多年来从事试井教学及科研工作，《复杂结构井试井分析理论与方法》一书是他在这一领域的新贡献。该书系统阐述了复杂结构井试井的分析理论、解释方法及实际应用；较全面地介绍了试井分析的地质论、模型论及方法论；重点论述了各种水平井试井分析模型、求解方法、典型曲线特征及流动阶段诊断；既阐述了各种复杂试井理论模型及分析方法，也介绍了一些油气井试井应用实例，体现了最近 20 年来复杂结构井试井技术的进展。

该书内容主要是程时清教授及其团队多年科研成果的凝练，并吸收了国内外相关领域科技成果的精髓与矿场实践经验，是一部在复杂结构井试井理论、分析方法及实际应用方面内容丰富且系统性强的专著。该书内容创新性强，如在关于水平井筒段不规则产油气的理论与方法方面，程时清教授针对复杂油气(藏)地质特征及完井条件，提出了水平井不规则产油(气)的概念，建立了常规水平井、多级压裂水平井、多分支水平井的不规则产油(气)试井分析新模型和新方法，为复杂结构井水平井筒段产油(气)位置的初步诊断及参数解释提供新的监测手段。

相信该书对从事油气试井、渗流力学、油气藏工程、油气田开发的科研及教学和工程技术人员及研究生和本科生具有重要的参考价值和指导意义。



中国科学院院士

2017年2月



# 前 言

自 1928 年世界上第一口真正意义上应用于石油工业的水平井问世以来，水平井技术发展迅猛，随着随钻测井、随钻测量和地质导向技术的发展，出现了鱼骨井、阶梯井、多分支井、双水平井、多底井、螺旋井等复杂井型。笔者在试井领域辛勤耕耘 30 余年，亲身感受到从最初的普通直井到压裂直井，从水平井发展到多分支井、多段压裂水平井的发展变化，试井理论和分析方法不断适应这些新井型，试井技术应用更加广泛。尤其是最近 10 年，在承担高德利院士主持的国家油(气)重大专项“复杂油(气)田地质与提高采收率技术”项目的研究过程中，在非均质油藏复杂结构井试井理论及应用方面取得了一些重要进展，萌生了撰写这方面专著的想法。

本书系统阐述了复杂结构井试井的分析理论、解释方法及实际应用。全书共 7 章，第 1 章介绍试井的目的及作用、复杂结构井试井发展历史；第 2 章阐述试井理论和方法的核心：试井地质论、试井模型论、试井方法论；第 3 章论述均质油藏水平井试井模型及求解方法、水平井试井储层损害的评价方法、水平井筒不规则产油试井模型及分析方法；第 4 章介绍多重介质、多层介质、各向异性介质及复合模型的水平井试井理论和实际应用；第 5 章论述多段压裂水平井试井模型、多段压裂水平井不规则产油试井模型及分析方法；第 6 章论述多分支井等复杂井型的试井分析理论；第 7 章介绍煤层气井和页岩气井试井分析方法。

本书充分考虑复杂结构井适应的油藏类型，重点论述水平井试井分析的各类模型、求解方法、典型曲线特征及流动阶段划分。在选材方面，每种试井模型均来源于国内外试井界知名专家在重要刊物上发表的论文及论著。本书很多内容是笔者及研究团队最近 10 年的研究成果，包括公开发表的论文、获得的发明专利及重要科研项目的成果报告。全书力求理论联系实际，体现试井分析领域的前瞻性，突出最近 20 年来复杂结构井试井技术的成就。

本书得到了中国石油大学(北京)学术出版基金的资助，同时也与中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司和中国海洋石油总公司 30 年来的科研资助密不可分。在本书撰写过程中，笔者的诸多博士、硕士研究生付出了辛勤劳动：黄瑶参加了全书的策划及第 3 章、第 6 章的编写，何佑伟参加了第 3 章、第 5 章的编写，符浩参加了第 4 章、第 5 章的编写，张耀峰参加了第 7 章的编写，罗乐参加了第 2 章第 4 节的编写，张满、罗国参加了全书图幅的绘制，方冉、李鼎一等也参加了部分内容的编写。已毕业研究生张利军、刘斌、李双等重新整理了公

公开发表的论文，并编入本书。在此一并表示衷心感谢。

希望本书有助于广大试井工作者深入了解复杂结构井的试井分析原理及实际资料解释方法，促使试井理论及应用技术适应复杂油气藏勘探开发的挑战。但由于作者水平及学识有限，书中难免存在不足和错误，敬请广大读者批评指正。

程时清

2017年8月于北京昌平

# 目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 试井概述	1
1.1.1 试井的概念	1
1.1.2 试井的作用	3
1.1.3 试井分析方法及其特点	5
1.1.4 试井分析的系统分析原理	6
1.1.5 试井分析的内容及主要步骤	7
1.2 复杂结构井及其试井的特殊性	8
1.2.1 复杂结构井的类型	8
1.2.2 复杂结构井的试井特点	10
1.3 复杂结构井试井研究进展	11
1.3.1 试井分析主要发展历程	11
1.3.2 复杂结构井试井分析发展历程	12
1.4 小结	17
第 2 章 试井分析中的地质论、模型论及方法论	18
2.1 试井分析地质论、模型论和方法论的内涵	18
2.2 试井分析基础	19
2.2.1 井筒储集效应和表皮效应	19
2.2.2 试井分析中的无量纲量	27
2.2.3 均质地层表皮效应模型及拉氏空间解	30
2.2.4 常规分析方法	37
2.2.5 现代试井分析方法	41
2.3 试井建模中的地质论	46
2.3.1 试井地质模型	46
2.3.2 储层边界及流体边界	54
2.3.3 非均质储层的试井模型	60
2.4 试井分析中的模型论	62
2.4.1 试井数学模型	63
2.4.2 数学模型的求解方法	65

2.4.3	拉氏反演数值计算方法	73
2.4.4	试井模型的 Laplace 空间解及典型曲线	77
2.4.5	不同试井模型典型曲线的共性特征	92
2.5	试井分析方法论	97
2.5.1	重整压力及重整压力导数方法	97
2.5.2	图形分析法	104
2.5.3	早期试井分析方法	114
2.5.4	应用实例	115
2.5.5	反褶积方法	116
2.6	试井油藏动态描述	121
2.6.1	试井油藏动态描述的主要内容和方法	122
2.6.2	试井油藏动态描述实例	124
2.7	小结	139
<b>第 3 章</b>	<b>均质油藏水平井试井分析</b>	<b>140</b>
3.1	水平井试井模型及井底压力解	140
3.1.1	水平井的函数线源解	140
3.1.2	水平井经典试井模型及压力解	145
3.1.3	水平井压力直线段分析方法	158
3.2	水平井典型曲线特征及拟合方法	165
3.2.1	典型曲线图版	165
3.2.2	敏感性参数分析	166
3.2.3	水平井筒位置对压力曲线的影响	167
3.2.4	典型曲线拟合分析方法	169
3.3	水平井表皮效应及等效水平长度评价模型	172
3.3.1	水平井表皮效应	172
3.3.2	水平井等效长度模型	176
3.3.3	模型的讨论	179
3.3.4	实例应用	181
3.4	水平段不规则产油试井模型及拟合方法	183
3.4.1	水平井不规则产油试井模型	183
3.4.2	敏感性参数分析	185
3.4.3	不规则产油试井典型曲线拟合方法	190
3.5	小结	193
<b>第 4 章</b>	<b>非均质油藏水平井试井分析</b>	<b>195</b>
4.1	双重介质储层水平井试井分析	195
4.1.1	试井模型及压力解	195

---

4.1.2 典型曲线特征	198
4.2 三重介质储层水平井试井分析	201
4.2.1 试井模型及压力解	201
4.2.2 典型曲线特征	205
4.3 多层储层水平井试井分析	209
4.3.1 试井模型及压力解	209
4.3.2 典型曲线特征	213
4.4 水平井复合模型试井分析	215
4.4.1 试井模型及压力解	215
4.4.2 典型曲线特征	219
4.4.3 敏感性参数分析	220
4.5 各向异性储层水平井试井分析	221
4.5.1 试井模型及压力解	221
4.5.2 敏感性参数分析	228
4.6 非均质油藏水平井试井动态地质描述实例	232
4.6.1 实例 1 Arab D 油藏	232
4.6.2 实例 2 断块油藏	233
4.6.3 实例 3 水平井复合模型	234
4.7 小结	235
<b>第 5 章 压裂水平井试井分析</b>	<b>237</b>
5.1 多段压裂水平井流动形态	237
5.2 多段压裂水平井试井分析	239
5.2.1 多段压裂水平井试井模型及压力解	240
5.2.2 典型曲线特征	242
5.2.3 敏感性参数分析	243
5.3 多段压裂水平井不规则产油试井分析	245
5.3.1 多段压裂水平井分段产油现象	245
5.3.2 压裂水平井不规则产油试井模型	250
5.3.3 不规则产油试井模型典型曲线	253
5.3.4 敏感性参数分析	255
5.3.5 实例应用	259
5.4 小结	264
<b>第 6 章 多分支井试井分析</b>	<b>266</b>
6.1 多分支井试井分析	266
6.1.1 基本线源解	266
6.1.2 试井模型及典型曲线	268

---

6.2	鱼骨形多分支水平井不规则产油试井分析	275
6.2.1	鱼骨形多分支井不规则产油试井模型	275
6.2.2	敏感性参数分析	278
6.3	小结	282
<b>第 7 章</b>	<b>非常规气水平井试井分析</b>	<b>283</b>
7.1	煤层气水平井试井	283
7.1.1	煤层气直井试井分析	285
7.1.2	煤层气水平井试井	296
7.2	页岩气藏多段压裂水平井试井	303
7.2.1	页岩气压裂井裂缝特征	304
7.2.2	三线性流数学模型	304
7.2.3	典型曲线图版及敏感性参数分析	312
7.3	小结	318
<b>参考文献</b>		<b>320</b>

# 第1章 概 论

本章首先介绍试井的目的、试井的作用及试井分析步骤，然后介绍复杂结构井的特点，总结直井及复杂结构井试井理论及分析方法的发展历史。

## 1.1 试井概述

### 1.1.1 试井的概念

试井(well testing)，顾名思义，就是对井(油井、气井或水井)进行测试。它是指在不同工作制度下获取井底压力和温度等信号的过程。测试的内容包括测量井的产量、压力、温度变化及取样(包括油样、气样和水样)等。从压力录取和分析方法两个方面看，试井是一种以渗流力学为基础，以各种测试仪表为手段，通过对油井、气井或水井生产动态的测试来研究和确定油、气、水层和测试井的生产能力、物性参数、生产动态规律，判断测试井附近的边界情况，以及油、气、水层之间连通关系的方法。

试井是油藏工程的一个重要分支。试井能定量或定性获取储层和井的有关参数(如流动系数、有效渗透率、表皮系数和井筒储集系数、测试范围地层压力等)。虽然试井是间接测量法，不如取流体样品或取岩心能直接确定有关参数，但试井可以描述油(气)藏的动态特性。

在试井过程中，一般地面流量装置计量测试井的产量，井下压力计录取井底压力。开井之前，原始地层压力在储层中为常数，且各处相等。在流动阶段，压力降由式(1.1)定义：

$$\Delta p = p_i - p_{wf}(t) \quad (1.1)$$

式中， $\Delta p$  为压力降，MPa； $p_i$  为原始地层压力，MPa； $p_{wf}$  为流动压力，MPa。关井时，压力恢复变化可根据关井前的流动压力估算：

$$\Delta p = p_{ws}(\Delta t) - p_{ws}(\Delta t = 0) \quad (1.2)$$

式中， $p_{ws}$  为关井恢复压力，MPa。通过压力响应与开井或关井后的时间关系(图 1.1)进行地层参数计算。

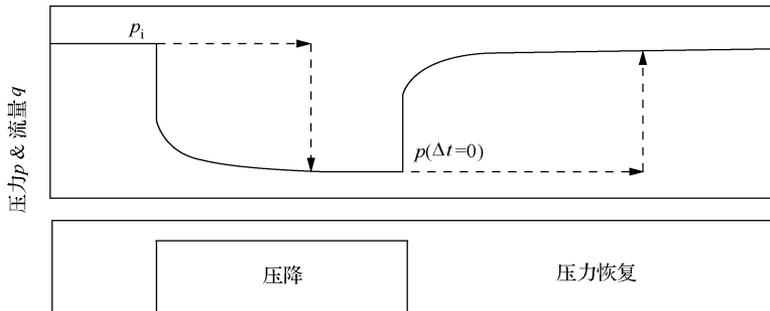


图 1.1 压降及压力恢复试井示意图

油(气)井试井是一项复杂的系统工程,完整的试井程序涉及以下几个方面。

(1) 针对油(气)藏和油(气)井的复杂性,进行严密的测试设计。

(2) 应用高精度的仪器设备进行现场测试,如压力计精度达 0.02%FS(满量程),分辨率为 0.00007MPa,在井下高温高压条件下连续记录、存储数十万个压力数据点。

(3) 测试过程中要求产油(气)井配合测试进程多次开关井,准确计量产油(气)量,并处理好产生的原油和气体。

(4) 采用试井解释模型及软件解释测试数据。

(5) 结合地质、物探、测井、油藏及钻采工艺措施,进行油(气)藏动、静态精细描述。

因此,试井全过程包括 4 个方面,即试井设计、现场施工(资料录取过程)、试井解释、试井油藏描述(也称油藏评价)。

在许多文献、书籍、技术报告、软件操作指南中经常见到“试井分析”和“试井解释”这两个名词。试井分析的英文表述是 transient pressure analysis,而试井解释的英文名称是 well test interpretation。著名试井专家 Spiver 和 Lee 在其 2016 版专著《实用试井解释方法》中指出,试井分析是指试井模型求解方法,而试井解释则是通过检查、分析由产量变化引起的压力响应特征,进而获取有关油(气)藏信息的过程,试井解释得到的信息既有定量的参数,也有定性的认识。也就是说,试井分析其实是试井模型及分析方法的理论研究,而试井解释就是试井理论应用于实际测试资料解释,得到地层参数。在实际应用过程中,试井解释的首要任务是明确油(气)藏物理特性,其次才是给出描述这种特性参数的大小。

笔者认为,试井分析应该是建立各类复杂油藏的试井物理模型和数学模型,研究求解方法,并提供不稳定压力分析方法和油气井产能分析方法。而试井解释就是对录取的实际试井资料,基于试井理论,提出基于压力资料计算测试井及地层参数的方法,提供解释结果。实际试井工作中还包括试井设计。试井油藏描述

是试井分析、试井解释的升级版，结合油藏静态和动态资料，进一步精细描述油藏特征，为油(气)藏勘探开发提供富有成效的建议。

### 1.1.2 试井的作用

一口井钻完后或中途钻进过程中，必须进行测井，测井能够判别哪些层段是油(气)层，哪些是可能油(气)层，哪些是油(气)同层，哪些是含水油层，哪些是含水水层，哪些是水层，哪些是干层等。但这些测井解释所判断的油(气)层是否确实产油(气)？如果确实产油(气)，能产多少？要回答这类问题，只能依靠试井，所以探井试井是发现油(气)的临门一脚。

一个油(气)田投入开发前，需要编制技术可行、经济效益好的开发方案，开发方案要求预测正确的开发指标，这就需要建立油(气)藏模型；建立的油藏模型必须尽可能符合油(气)藏的动态特征。建立油(气)藏模型，需要地质、地球物理、测井、试井和其他一切可能得到的资料。事实上，试井是油(气)田勘探开发过程中认识地层和油(气)井特性、确定油(气)层参数不可缺少的重要手段。在油(气)藏勘探开发过程中取得各种资料，如岩心分析、电测解释和试井等资料，但岩心和测井资料都是在油(气)藏的静态条件下测取的，只能反映井眼或其附近油(气)藏中的“单个点”的地层特性，只有试井资料才是在油(气)藏的动态条件下测得的，反映测试井及其探测范围内的平均动态地层特性。各种不同研究结果所能反映或辨别的地层特性的范围有很大差异，图 1.2 汇总了这些方法的探测距离。

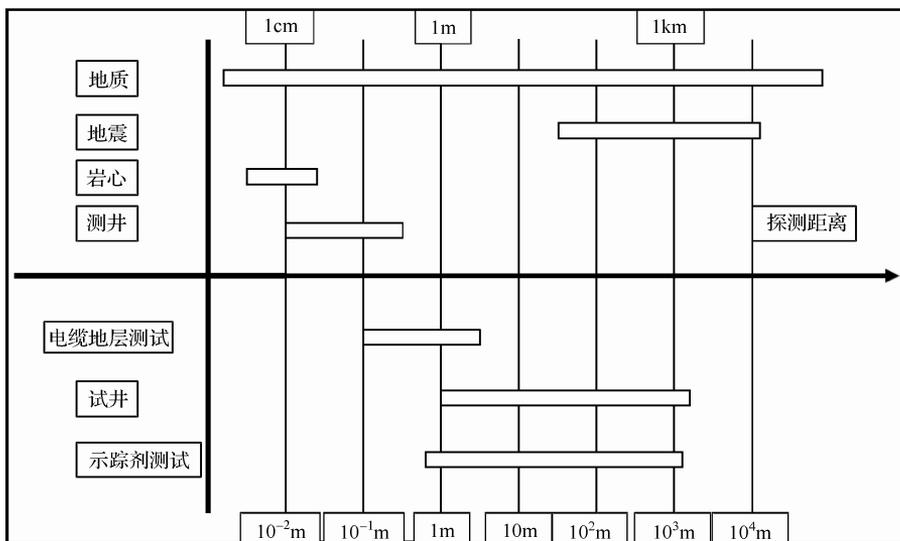


图 1.2 各种不同研究方法所能达到的范围

试井解释所提供的储层参数(如储层有效渗透率)为建立油(气)藏模型提供了非常重要的资料。试井解释所得到的有效渗透率是测试影响范围内有效渗透率的平均值,试井压力响应的油藏尺度比单个小岩心及测井井眼要大很多。

在油(气)田勘探开发中,油藏渗透率有多种表征方式,如岩心测试的气测渗透率、测井解释渗透率、试井解释渗透率。气测渗透率是空气通过常压岩心流动条件下测取的渗透率,是储层的绝对渗透率,反映油(气)藏渗透能力的高低。测井渗透率是建立在四性关系模型基础上,通过测井解释孔隙度推算的渗透率。由于每口井都有测井渗透率,在地质建模中,主要采用测井渗透率,对于有取心的井,采用岩心渗透率。事实上,不可能保证每口井都取心,三维地质建模和油藏数值模拟都不得不采用测井渗透率。与地质和测井资料不同,试井是在动态条件下获得的储层和井的参数,因而只有试井渗透率是根据地下真实油(气)流动条件测得的压力计算得到的。由于测试的储层体积相对较大,所以估计的参数是大尺度储层的平均值。试井渗透率能够较好地表征油(气)藏动态特征,试井渗透率比气测渗透率和测井渗透率更可靠,是计算油(气)井产量的重要参数。

不同类型的油(气)井的试井目的如下。

(1)探井。试井用来证实勘探假设和实现最初的产能预测,确定流体性质和产量、原始地层压力及井和储层的参数。试井方法可能仅限于中途试井及完井测试(drill stem testing, DST)。

(2)评价井。评价井试井是一种生产试井,通过评价井试井可以修正先前的井和储层描述,进一步验证井的产能、储层非均质性、边界和驱动效率等。井底流体取样可用于PVT分析。评价井试井需要较长测试时间。

(3)开发井。对生产井进行周期试井,以细化储层描述并确定井是否需要采取措施,如修井、补孔或重新完井,使井的生命周期延长。确定井间连通性(干扰试井)及平均地层压力的连续监测也是开发试井的目的之一。

根据压力数据解释可以得到储层和井的信息。

### 1. 储层方面

储层方面得到的信息有:①渗透率(水平渗透率和垂向渗透率);②储层非均质性(天然裂缝、多层、储层性质横向变化);③边界(距离和形状);④压力(原始地层压力和平均地层压力)。

### 2. 井描述方面

井描述方面得到的信息有:①生产能力(采油指数和表皮系数);②井的几何参数;③井间连通性。

### 1.1.3 试井分析方法及其特点

试井始于 20 世纪 30 年代,到了 20 世纪 70 年代试井技术日新月异。随着渗流力学理论研究的深入及试井软件技术的不断革新,试井分析在油(气)藏勘探开发所起的作用不断扩大和深化。

试井分析方法分为常规试井方法、现代试井方法、数值试井方法。

早期的试井并没有对不同类型地层加以区分,或者说认为地层都是同样的“均匀介质”。20 世纪 50 年代初期出现的半对数直线法[包括 MDH 法(取自 Miller、Dyes 和 Hutchinson 三人名字的首个字母)和霍纳(Horner)法]应用于当井筒储集影响消失后,反映地层情况的径向流动阶段。此时在压力和时间(取对数)的双对数坐标系中,压力变化出现直线段。且直线的斜率与地层的渗透率之间成反比关系,通过斜率与截距计算渗透率与原始地层压力,这就是最早的常规试井分析方法原理。直到 20 世纪 70 年代,世界上普遍使用半对数直线分析方法解释实际试井资料。

常规试井分析方法原理简单,易于推广应用,但具有很大局限性,主要表现如下 3 个方面。

(1) 主要处理中晚期资料,要求关井时间很长。对低渗透油田来说,完全取得中晚期资料很困难。当得不到直线段时,常规半对数分析方法无能为力。

(2) 有时很难确定直线段的起始点。到底半对数曲线是否出现直线段,直线段从何时开始,当出现两条以上直线段的情形,到底哪一条才是真正的直线段? 这些问题很难处理,往往得出错误的分析结果。

(3) 不能获得井底附近的详细信息。

20 世纪 70 年代以来,随着科学技术的飞速发展,特别是计算机和高精度测试仪器仪表的出现,在常规试井分析方法的基础上,试井分析理论发生了质的变化,相继诞生了许多试井解释典型曲线图版。1970 年, Ramey(1970)提出了试井分析的图版拟合方法,即双对数分析方法,这是试井分析的一次革命性飞跃,也是现代试井分析方法的奠基石。1979 年, Gringarten 等(1979)对 Ramey 方法进行改进,绘制了符合实际且更方便实用的 Gringarten 图版,提出在计算机辅助下的压降图版拟合分析方法。图版分析方法的出现使试井分析结果的精度大大提高。20 世纪 80 年代初, Bourdet 和 Gringarten(1980)发明了压力导数图版。地层中的每一种流动形态都与导数图版上的特征图形相对应,而每一种流动的产生又都由具体地层的地质条件所决定,从而在地质特征与图形特征之间建立起有机的联系。到目前为止,双对数坐标中压力和压力导数复合图版法,结合半对数分析方法,组成了现代试井分析的核心,压力及导数图版拟合分析也是现代试井解释软件所采用的主流分析方法。目前完整的现代试井解释方法已经建立起来,并在日臻改

进和发展, 实际应用非常方便。

概括起来, 现代试井分析方法具有以下几个特点。

(1) 运用系统分析的概念和数值模拟方法, 大大丰富了试井分析方法。

(2) 建立了双对数分析方法用以识别测试层(井)的类型及划分流动阶段, 实现了早期(井筒储集阶段、过渡阶段)资料的解释, 从过去认为无用的数据中得到许多有用的信息。通过图版拟合和数值模拟(即压力史拟合), 分析全程压力资料, 提高了试井分析的深度, 拓展了试井分析的广度。

(3) 进一步完善了常规试井解释方法, 能够判断是否出现半对数直线段, 并给出半对数直线段出现的大致时间, 提高了半对数直线分析的可靠性。

(4) 引用直角坐标图以进一步验证测试层(井)的类型、划分流动阶段。现代试井解释方法使用 3 种曲线图, 即双对数曲线图[识别测试层(井)类型, 确定流动阶段]、半对数曲线图及直角坐标图(验证测试层或测试井的类型、流动阶段和计算特性参数)。

(5) 不仅适用于油、水井, 也适用于气井; 可以解释各种不稳定试井资料, 如中途测试、生产测试、压降测试、压力恢复测试等。

(6) 整个解释过程是一个“边解释边检验”的过程。几乎每个流动阶段的识别、每个参数的计算都要用两种以上不同的分析方法。在用两种以上不同方法解释得到一致的结果之后, 还要经过无量纲霍纳曲线拟合检验和压力史拟合检验。通过这一套边解释边检验的解释程序, 使每一步骤都做到扎实、可靠, 从而保证整个解释结果的可靠性。

#### 1.1.4 试井分析的系统分析原理

系统分析理论认为任何一个研究对象都可以看作是一个系统(System, 用 S 表示)。给系统一个“激动”, 或称作输入(Input, 用 I 表示), 则系统就会出现相应的“响应”, 即输出(Output, 用 O 表示), 如图 1.3 所示。



图 1.3 系统分析示意图

系统分析中有两类问题。一类是已知系统 S 的结构和输入信号 I, 而要求出未知的输出 O。这称为正问题(direct problem), 用式子表示为  $S \times I \rightarrow O$ 。

另一类则是系统 S 为未知, 而要由已知输入信号 I 和输出信号 O 反求该系统 S 的结构。这称为反问题(inverse problem), 用式子表示为  $O/I \rightarrow S$ 。

把油(气)藏和测试井看作是一个系统 S。测试过程中给 S 一个输入信号 I(即从测试井以恒定产量采出一定数量的原油或天然气), 由此引起系统 S 中压力发生变化, 这就是 S 的输出信号 O(图 1.4)。

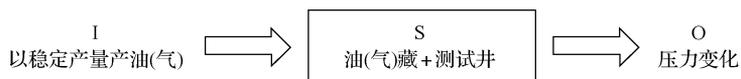


图 1.4 试井的系统分析示意图

试井过程就是计量采出的原油和天然气(或注入水、聚合物等)产量,并测量由此引起的井底压力变化,即测取系统的输入信号和输出信号。

试井分析的任务就是由这些资料,即输入 I(产量变化)和输出 O(压力变化),加上某些初始条件和边界条件,以及由其他测试手段所取得的油(气)藏和测试井的有关资料来识别系统 S[油(气)藏和测试井的特性和参数]。也就是说,是解一个反问题。

反问题可以这样理解,对于一个系统施加某一输入,一定得到某一输出;对于不同的系统,施加同样的输入,一般来说将得到不同的输出。因此,可以用不同系统对一定输入的反应,即输出来识别系统本身。

具体来说,就是先找出不同系统[即油(气)藏和油(气)井]的试井理论模型,也就是各种相应的微分方程或微分方程组及其定解条件对于某种输入(即产量变化)的反应,或输出(即压力变化,也称压力响应),实质上就是解各种正问题;而从方法上说,则是解相应的微分方程或微分方程组,把得到的解,即各种类型油(气)藏和油(气)井的压力随时间的变化,分别绘制成曲线,这就是样板曲线,也称典型曲线图版,或试井解释图版。大多数典型曲线图版都是无量纲压力(有时则是无量纲压力对无量纲时间的导数)与无量纲时间(或无量纲时间与其他无量纲量的组合)的双对数曲线。试井的反问题也称参数反演。

必须指出,确实存在这样不同的系统,当施加同样的输入时,却得到相同的输出。这就意味着试井分析存在多解性。不过,随着输出信息的增加,结合其他方面的研究成果进行综合解释,可以大大减少解的数目,甚至能得到唯一解。

### 1.1.5 试井分析的内容及主要步骤

试井分析主要研究内容及步骤如下。

- (1) 模型准备。实际油藏和油(气)井背景,搜集必需的各种信息。
- (2) 模型假设。简化复杂储层,建立试井物理模型(地质模型、流动条件)。
- (3) 模型构成。数学模型的建立(压力扩散方程、初始条件、内边界条件及外边界条件)。
- (4) 模型求解。采用拉普拉斯(Laplace)变换(简称拉氏变换)、源函数、格林(Green)函数、有限差分及有限元等方法求解试井数学模型。
- (5) 模型分析。绘制压力及导数典型曲线图版,进行参数敏感性分析。
- (6) 模型检验。试井流动阶段的划分、储层类型的诊断、边界分析,与测试中

实际现象进行对比分析, 检验模型的合理性和适用性。

(7) 模型应用。实测压力资料的拟合方法(图版拟合、自动拟合)、油气藏动态描述, 包含模型选择、流动阶段诊断、结果验证, 其中结果验证除采用半对数直线和压力历史拟合方法检验外, 还需要与实际油(气)藏的地质特点和油(气)井生产动态相吻合, 进一步检验解释结果的正确性。

## 1.2 复杂结构井及其试井的特殊性

自 1928 年世界上第一口真正意义上应用于石油工业的水平井问世以来, 水平井技术发展迅猛。随着随钻测井、随钻测量和地质导向技术的发展, 除常规水平井外, 出现了鱼骨井、阶梯井、多分支井、双水平井、多底井、螺旋井等复杂井型, 这里统称为复杂结构井。

复杂结构井的显著优势是具有比直井更长的完井井段, 具有水力压裂造缝所不能达到的定向控制和长度控制的优势, 能够大幅度增大生产井段与地层的接触面积、连通断块构造并实现储层应力卸载, 可以最大限度地疏通油(气)“通道”并改善储层渗透性, 由此彻底改变渗流场, 能够产生大范围的泄油区, 降低生产压差, 大幅度提高单井油(气)产量, 降低钻井数, 节约开发成本, 提高经济效益。

复杂结构井广泛应用于常规油(气)藏、薄层油藏、天然裂缝发育油(气)藏、存在底水或气顶的油(气)藏、低渗透油(气)藏、稠油油藏、致密油(气)藏、页岩油(气)藏、煤层气。在海洋、滩海、湖泊及地表条件复杂的地区, 可以发挥大位移井的独特作用, 达到扩大储量动用程度、降低综合成本及利于环保的目的; 在边水、底水油藏及注水开发油藏中, 复杂结构井能够有效减缓水流突进并改善油藏渗流剖面, 达到控水增油的目的; 双水平井、U 形井的应用可以高效开发稠油、天然气水合物等非常规油(气)资源, 使地下固态能源资源转变为液态或气态采出地面。此外, 采用复杂结构井还可以实现井下流体分离、救援井压井、陆-海管线连接及地下管线穿越等目的。

### 1.2.1 复杂结构井的类型

根据分支井几何形状, 多分支井类型主要有反向双分支井、垂向或平面三水平分支井、鱼骨形、辐射形等类型。

(1) 蛇形水平井, 根据油层平面的变化, 水平段呈现蛇曲状, 适用厚度不均匀变化的油层(图 1.5)。

(2) 阶梯形水平井(图 1.6), 水平段像蛇形延伸。

(3) U 形水平井(图 1.7), 水平段呈 U 形分布。

(4) 螺旋形水平井(图 1.8), 在平面上水平井筒呈螺旋状散开。

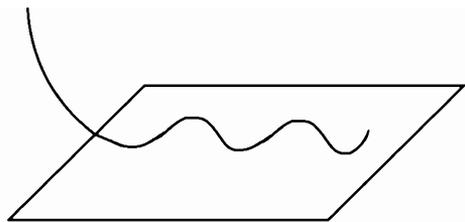


图 1.5 蛇形水平井

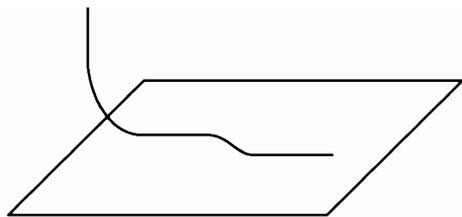


图 1.6 阶梯形水平井



图 1.7 U形水平井

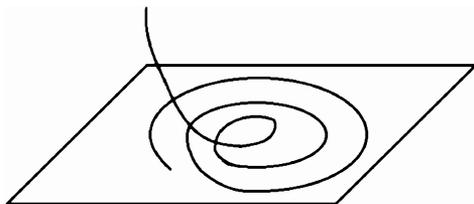


图 1.8 螺旋形水平井

(5) 反向双分支井(图 1.9), 垂直井筒上有两个分支, 一个分支井眼在下, 另一个分支井眼在上, 且井眼方向相反; 用于开采厚层或两个不同产层。

(6) 平面双分支井(图 1.10), 利用一个主垂向井筒, 在平面上钻两个水平分支井。

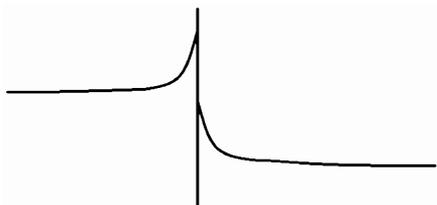


图 1.9 反向双分支井

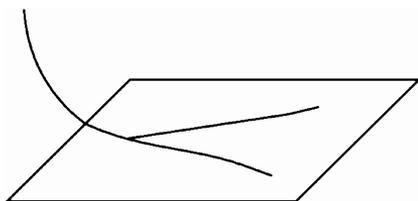


图 1.10 平面双水平分支井

(7) 平面侧向分支井(图 1.11), 从处于一个平面的水平井眼中钻数个分支井眼、帚状多分支井。

(8) 辐射形 4 分支水平井(图 1.12), 在垂向主井筒上, 三维辐射分布 4 个水平分支。

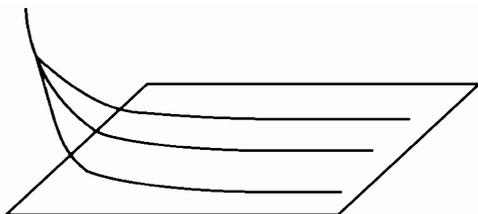


图 1.11 二维三水平分支井

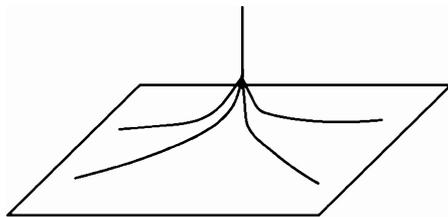


图 1.12 辐射形 4 分支水平井

(9) 鱼骨形分支井(图 1.13), 在一个水平方向的主井眼的两侧钻不同的分支。分支和主井眼处于一个平面, 形状类似鱼骨形状, 每个井眼方向的垂直深度相同。

(10) 反向鱼骨形水平井(图 1.14), 一个主井筒沿两个相反方向钻两个对称的鱼骨状分支井。

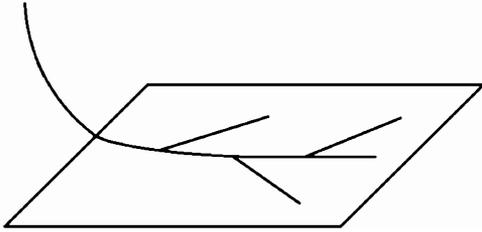


图 1.13 鱼骨形水平分支井

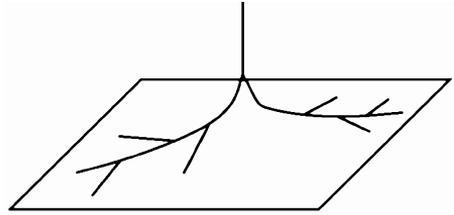


图 1.14 反向鱼骨水平分支井

### 1.2.2 复杂结构井的试井特点

水平井、多分支井等能大幅度提高油(气)井产能的主要原因是能大幅度提高与油藏的接触面积, 与直井相比需要的生产压差较小。水平井与直井相比油藏接触面积及压力传播方式存在很大差异, 其试井方法也存在较大差别。主要体现在如下 4 点。

(1) 渗流问题复杂。从渗流形态看, 水平井试井既涉及平面径向流动, 也存在垂向流动, 因此是二维试井问题, 如果严格考虑平面上物性的差异性, 这就涉及三维渗流问题, 而直井试井一般只涉及一维流动。

(2) 试井模型求解方法繁琐。直井试井一般采用拉普拉斯变换求解方法, 而复杂结构井必须考虑井筒结构的三维分布, 水平井需要考虑沿井筒方向的压力变化, 分支井还需考虑各个分支的压力变化, 因此广泛采用点源函数求解方法, 求解方法更复杂。

(3) 典型压力曲线形态多样。直井的典型曲线图版一般分为井筒储集段、过渡阶段、平面径向流阶段、边界反映阶段。而水平井除了井筒储集和过渡阶段外, 主要存在垂向径向流、线性流、地层拟径向阶段、边界反映阶段, 其中边界反映阶段曲线形态除了受边界距离影响外, 还受边界与水平井井筒的夹角制约。

(4) 试井解释多解性问题严重。直井试井解释中, 不同试井模型的曲线形态有类似性, 试井解释存在多解性。但水平井涉及的流态更复杂, 解释参数更多, 多解性更难于排除。例如, 存在一条边界的均质模型直井试井问题, 需要解释的参数有井储系数、表皮系数、渗透率、边界距离 4 个参数, 而均质模型存在边界的水平井试井, 需要解释参数有井储系数、表皮系数、平面渗透率、垂向渗透率、水平井井筒长度、水平井筒在油层中的位置、边界距离、边界与水平井井筒的夹