

高等学校教材

试井分析方法

李晓平 张烈辉 刘启国 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

试井分析方法

李晓平 张烈辉 刘启国 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从试井的概念出发,较为全面系统地阐述了单相流及多相流条件下油井、气井的产能及不稳定试井分析基本理论与方法。主要包括油井、气井及油气两相流井产能试井分析方法,均质、双重介质及垂直裂缝井中的油井、气井、水平井的常规及现代试井分析理论与方法,单井试井设计方法,多井试井分析方法及多相流数值试井分析理论与方法等内容。

本书主要作为高等学校石油工程专业教材,也可作为研究生、高等职业教育、成人教育及相关专业的参考教材,也可供从事油气田勘探与开发的科研和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

试井分析方法/李晓平,张烈辉,刘启国编著.

北京:石油工业出版社,2009.8

高等学校教材

ISBN 978-7-5021-6879-7

I. 试…

II. ①李… ②张… ③刘…

III. 试井-分析方法-高等学校-教材

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 150475 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

编辑部: (010)64523580 发行部: (010)64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 356 千字

定价: 22.00 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

试井是油气藏动态描述、动态监测的重要手段之一，已成为油气勘探开发工作中的一个重要组成部分。它是一种以油气渗流力学理论为基础，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测试井的各种特性参数和油层、气层、水层的生产能力，以及油层、气层、水层之间，井与井之间连通关系的方法。

通过试井分析，一方面可以提供如油气井产能、油气藏的原始地层压力、地层渗透率、储层类型、测试井的完井效率、井底污染情况、油气层改造措施的效果、单井的控制储量、测试井附近的油气层边界和井间连通情况等参数及动态特性；另一方面，可以监测油气藏压力、产量等动态参数的变化，为调整方案提供科学依据。

试井分析是油气渗流力学理论在油气藏工程中的具体应用和实践，是石油工程专业主干课程“油气层渗流力学”的深入延伸和具体应用，同时它也是石油工程专业主干课程“油藏工程”的系列配套课程。

本书由“油气藏地质及开发工程·西南石油大学”国家重点实验室“油气藏渗流及应用技术”学术方向的部分教师编写。其中第一、三、四、七、八章由李晓平编写，第二、五、十一章由张烈辉编写，第六、九、十章由刘启国编写。该教材的初稿形成于2000年，并在西南石油大学石油工程专业八届本科生中使用，经数次修改完成。在教材编写过程中参考了众多国内外专家的相关专著和教材，并得到西南石油大学石油工程学院的大力支持，李允教授、李士伦教授、赵必荣教授对教材的完善提出了许多宝贵意见，同时该书在数次修改完善过程中得到教育部博士点基金课题“低渗透气藏非线性渗流理论及气藏工程方法研究”以及四川省学术和技术带头人培养资金课题“低渗透气藏试井解释评价方法研究”的资助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者经验不足，水平有限，教材中存在的不足，敬请读者提出宝贵意见。

编 者
2009年4月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 试井的概念及分类	1
第二节 试井的发展历史	2
习题	5
第二章 产能试井分析方法	6
第一节 油井产能试井分析方法	6
第二节 油气两相流产能试井分析方法	11
第三节 气井产能试井分析方法	15
习题	27
第三章 不稳定试井分析基础	29
第一节 不稳定试井模型及分析方法	29
第二节 不稳定试井中的基本概念	33
习题	41
第四章 均质油藏不稳定试井分析方法	42
第一节 均质油藏常规试井分析方法	42
第二节 均质油藏现代试井分析方法	55
习题	83
第五章 双重介质油藏不稳定试井分析方法	87
第一节 双重介质油藏的概念及其渗流特征	87
第二节 双重介质油藏常规试井分析方法	90
第三节 双重介质油藏现代试井分析方法	93
习题	104
第六章 均质油藏垂直裂缝井试井分析方法	105
第一节 无限导流垂直裂缝井试井分析方法	105
第二节 有限导流垂直裂缝井试井分析方法	115
习题	124
第七章 气井不稳定试井分析方法	125
第一节 气井常规试井分析方法	125
第二节 气井现代试井分析方法	139
习题	145
第八章 水平井试井分析方法	148
第一节 水平井试井分析数学模型	148
第二节 水平井试井分析典型曲线	151
第三节 水平井试井分析方法	155

习题..... 160

第九章 多井试井分析方法..... 161

第一节 干扰试井分析方法..... 161

第二节 脉冲试井分析方法..... 165

习题..... 170

第十章 试井设计方法..... 171

第一节 产能试井设计方法..... 171

第二节 不稳定试井设计方法..... 174

习题..... 179

第十一章 多相流数值试井分析方法..... 180

第一节 数值试井的研究内容..... 180

第二节 多相流数值试井数学模型..... 185

第三节 气水两相流数值试井的数值模型..... 188

第四节 气水两相流数值试井模型的求解..... 196

第五节 气水两相流数值试井模型的应用..... 200

习题..... 211

附录..... 212

附录一 符号及单位表..... 212

附录二 单位换算表..... 213

附录三 公式的单位变换..... 214

参考文献..... 216

第一章 绪 论

试井是油气藏动态描述及动态监测的重要手段之一，已成为油气勘探开发工作的一个重要组成部分。本章主要介绍试井的基本概念及试井的发展历史。

第一节 试井的概念及分类

一、试井的概念

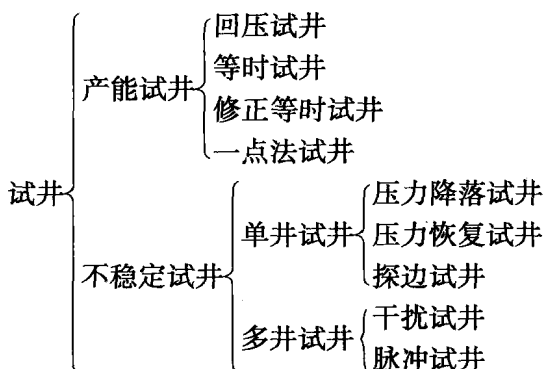
试井有广义和狭义之分。广义试井包括压力、温度的测量，取高压物性样品，不同工作制度下的油、气、水流量的测量，探测砂面以了解出砂情况等。狭义试井仅指对井底压力或井口压力的测量和分析，以及为了进行压力校正而进行的温度测量和为了分析压力动态而进行的产量计量。

本书讨论的试井，主要是指狭义试井。它是以油气渗流力学为理论基础，以压力、温度和产量测试为手段，研究油气藏地质和油气井工程参数的一种方法。也就是对井（油井、气井或水井）进行测试，测量井（油井、气井或水井）由于改变工作制度而引起的压力和产量变化，通过对这些变化过程的分析，来研究地层参数、测试井的产能和完井质量，以及有关油气藏和测试井的动态问题，分析测试井增产改造的效果。结合节点分析等研究方法，还可以选择测试井的合理工作制度。

简单地说，试井是以油气渗流力学理论为基础，借助各种测试仪表，通过对井（油井、气井或水井）生产动态的测试来研究储层和测试井的各种物理参数、生产能力以及储层之间连通关系的一种动态方法。

二、试井的分类

就研究的目的而言，试井分为两大类，即产能试井和不稳定试井。



产能试井是指改变若干次测试井的工作制度，测量在各个不同工作制度下井的稳定产量及相应的井底压力，利用稳定试井分析理论研究测试井生产能力的一种动态方法。

不稳定试井是指改变测试井的产量，并测量由此而引起的井底压力随时间的变化，利用

不稳定试井分析理论研究测试层和测试井特性参数的一种动态方法。

三、试井的用途

产能试井的用途主要表现在：确定测试井的产能及对单井进行动态预测等。

不稳定试井的用途主要表现在：(1) 确定储层的孔隙结构性质，即油气藏类型；(2) 确定表征地层原始能量重要标志的原始地层压力；(3) 确定地下流体的流动能力，如地层流动系数、地层系数、地层平均渗透率；(4) 判断完井效果，通过污染系数的大小判断井的完善程度；(5) 确定措施井及层位，通过污染系数的大小及井的完善程度，确定井或层是否需要采取增产改造措施；(6) 判断增产改造措施的效果，通过措施前后试井资料的分析，评价增产改造措施是否有效，对于酸化井主要判断污染系数是否减小，对于压裂井除了判断污染系数的大小外，还要检查是否出现压裂井的特征；(7) 推算探测范围和估算单井控制储量，即根据试井压力历史资料和所求的地层参数推算探测范围的大小，结合地质静态资料估算单井控制储量和生产能力；(8) 判断边界性质、距离、形状和方位等，根据试井资料的特征反映识别边界类型及井到各边界的距离，通过地质资料和其他井的试井资料分析得到边界的形状和方位；(9) 判断井间连通情况，确定连通厚度及连通渗透率的大小；(10) 根据试井资料特征和地质资料，判断地层渗透率的方向性发育情况。

第二节 试井的发展历史

一、测试方法的发展历史

美国在 1867 年出现了世界上第一台地层测试器。20 世纪 20 年代，美国已经研制出并使用了测量井内最高压力的仪器。到 1933 年，大约有 10 种不同类型的井下压力计在现场测试中得到应用。20 世纪 50 年代初期，研制出可以多次开关井的测试阀及密闭取样器，从而使测试不仅能获得产量，还可获得两次以上开井或关井的压力曲线及流体样品，为正确分析和评估测试层特性提供了更多的资料。20 世纪 60 年代，为更好地在裸眼井段中测取资料，发展研制了液压膨胀式测试器。在 20 世纪 70 年代，随着海上石油天然气勘探的发展，为适应大斜度井、高产井和浮动钻井船的要求而研制了各种海上测试器，如各种类型的压力控制器 (PCT)、大通径的环空压力测试器 (APR) 等。

苏联在 20 世纪 60 年代初开始研制地层测试器，到 20 世纪 70 年代中期，其测试工作量已占总工作量的 80%，收到了明显的效益。

随着地层测试技术的发展，井下录取资料的压力计、温度计等装置也不断发展，1970 年出现了机械压力计，1975 年出现了电子压力计，这些电子压力计的精度高达 0.035%FS (FS 为满量程)，分辨率不低于 0.000139MPa。1980 年出现了地面直读式的电子压力计，1983 年则可以同时在地面和井底测试产量和压力。高精度电子压力计的出现，使得测试方法也相应发生了变化，发展了干扰试井及脉冲试井技术。

国外研制出的随地层测试器一起下井的油管输送射孔技术 (TCP)，即地层测试与油管射孔联作技术，不仅加快测试速度，而且能在负压条件下打开油层，大大减少了对油层的损害。

二、试井分析理论的发展历史

试井分析理论是随着渗流力学理论的发展而进步的，国外对试井分析理论的研究起步于 20 世纪 20 年代。为了解油井的生产能力，1933 年 Mocre 等人提出稳定试井分析方法，这种方法在 20 世纪三四十年代得到较为广泛的应用。1949 年 Van Everdingen 在 AIME 上发表了利用 Laplace 变换求解不稳定渗流问题的论文，标志着不稳定试井分析理论基础的诞生。基于 Van Everdingen 的压降解，建立了油井定产量生产情况下的压降试井分析方法。1951 年 Horner 在压降解的基础上，提出油井压力恢复试井分析方法。这一方法自提出以来得到了广泛应用，至今如此，原因是它具有坚实的理论基础和广泛的实用性。后来在压降试井分析方法和 Horner 分析方法基础上发展的 MDH、MBH 及变产量试井分析方法等都是对前有方法的改进和完善。这些方法都是常规试井分析方法。1960 年，苏联的 Barenblatt 首次针对裂缝性油藏提出了双重介质的概念，建立了渗流数学模型，获得了解析解，奠定了双重介质油气藏试井分析的理论基础。1967 年马修斯和拉塞尔的专著《油层压力恢复和油气井测试》的出版，标志着试井分析成为渗流力学具体应用的一个重要分支，但试井分析的方法仍是基于半对数直线段的常规分析方法。到 20 世纪 70 年代后期，试井分析理论才发生了质的变化。1970 年 Ramey（雷米）提出试井分析的新方法——图形拟合方法即双对数分析方法，可以说这是试井分析的一次革命性飞跃，现代试井分析真正开始起步。其后的 McKinley、Earlougher 等人基于图形拟合的原理，提出了不同条件下的现代试井分析方法，这些方法都是对 Ramey 方法的不断修正和完善。1979 年 Gringarten（格林加登）对 Ramey 方法的理论进行了改进，获得了更符合实际及更方便使用的 Gringarten 图版，提出了在计算机辅助下的压降图版分析方法。该方法的出现，使试井分析结果的精确程度大大提高，这是试井分析理论的重大进展。1983 年 Bourdet（布德）基于 Gringarten 图版分析方法，提出了压力导数分析方法，该方法增强了油气藏类型的识别功能，并且将压力导数图版与 Gringarten 图版组合形成了新的试井分析复合图版，基于复合图版的现代试井分析方法自问世以来到目前都得到了广泛应用。后来出现的神经网络、人工智能等分析方法都是以压力导数曲线特征分析为基础的。随着渗流理论及计算技术的发展，目前在复杂渗流的数值试井分析理论与方法研究方面也取得了一定的发展。

我国的试井工作起步于 20 世纪 50 年代的玉门油田，当时只不过是一些简单的测压和用于求单井产能的系统试井。20 世纪 60 年代，是以了解井的完善性为目的的系统试井和以求地层压力、流动系数及地层渗透率为目的的压力恢复试井，它们在大庆、胜利等油田的开发中发挥了重要作用。改革开放以来，我国各油田陆续形成了专门的试井队伍，一方面培养人才，一方面引进仪器设备，从此我国的试井工作有了较快的发展。经过引进、吸收、消化和开发，目前我国在现场测试技术及试井分析理论和方法研究方面已经达到国际水平。

在试井分析软件方面，目前国外有代表性的试井解释软件有：SSI 公司的 Workbench 软件，KAPPA 公司的 Saphir 软件，EPS 公司的 PanSystem 软件，FEKETE 公司的 Fast 软件。这些软件模型丰富，功能强大，商品化程度高。近年来，新推出的数值试井解释版本，考虑了多井生产的影响，三维视觉效果使地质模型更接近实际，试井分析成果更具实际意义。我国的石油高等院校及科研院所已研制了多种版本的试井解释软件，并在全国各油气田得到推广应用。

三、试井分析理论的发展方向

本书阐述的不稳定试井分析方法是基于地层中的单相流体渗流，没有涉及复杂流体流动（例如多相流动、非牛顿流动、凝析气井等）和复杂介质（例如低渗和异常高压油气藏等）中流体的流动。试井是为油气田开发服务的，因此试井分析理论与方法必须建立在实际油气田开发的基础上。由于油气藏及其中流体流动的复杂性，因此，目前在许多复杂流体流动和复杂介质中的试井分析理论与方法还没有得到很好解决，这些就是试井的发展方向。要了解试井的发展方向，首先要立足国内外，尤其是我国油气田的实际开发情况，为我国的油气田勘探开发服务，进而将我国的试井分析理论推向世界。纵观试井分析的发展现状及我国油气藏的特点，试井分析理论与方法应在以下几个方面进一步研究和完善。

1. 水驱油藏

我国绝大多数已经开发的油田为高含水油田，在这些油田的开发中后期，储层性质已发生变化，油水关系更为复杂，多井干扰问题突出，试井在这一阶段能解决什么问题？地层渗透率和地层压力是什么概念？人们最关心的残余油分布问题，即老区在那里找油，试井能否发挥作用？如何研究试井分析问题；这些都是试井研究人员必须要研究的问题。

2. 水驱气藏

在我国已投入开发的气藏中，水驱气藏超过 50%，这类气藏开发的中后期，地层中的气水关系及井筒中的流动更为复杂，如何通过试井监测水的推进情况，如何通过试井为气井合理工作制度的确定提供依据，如何通过试井为预防水侵提供依据，这是水驱气田中试井需要解决的问题。

3. 非牛顿流体

我国的稠油油藏占有相当大的比例，同时化学驱采油已经在我国得到工业化应用，稠油及化学驱开采过程中流体的流动属于非牛顿流体流动，其流动规律已不服从达西定律，如何考虑流体流变学行为，提出复合实际情况的试井分析模型并建立合理的分析方法是试井研究人员应该研究的问题。

4. 低渗油气藏

我国低渗油气藏的分布非常广泛，目前成熟的试井分析理论在解决非低渗油气田的试井方面效果较好，而由于低渗透油气田本身的特点，在渗流过程中可能存在启动压差和应力污染，如何考虑这些因素的影响，建立新的试井分析理论与方法，这是试井研究人员必须考虑的问题。

5. 异常高压油气藏

我国已有许多异常高压油气藏，例如渤海湾盆地的异常高压深层油藏、新疆石西油田石炭系油藏、濮城油田卫 79 块油藏、尕斯库勒油田 E3 油藏、克拉 2 气田、川中油气矿嘉二气藏等。这类油气藏在开采过程中孔隙流体压力要下降，其结果必然会改变原有的应力状态，从而导致地层变形，这种变形将导致地层渗透率、孔隙度及岩石压缩系数等地层特性的变化，地层特性的变化要影响流体在其中的渗流，并且可能改变流体的渗流模式，因此地层变形和流体的渗流是一个相互耦合作用的过程，这已经为国内外大量的实验研究和油气田开发实践所证实。对于这类油气藏，原有的试井分析方法已经不能很好地适用，必须建立一套从

测试到试井分析方法的全新技术。

6. 凝析气藏

凝析气藏在我国大量存在。凝析气井试井过程中伴随反凝析引起的相变，从而在地层中产生多相流动，这种多相流动与常规油藏中的多相渗流机理不同，如何考虑相变对试井的影响，这是凝析气井试井中应该研究的问题。

7. 复杂结构井

目前复杂结构井已经在世界和我国的油气田开发实际中得到大量应用，复杂结构井主要包括大斜度井、水平井、分支水平井及多底井，由于井底结构比直井复杂，因而其渗流机理较为复杂，渗流数学模型复杂，这类井的试井分析理论与方法以及工业化应用软件是急待研究和开发的。

8. 数值试井

我国油气藏非均质性严重，内外边界复杂，采用常规试井分析理论与方法已无法解决，同时由于试井问题的多解性，要求研究人员不能停留在对 Ramey 方法的改进和修补上，如何把生产测井、试井、数值模拟结合，综合考虑地质、测井、录井及生产历史数据，提出新的试井分析方法就成为研究人员的重要任务之一。通过研究建立起确定纵向非均质参数的理论与方法，确定剖面剩余油分布与潜力层的理论和方法，从而更好地为油气田开发服务是试井研究人员必须考虑的问题。

9. 井筒动力学对试井的影响

1992 年国外开始研究井筒动力学对试井资料的影响。压力计下入深度（测试层顶部、中部、底部）对测试资料有何影响？影响压力响应曲线的早期、中期还是晚期？砂堵或排液对测试资料有何影响？井筒内相变的影响机理是什么？从井筒动力学能否判断井筒内的流动机理对压力响应曲线的影响？反之，能否根据压力响应曲线推断井筒动力学的特征，判断井的生产状况是否正常？能否推断不正常的原因是什么？这些问题也是试井研究人员应该考虑的。

习 题

1. 什么是试井？试井有哪些分类？
2. 什么是产能试井？什么是不稳定试井？
3. 阐述产能及不稳定试井的主要用途。
4. 产能及不稳定试井的类型有哪些？
5. 阐述试井与油气渗流力学的关系。

第二章 产能试井分析方法

油气井的产能是油气田开发工作者最为关心的问题之一。它是油气井配产的重要依据，是油气井生产系统分析及生产动态预测的基础。研究油气井产能的重要方法是矿场产能试井。本章主要介绍油气井的产能试井分析方法。

第一节 油井产能试井分析方法

一、产能试井原理

由渗流力学理论，单相原油平面径向稳定达西渗流的油井产量为：

$$q = \frac{Kh(p_R - p_{wf})}{1.842 \times 10^{-3} B\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (2-1)$$

式中 q ——油井产量， m^3/d ；
 K ——油层渗透率， μm^2 ；
 h ——油层厚度， m ；
 p_R ——地层压力（或静压）， MPa ；
 p_{wf} ——井底流压， MPa ；
 B ——原油体积系数；
 μ ——原油粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；
 r_e ——油井供给半径， m ；
 r_w ——油井半径， m 。

由（2-1）式可知，油井产量大小取决于油藏岩石和流体的性质及油井的生产压差。因此，测出油井产量和生产压差后，就可以判断油井的生产能力，这就是油井产能试井遵循的基本原理。

油井的产能试井也称为系统试井，它是改变若干次油井的工作制度，测量在各个不同工作制度下的稳定产量和与之相对应的井底流压及其他相关资料的一种矿场试验。根据产能试井原理，利用产能试井资料绘制指示曲线、产能分析曲线及系统试井曲线，在获得油井的产能方程后，就可确定其生产能力及合理工作制度。

二、测试方法

1. 工作制度

产能试井的工作制度通常指油井的产量、生产压差等。

1) 工作制度数

产能试井的工作制度以 4~5 个较为合适，但不得少于 3 个，工作制度要求均匀分布。

2) 最小工作制度

在生产条件允许情况下，最小工作制度的稳定流压尽可能接近地层压力，但必须能保证

原油的正常流动。

3) 最大工作制度

在生产条件允许情况下,最大工作制度的井底压力不应低于饱和压力的 70%,稳定油压接近自喷最小油压。

4) 其余工作制度

在最大、最小工作制度之间均匀内插 2~3 个工作制度。

2. 测试程序

1) 测地层压力

产能试井前,将压力计下入油层中部,采用关井的办法,获取稳定的地层静压。

2) 工作制度顺序

从小到大依次改变油井的工作制度,并测量其相应的稳定产量、井底流压和其他相关数据。

3) 关井测压

最后一个工作制度测试结束后,关井测地层压力,再次获取稳定的地层静压。

三、稳定试井曲线

1. 指示曲线

油井生产压差($p_R - p_{wf}$)与产量(q)之间的关系曲线称为指示曲线,如图 2-1 所示。指示曲线是油井产能试井分析方法选择的基础。根据油井生产的实际情况,油井的指示曲线可分为四种基本类型。

1) 直线型

直线型指示曲线如图 2-1 曲线 I 所示,其特征为过原点的直线。其原因是油井在较小生产压差下生产,地层中的流动为单相原油达西渗流。

直线型指示曲线并不永远存在,当工作制度改变(例如增大油嘴),单相达西渗流将逐渐转变为单相非达西渗流或油气两相渗流。此时,直线便发生弯曲,形成其他类型的指示曲线。

2) 曲线型

曲线型指示曲线如图 2-1 曲线 II 所示,其特征为过原点的曲线,且凹向压差轴。其原因是油井在较大生产压差或流压小于饱和压力下生产时,地层中的流动或井底附近的流动为单相非达西渗流或油气两相渗流。

3) 混合型

混合型指示曲线如图 2-1 曲线 III 所示,其特征是开始为过原点的直线,表现为地层中的达西流动,然后指示曲线变成凹向压差轴的曲线。可能的原因:一是随着生产压差的增大,油藏中出现了单相非达西渗流,增加了额外的惯性阻力;二是随着生产压差增大,井底流压低于饱和压力,井底附近出现油气两相渗流,油相渗透率降低,粘滞阻力增大。

4) 异常型

异常型指示曲线如图 2-1 曲线 IV 所示,其特征为过原点凹向产量轴。形成的可能原因:

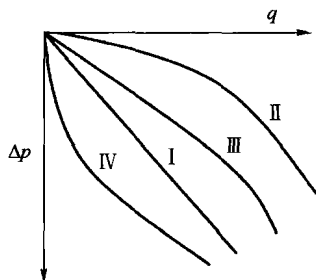


图 2-1 油井指示曲线

一是相应工作制度下的生产未达到稳定，记录的数据不能反映测试所要求的条件；二是新井井底污染，随着生产压差增大，污染逐渐排除；三是多层合采情况下，随着生产压差增大，新层投入工作。由上所述，异常曲线并非一定是错误的，应根据具体情况分析。若没有达到测试所要求的条件，则必须重新进行测试。

2. 系统试井曲线

油井产量、井底流压、生产气油比、含砂量、含水率与工作制度（油嘴）之间的关系曲线称为系统试井曲线，如图 2-2 所示。系统试井曲线是确定油井工作制度的重要依据。

3. 流入动态关系曲线

油井井底流压与产量之间的关系曲线称为流入动态关系曲线，简称 IPR 曲线。图 2-3 为单相原油满足达西渗流规律时的 IPR 曲线，利用该曲线可以对油井的生产动态进行预测。

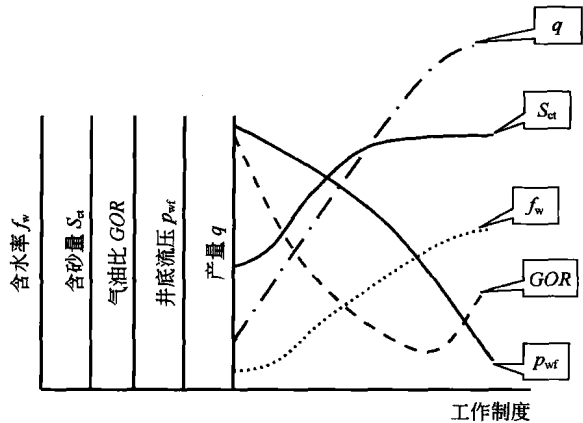


图 2-2 系统试井曲线

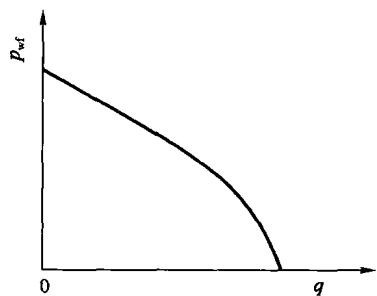


图 2-3 油井流入动态关系曲线

四、产能试井分析方法

1. 服从达西流动的分析方法

当地层中的流动为达西渗流时，指示曲线为直线型 I，则油井产能方程为：

$$q = J(p_R - p_{wf}) \quad (2-2)$$

式中 J ——油井采油指数， $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

(2-2) 式是 (2-1) 式的另一种表达方式。由 (2-2) 式看出，油井产量与生产压差之间存在线性关系。因此，根据产能试井不同测试工作制度下的油井产量和井底流压数据，在直角坐标系中作生产压差与产量之间的关系曲线，将测试数据点回归成一条直线，直线斜率的倒数就是油井的采油指数，在采油指数确定后，就可由 (2-2) 式可求任一井底流压下的油井产量。

2. 服从非达西流动的分析方法

1) 二项式分析方法

如果油井指示曲线为 II 型，则油井的产能方程可用二项式形式表示：

$$p_R - p_{wf} = aq + bq^2 \quad (2-3)$$

式中 a, b ——二项式系数，是与地层特性有关的参数。

将 (2-3) 式两端同除以产量得：

$$\frac{p_R - p_{wf}}{q} = a + bq \quad (2-4)$$

(2-4) 式称为油井的二项式特征方程。由 (2-4) 式，在直角坐标系作 $(p_R - p_{wf})/q - q$ 的关系曲线，将测试数据点回归成一条直线，称其为二项式产能曲线，如图 2-4 所示。在求出直线的截距 a 和斜率 b 后，便可确定二项式产能方程。

如果地层压力仍保持试井期间的地层压力，则由 (2-3) 式可确定任一井底流压下的油井产量：

$$q = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b(p_R - p_{wf})}}{2b} \quad (2-5)$$

如果油井井底流压等于最小自喷压力，则也可由 (2-5) 式确定油井的最大自喷产量。

2) 指数式分析方法

如果油井指示曲线为 II 型，则油井的产能方程也可用指数式形式表示：

$$q = C(p_R - p_{wf})^n \quad (2-6)$$

式中 C ——渗流系数；

n ——渗流指数， $0.5 \leq n < 1$ 。

当 $n=1$ 时，(2-6) 式变为 (2-2) 式，则 $C=J$ ，地层中的流动为达西渗流。

(2-6) 式两端取对数得：

$$\lg q = n \lg(p_R - p_{wf}) + \lg C \quad (2-7)$$

由 (2-7) 式看出，在双对数坐标系中，作油井产量与生产压差之间的关系曲线，将测试数据点回归成一条直线，称其为指数式产能曲线，如图 2-5 所示。求出直线的截距 C 和斜率 n ，便可确定指数式产能方程，在产能方程确定后，就可由 (2-6) 式求任一井底流压下的油井产量。

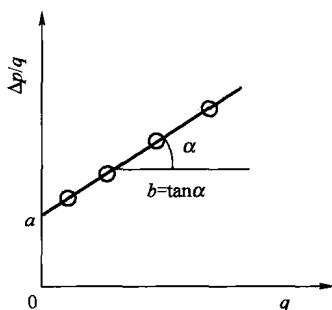


图 2-4 二项式产能曲线

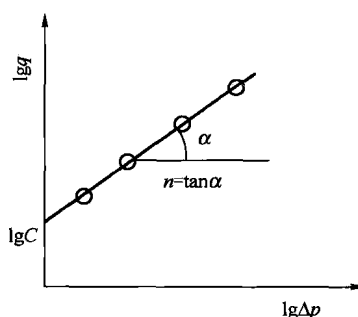


图 2-5 指数式产能曲线

3. 产能试井分析步骤

1) 整理试井资料

将各工作制度下的测试数据整理成表 2-1 所示的形式。

由表 2-1，在直角坐标系中作如图 2-1 所示的指示曲线，作如图 2-2 所示的系统试井曲线。

表 2-1 稳定试井数据表

油嘴直径 d , mm	地层压力 p_R , MPa	井底流压 p_{wf} , MPa	生产压差 Δp , MPa	油产量 q , m ³ /d	水产量 q_w , m ³ /d	含水率 f_w , %	含砂量 S_{ct}	生产气油 比 GOR, m ³ /m ³

2) 确定产能方程

如果指示曲线属于直线型 I，则由服从达西流动的分析方法确定产能方程；如果指示曲线属于曲线型 II，则由服从非达西流动的分析方法确定产能方程；如果指示曲线属于混合型 III，则可分别按达西及非达西流动的分析方法确定产能方程。

3) 作流入动态关系曲线

由所确定的产能方程，作井底流压与油井产量之间的关系曲线，由此曲线可确定任一井底流压下的油井产量。

4) 确定合理工作制度

如果指示曲线为直线型 I，则油井的合理产量可用 (2-2) 式确定。在系统试井曲线上，该合理产量对应的油嘴大小就是油井的合理工作制度。

如果指示曲线属于混合型 III，则在该指示曲线上找出直线部分和曲线部分的切点（即直线部分的终点或曲线部分的起点），该点所对应的油井产量和生产压差称为油井合理产量和合理生产压差，它们在系统试井曲线上所对应的工作制度（油嘴）称为合理工作制度（合理油嘴）。在此工作制度下，要保证油井含砂量不超标，含水率及气油比无明显上升，否则应重新确定合理工作制度。

如果指示曲线为曲线型 II，则由 (2-5) 式确定油井产量并结合系统试井曲线确定油井的合理工作制度。

五、应用实例

1. 直线型指示曲线

某油田一口油井进行了产能试井，试井数据见表 2-2。已知参数如下：原始地层压力 16.166MPa，饱和压力 2.32MPa，油层厚度 28.6m，原油体积系数 1.12，原油粘度 7.5mPa·s，泄油半径 300m，油井半径 0.155m。求采油指数和产能方程。

表 2-2 某油井产能试井数据

油嘴 d , mm	q , m ³ /d	p_{wf} , MPa	Δp , MPa
4	23.63	15.068	1.098
5	31.02	14.725	1.441
6	39.48	14.333	1.833

根据表 2-2 的数据，在直角坐标系中作出产量与生产压差之间的关系曲线，如图 2-6 所示。将测试数据点回归成一条直线，直线斜率为 0.0464d/(MPa·m³)，采油指数为直线斜率的倒数，即采油指数 $J=21.54\text{m}^3/(\text{MPa}\cdot\text{d})$ ，则产能方程为： $q=21.54\Delta p$ 。

2. 曲线型指示曲线

某油田一口油井进行了稳定试井，试井数据见表 2-3。已知参数如下：原始地层压力 20.679MPa，饱和压力 5.098MPa，油层厚度 45m，原油体积系数 1.12，原油粘度 0.8mPa·s，原油密度 0.87t/m³，泄油半径 250m，油井半径 0.155m。求油井产能方程及单相流时油井的最大产量。

由表 2-3 数据，在直角坐标系中作产量与生产压差的关系曲线，如图 2-7 所示。从表 2-3 看出，所有测点压力均高于饱和压力，且指示曲线为曲线，所以油层中的流动为单相非达西流动，可用二项式方程描述。

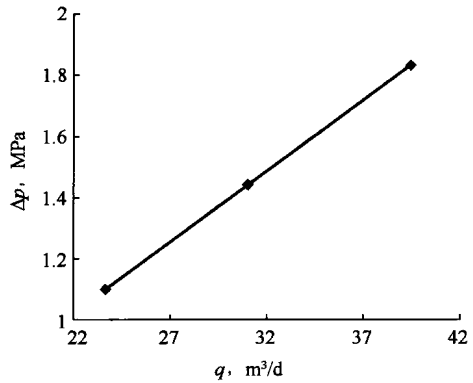


图 2-6 某油井的 $\Delta p-q$ 关系曲线

表 2-3 某油井产能试井数据

点 序	$q, \text{m}^3/\text{d}$	$p_{\text{wf}}, \text{MPa}$	$\Delta p, \text{MPa}$	$\Delta p/q, \text{MPa} \cdot \text{d}/\text{m}^3$
1	63.60	19.438	1.241	0.019
2	158.99	14.992	5.687	0.036
3	213.04	11.070	9.609	0.045
4	254.38	7.444	13.235	0.052

由表 2-3 数据，作二项式产能曲线，如图 2-8 所示。将测试数据点回归成一条直线。该直线的截距 $a=0.009\text{MPa} \cdot \text{d}/\text{m}^3$ ，斜率 $b=0.00017\text{MPa}/(\text{m}^3/\text{d})^2$ ，则二项式产能方程为：

$$\Delta p = 0.009q + 0.00017q^2。$$

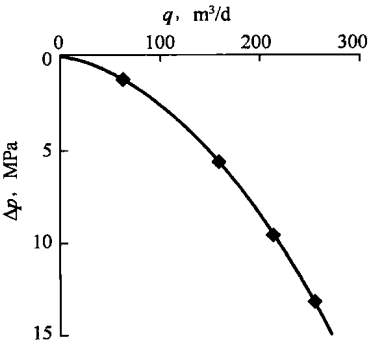


图 2-7 油井指示曲线

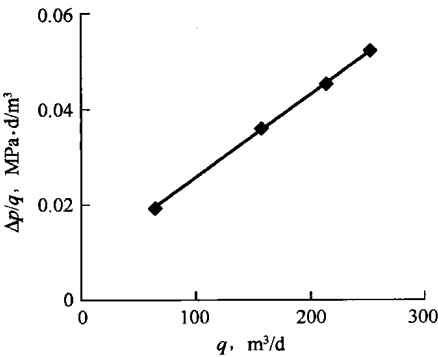


图 2-8 油井二项式产能曲线

当 $p_{\text{wf}} = p_b$ ，则可求得油藏单相流条件下的最大产量，即将 $p_{\text{wf}} = 5.098\text{MPa}$ 、 $p_R = 20.679\text{MPa}$ 及 a 、 b 代入 (2-5) 式，得单相流时油井的最大产量为 $277.4\text{m}^3/\text{d}$ 。

第二节 油气两相流产能试井分析方法

一、地层压力低于饱和压力 ($p_R < p_b$)

当 $p_R < p_b$ 时，整个油藏中的流动为油气两相流动，其产能试井测试程序仍然可以采用