

— 中国石油大学(华东)学术著作出版基金重点资助

智能油田开发 理论及应用

姚军 张凯 刘均荣/著

Theory and Application for Intelligent
Oilfield Development



科学出版社

中国石油大学(华东)学术著作出版基金重点资助

智能油田开发理论及应用

**Theory and Application for Intelligent
Oilfield Development**

姚 军 张 凯 刘均荣 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了智能油田开发方面的实时监测、实时优化理论与方法,主要包括油藏动态实时监测数据处理与解释方法、自动历史拟合方法、油藏开发实时注采优化理论、油藏井位及井网优化方法,以及智能油田开发模拟实验与典型油田应用实例。

本书可供从事油藏数值模拟与开发方案编制的研究人员使用,也可供石油院校、地质院校相关专业的广大师生教学、科研参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能油田开发理论及应用 = Theory and Application for Intelligent Oilfield Development / 姚军, 张凯, 刘均荣著. —北京: 科学出版社, 2018.7

ISBN 978-7-03-054016-4

I. ①智… II. ①姚… ②张… ③刘… III. ①智能技术-应用-油田开发 IV. ①TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 179128 号

责任编辑: 万群霞 冯晓利 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装



科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏捷印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张: 15 1/4 插页: 6

字数: 360 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

智能油田理念兴起于 21 世纪初。姚军教授课题组从 2005 年以来一直研究智能油田开发理论与方法，所撰写的《智能油田开发理论及应用》是基于多年累积的研究成果和应用经验编写而成的一本学术专著，在很大程度上体现了智能油田相关研究的最新进展。

该书系统性强，内容完整，所介绍的智能油田开发由实时监测、实时优化、实时决策、实时反馈等多个环节组成，主要内容包括油藏动态实时监测数据处理与解释方法、自动历史拟合方法、油藏开发实时注采优化理论、油藏井位及井网优化方法、智能油田开发模拟实验等，并给出了多个典型的油田应用实例可供读者参考，建立了一套比较完整的智能油田开发理论及方法体系。

该书理论新颖，创新性强，将智能化方法引入到油田开发方案编制中，突破了传统的油田开发方案编制方法。该书介绍的智能化油藏开发理论及方法，以油藏实时监测理论与解释方法为切入点，通过对油藏实时监测数据分析来了解地质信息，并利用自动历史拟合对地质模型加以校正；进而结合最优化理论与数值模拟技术，优化注采的井间关系、井位井数及最佳井网等，实现复杂油藏开发的实时优化与智能化。

该书弥补了传统油田开发的相关不足之处，实现了实时监测、实时数据采集、实时解释、实施决策与优化的油藏闭环管理，有利于提高油田开发的决策效率及石油采收率。另外，该书所介绍的理论和方法不仅在油藏开发中具有应用价值，而且在其他地下资源的开发中也有参考意义。



中国科学院院士

2018 年 1 月

前 言

智能化思想始于通信、计算机信息管理等学科，目前已逐步渗透于各行各业，悄然改变着世界发展的进程。作为全球智能化技术的引领者之一，谷歌公司（Google）在2016年I/O大会上指出，其愿景的核心理念是“人类正一步步走向一个基于人工智能的世界”。

自2014年下半年国际油价出现断崖式下跌后，高成本成为油田开发中极为严峻的问题。国内外各大石油公司积极开展降本增效工作，油田开发方案作为指挥油田工作的中枢，是上产稳产、提高效益的最重要优化对象之一，以制定实时最优开发方案为重要依托的油田智能化转型被认为是脱离困境的妙方。国外的BP（英国石油公司）、Shell（壳牌）、Statoil（挪威国家石油公司）等预计油田智能化升级对其产值的贡献率超过50%。在国内，智能油气田建设成为国家大力推进“信息化与工业化深度融合”“中国制造2025”发展战略，落实“十三五”信息化发展规划的重要任务之一。2017年2月24日，《中国石化智能油气田试点建设项目可行性研究报告》通过论证。可以预测，在新机遇和新挑战面前，油田的智能化建设势必成为未来石油行业发展中极为重要的一环。

智能油田开发包含实时监测、实时优化、实时决策、实时反馈等环节。它是利用放置在井下的长时性传感器实时采集井下设备的工况及生产层段的压力、温度、流量、组分等参数，通过通信电缆/光缆将采集的信号传输到地面，利用已开发的软件平台对数据进行挖掘、分析和学习，同时结合油藏数值模拟预测和优化调控技术，形成油藏管理决策信息，并通过控制系统反馈到井下，实现液流控制和井身结构重置，从而改进和提高油藏/油井的产状，达到降低生产成本、加速资金流动和提高油田采收率的目的。

围绕上述开发过程，本书以油藏实时监测理论与解释方法为切入点，通过数据分析，了解油藏的基本状况；并利用自动历史拟合方法，校正现有的地质模型；结合最优化理论与数值模拟技术，优化注采井间的注采关系、井位井数、最佳井网，实现复杂油藏开发的实时优化与油藏开发的智能化。

全书共8章，第1章和第2章由姚军撰写，第4章~6章及第8章由张凯撰写，第3章和第7章由刘均荣撰写，全书由姚军统稿。本书在撰写过程中参考了众多专家学者的研究专著、论文，在此一并表示感谢。

由于水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017年12月

目 录

序	
前言	
第1章 智能油田概述	1
1.1 智能油田的特点	1
1.2 智能油田的优势	2
1.3 智能油田开发的理念	3
参考文献	4
第2章 智能井	5
2.1 概述	5
2.2 智能井井下监测技术	6
2.2.1 井下压力监测技术	7
2.2.2 温度测量技术	7
2.2.3 多相流测量技术	8
2.2.4 物性(电阻率)测量	8
2.2.5 电测量技术	9
2.2.6 井中雷达测量技术	10
2.2.7 地震测量技术	11
2.3 智能井井下生产控制技术	11
2.4 井下数据传输技术	13
参考文献	13
第3章 油藏动态实时监测数据处理与解释	15
3.1 概述	15
3.2 小波数据处理技术	16
3.2.1 小波理论	16
3.2.2 异常点剔除	17
3.2.3 小波降噪	24
3.3 不稳定过程识别	30
3.4 数据压缩	36
3.5 流量史重建	37
3.6 特征过滤	43
3.7 油藏参数解释方法	44
参考文献	46
第4章 自动历史拟合方法	48
4.1 反演问题的正则化理论	48

4.1.1 油藏数值模拟正问题	49
4.1.2 油藏历史拟合反问题	50
4.1.3 反问题的正则化求解	51
4.1.4 建立随机初始地质模型	53
4.2 国内外研究现状	56
4.2.1 确定性优化方法	56
4.2.2 随机性优化方法	59
4.2.3 混合方法	60
4.3 数据同化自动历史拟合方法	63
4.3.1 集合 Kalman 滤波	63
4.3.2 基于流线的协方差区域化方法	66
4.3.3 计算实例	69
4.4 降维自动历史拟合方法	75
4.4.1 主成分分析原理	75
4.4.2 PCA 在历史拟合中的应用	77
4.4.3 计算实例	80
4.5 裂缝分布自动历史拟合方法	82
4.5.1 拟合参数以及观测数据的选取	82
4.5.2 裂缝性油藏的 DFM 模型	83
4.5.3 基于格里菲斯准则预测裂缝的分布规律	84
4.5.4 裂缝的反演过程	85
4.5.5 计算实例	85
参考文献	89
第 5 章 油藏开发实时注采优化理论	94
5.1 国内外研究现状	94
5.2 最优化理论基础	95
5.2.1 最优化问题数学模型的构成	96
5.2.2 最优化问题求解方法及选用标准	96
5.2.3 最优化问题建模的一般步骤	97
5.3 注采调控优化数学模型的建立	98
5.3.1 注采调控优化问题描述	98
5.3.2 注采调控的性能指标	99
5.3.3 注采调控的目标函数	100
5.3.4 注采调控的设计变量	100
5.3.5 注采调控的约束条件	101
5.3.6 注采调控数学模型	101
5.4 生产优化梯度算法高效求解	102
5.4.1 最速下降法	103
5.4.2 梯度求解方法	104
5.5 生产优化无梯度算法求解	112
5.5.1 近似梯度算法	112
5.5.2 微粒群算法	117

5.5.3 插值型算法	119
5.5.4 混合型算法	122
5.5.5 无约束的油藏生产优化案例	127
5.6 约束条件的处理方法	133
5.6.1 边界约束的处理方法	133
5.6.2 一般约束的处理方法	134
5.6.3 考虑约束条件的生产优化	138
参考文献	142
第6章 智能油田井位及井网优化	144
6.1 国内外研究现状	144
6.1.1 规则面积井网优化研究	144
6.1.2 不规则井网优化研究	146
6.2 油田开发初期井网优化	147
6.2.1 井网优化的目标函数	147
6.2.2 算法描述	148
6.2.3 井组类型描述	150
6.2.4 井网优化向量	153
6.2.5 井网优化离散问题	155
6.2.6 问题处理过程	157
6.2.7 计算实例	158
6.3 考虑地质及开发因素约束的三角形井网优化	171
6.3.1 考虑地质因素以及开发因素约束的井网	172
6.3.2 井网优化问题	173
6.3.3 井网生成及优化求解	175
6.3.4 实例分析	178
6.3.5 结论	182
6.4 考虑地质及开发因素约束的四边形井网优化	182
6.4.1 四边形网格剖分方法	182
6.4.2 四边形井网适应性调整	183
6.4.3 应用实例	184
6.4.4 结论	188
6.5 井位优化	188
6.5.1 井位优化方法	188
6.5.2 计算实例	190
参考文献	194
第7章 智能油田模拟实验	196
7.1 智能油田仿真系统研制	196
7.2 系统组成	196
7.2.1 油藏模拟箱	196
7.2.2 流体注入系统	197
7.2.3 流体生产系统	198
7.2.4 饱和度监测系统	198

7.2.5	油水自动计量系统	198
7.2.6	注采井自动控制系统	199
7.2.7	数据采集系统	199
7.3	系统功能及特点	199
7.4	实例分析	200
7.4.1	模型设计	200
7.4.2	注采调控优化	201
7.4.3	结果分析	206
第 8 章	油田应用实例	207
8.1	注采优化油藏实例	207
8.1.1	L5 油田注采调控优化	207
8.1.2	6A 区块注采生产优化	214
8.2	Q6 油田历史拟合及生产优化	221
8.2.1	油藏特征	221
8.2.2	开发简介	222
8.2.3	数值模拟模型的建立	223
8.2.4	自动历史拟合	223
8.2.5	生产动态优化与预测	228

彩图

第1章 智能油田概述

能源作为经济发展的重要资源和动力,对任何国家和地区的发展都发挥着重要作用。在当前人类消费的基本能源中,石油能源占据首要地位,因此,稳定的石油供给体系是国家经济发展和国防建设重要的物质基础。

提高石油产量、保障石油供给主要有两个重要途径:一是借助勘探技术的进步,不断发现新的油田或探明新的储量,为石油开发提供充足的后备资源;二是不断完善开发理论、提高原油的采收率(enhanced oil recovery, EOR),在可采储量一定的情况下,尽可能地将地下的石油开采出来。然而,随着勘探技术的不断进步、勘探程度的逐步加大,国内大多数油田地质储量均已探明。因此,在我国石油资源储量一定的客观事实下,通过勘探技术的进步不断增加,石油开发后备资源的困难日益加大。所以,用第一种途径来保障稳定的石油供给体系仍有较大的风险。相比而言,第二种途径的可发展空间相当巨大。迄今,我国各大油田的平均采收率约为 35%,仍有约 2/3 的储量尚待开采^[1],可见石油可采储量的采出程度相对偏低,提高采收率仍有很大的发展空间。目前,我国石油的剩余储量约 $33 \times 10^8 \text{t}$,将油田采收率每提高一个百分点即可增油 $3300 \times 10^4 \text{t}$,每提高一个百分点增加的石油产量就超过了胜利油田现有开采水平下的年产量。因此,提高采收率的效益十分可观,这将对保障我国稳定的石油供给体系,继而推动国民经济的发展和国防体系的建设起到非常巨大的作用。因此,提高原油采收率迫在眉睫。

自 20 世纪 80 年代以来,提高采收率技术主要以各种 EOR 三次采油技术为代表,但是三采技术往往需要花费较大的成本才能取得更高的采收率,并且这种提高经常伴随着破坏性的开采(如注入聚合物、凝胶等)。针对这些问题,最近世界各大石油公司提出了一种新兴的提高采收率技术——智能油田。

1.1 智能油田的特点

简单地说,智能油田是一套能够产生人工智能行为的油气田开发生产系统。它通过光纤等设备实时搜集生产信息,在分析及模拟后自主思考判断给出最优方案,再将方案实施到现场调控生产,其主要流程涵盖数据采集、分析、模拟、优化、决策和调控等多个环节。智能油田最大的优势在于“高质量、高水平、高效率”的油藏管理,能够以最小的经济投入获取最大的原油采收率。

通常,智能油田在数字油田的基础上实施,可实现实时监测、实时数据采集、实时解释、实施决策与优化的闭环管理,将油井、油田及相关资产相互联系起来统筹经营与管理,是提高采收率的有效途径和发展方向,在注剂驱替剂比较昂贵的情况下更是如此。目前,随着油藏动态监测技术、水平井油井管理及建立在水平井基础上的油藏管理技术

的进步与成熟,智能油田提高采收率的前景广阔。

智能油田的发展表示油气田开发将进入智能化、自动化、可视化、实时化的闭环新管理阶段。智能油田的基本概念和发展方向就是将涉及油气经营的各种资产(油气藏等实物资产、数据资产、各种模型和计划与决策等),通过各种行动(数据采集、数据解释与模拟、提出并评价各种方案、方案实施等),有机统一在一个价值链中,形成对虚拟现实表征的智能油田系统。人们可以实时观察到油田信息,并与之互动。

智能油田的发展代表了从周期性的优化到连续不断优化的趋势,代表了管理理念从传统的集中于一点的工作方式到油藏整体解决方案的转变。智能油田不是一种由单一的团队开发的独立技术,相反,它是基于多种工具、技能和工作流程的技术集成,是一种结构化和可持续发展的技术。在技术层面上,这一总体目标是通过将一系列的数据不断反作用到系统中,进而通过数据循环实现实时优化。此外,智能油田不是一个放之四海而皆准的解决方案,每种资源都有自己独特的特点,所用的智能适合程度也因此随着情况的不同有很大差别。

智能油田具备以下特点。

(1)智能油田是为企业实现全过程的油田管理和油田技术的综合性服务。

(2)智能油田运用智能化信息技术对实时优化和动态诊断提供技术支持,对智能井进行数据采集、反复循环和数据处理,快速确定经济有效的开发方案,实现作业过程最大化价值,大大降低勘探开发过程中的不确定因素和风险。

(3)智能油田是一项庞大的系统工程,必须探索新的合作模式,不仅要联合本行业,还要紧密联系相关高新技术行业,共同开发油气田智能技术,实现对油气田的实时监测、优化和调控。

(4)建设智能油田必须有一个整体设计,从勘探钻井阶段到开发过程的采油阶段,有序完成建设,不断优化其作业过程,为企业获得高额利润。

(5)智能油田的发展将会是不断创新、发展与升级的过程,我国石油公司应全面规划、尽早实施。

促进智能油田发展的关键技术主要有如下几点。

(1)遥测技术,主要包括四维地震监测、重力测量、电磁监测、永久型地面检波器网络和永久型光纤井下检波器等。

(2)可视化技术,包括综合勘探与生产数据的三维可视技术、虚拟现实技术等。

(3)智能钻井与完井技术。

(4)自动控制技术。

(5)数据集成、管理与挖掘技术。

(6)集成管理体系等。

1.2 智能油田的优势

与传统的油气田开发流程相比,智能油田有以下优势。

1) 远程协助操作

智能油田能够从远程端口收集更多的优质数据,将部分作业任务转移到远程操作,从而更有效安全地处理并执行。远程协助系统是通过一个办公资产管理协作系统实现操控管理,这种管理模式能够为油田作业提供实时信息,与远程业务团队互动,减少决策时间。此外,部分生产任务转移远离生产环境也将会减少人员意外事件发生的概率,提供更好的工作环境与安全保障。

2) 实时监测

通过智能井等设备能够实时监测油田生产数据,预防发生意外情况。当出现异常情况时,可以迅速通知作业团队和工程管理人员,尽量降低损失,这种监测尤其适用于海上、沙漠等偏远地区油田,要求长时间全天候对油水井、海底和表面等设备进行监控。

3) 协同工作环境

协同工作环境在智能油田管理中扮演重要的角色,它把许多不同的小组联合成一个高凝聚力的团队。一般来说,协同的工作环境能够有助于多学科、多领域的协同工作,以便更快更好地决策。其形式包括视频会议及远程通话系统等,能够帮助整个团队实现实时资源与信息共享,提高工作效率。

4) 有效信息管理和工作流程

信息管理和工作流程开发团队能够为智能油田管理提供一系列工具软件,覆盖信息管理、协同工作、不确定性管理、信息捕集和再利用等领域,共同确保数据信息的使用和快速有效地制定决策,从而让团队成员工作更加高效。

1.3 智能油田开发的理念

智能油田开发包含三个实时的概念:①实时监测——实时采集井下油藏数据,并对数据进行处理分析;②实时优化——根据采集到的数据,利用优化算法和油藏数模技术,自动拟合生产历史修整地质模型,并预测最优开发方案;③实时调控——通过开/关式节流阀或可调式节流阀控制各个层位的流量,实施优化方案。该系统的原理如图 1-1 所示。

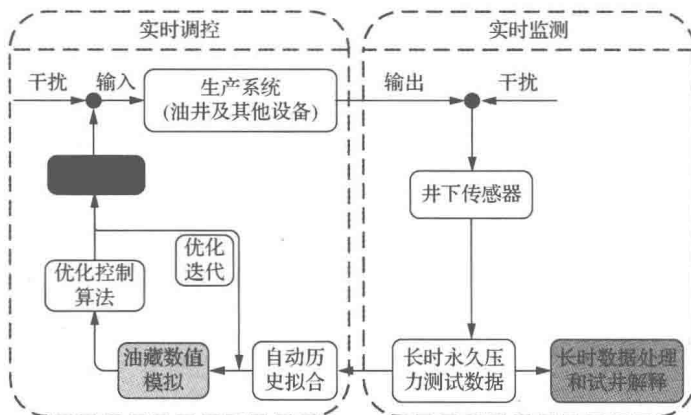


图 1-1 智能油田的闭环管理示意图

智能油田生产管理可以多方位地用于分层注采、井网优化、智能井调控和生产预警等多个领域。不但适用于陆上各大油田生产开发,而且对沙漠地区和海洋油气田的开发具有深远的意义,具有巨大的推广应用前景和发展空间。

参 考 文 献

- [1] 刘宇时. 当议采油工程新技术. 留学生, 2016, (3): 308.

第2章 智能井

为了解决常规油井生产技术中出现的问题并提高油藏的经营管理能力, 20 世纪 90 年代, 国外开展了智能完井(intelligent completion)技术的应用研究, 它是将国防和医学领域的微电子技术、传感器技术、自动控制技术与石油工业完井技术有机结合的高新技术。随着技术的不断完善和发展, 其功能不再仅局限于完井方面, 智能完井这个概念逐渐被智能井所替代(smart wells, 又叫 intelligent wells 或 i-wells)。智能井是智能油田的重要组成部分。

2.1 概 述

智能井技术, 简单地讲是一种利用放置在井下的永久性传感器实时采集井下设备的工况及生产层段的压力、温度、流量、组分等参数, 通过通信电缆/光缆将采集的信号传输到地面, 利用开发的软件平台对数据进行挖掘、分析和学习, 同时结合油藏自动历史拟合技术和油藏数值模拟预测技术, 形成油藏生产管理决策信息, 并通过控制系统反馈到井下对油层进行生产遥控, 随时重新配置井身结构和提高油井产状的生产技术^[1,2]。其目的是将层间隔离、流量控制、机械采油、永久性监测和出砂控制等安全可靠地综合起来。它可使经营者从地面实时对单井多层段油、气生产或多分支井中单分支井眼的油、气生产进行监测和控制。其主要作用是优化油井的生产, 在最大限度地降低作业费用与生产风险的同时, 最大限度提高油田的采收率, 降低生产成本, 加速资金流动。该技术的原理如图 2-1 所示。

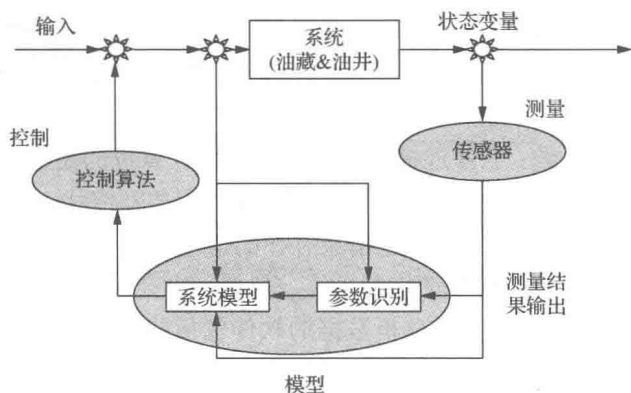


图 2-1 智能井技术系统原理

智能井技术包含两个实时概念: 实时监测(采集井下流动数据和/或油藏数据的能力)和实时控制(通过开/关式节流阀或者可调式节流阀遥控流量的能力)。因此, 采用智能井

技术的油田就构成了一个实时的注采管理网络。

智能井技术系统一般包括以下四个部分(图 2-2)。

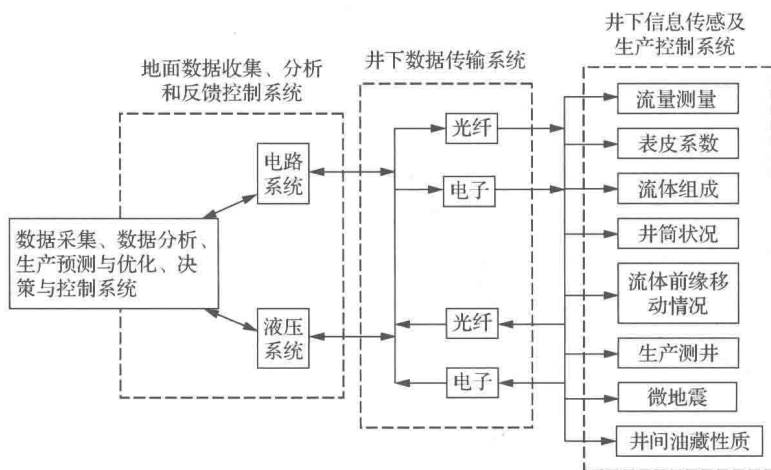


图 2-2 智能井技术系统构成和用途

(1) 井下信息收集传感系统：主要由永久安装在井下的间隔分布于整个井筒中的井下温度、压力、流量、位移、时间等传感器构成。其中多相流流量测量采用普通传感器，井下温度和压力的测量可采用石英传感器、光纤传感器，井筒和油藏中流体的黏度、组分、相对密度的测量采用微电子传感器。

(2) 井下生产控制系统：其操作方式目前主要有电缆操作和水力操作两种。该系统包括可遥控的井下封隔器与层间分隔器、可遥控的流入控制阀与井下节流阀、控制分支(分岔)井筒密封的开关装置、井下安全阀等。其中最简单的是井下节流阀，它可以调整油藏中各层段之间的产量，是最直接控制井下流量的工具。对产量的控制是通过利用液压、电动、电动-液压装置控制的流入控制阀。流入控制阀可以是一个二元的开/关系统，或是具有可调节(多位调节和精细调节)能力的遥控操作系统。过去由于工具的耐用性和高压等因素限制，使得液压控制占据了主导地位，目前一些公司已开发研制出全电子控制井下操作系统。

(3) 井下数据传输系统：它是连接井下工具与地面计算机的纽带，这种传输系统能将井下数据和控制信号，通过永久安装的井下电缆中专用的双绞线，在井下与地面间进行数据传输，即使传输的数据在有井下电潜泵存在的情况下，信号也不会受影响。

(4) 地面数据收集、分析和反馈控制系统：包括一台计算机和分析数据用的软件包。计算机用来收集和储存生产数据，分析数据的软件包帮助使用者对数据进行分析，有利于使用者做出最佳决策，从而更科学地管理油井，减少作业次数，优化生产过程。

2.2 智能井井下监测技术

智能井长期井下监测数据在油藏生产管理中具有非常重要的作用，它可以用于获取

油藏参数，监控油藏状况，制定开采计划及预测油井和油藏生产动态。由于井底或油藏压力的变化能够实时反映生产状况的变化(如关井、增产增注、减产减注、表皮变化、地层压实作用等)，所以将压力响应与油藏模型相匹配可以求得油藏参数。通过这些参数的获取和油藏模型的建立，就可应用于油藏的生产管理，进而推动向主动油藏管理的目标迈进^[3,4]。

目前，随着井下传感器技术的发展，井下监测的参数已经从压力、温度和流量监测逐渐扩大到含水、组分及井间(如地震)等参数的监测。特别是光纤技术的应用和发展，极大地推动了井下监测技术的进步。表 2-1 总结了目前井下传感器的主要测量参数情况。

表 2-1 井下传感器主要测量参数

测量参数	监测对象	作用
温度	产层处、整个井筒、泵进出口等	判定出液点、层间窜流、地下设备故障等
压力	井下控制阀进出口、产层处等	提供各产层能量信息、平衡层间关系等
流量	井下产液	提供产量信息、分析产能变化
电阻率	近套管地层	产层物性、产出液物性分析
振动	井下声信号	井间地震、四维地震、设备运行情况分析

用于上述参数测量的传感器大致可分为井内测量传感器和油藏成像传感器两大类。井下井内测量传感器监测井筒内的状态参数，如永久性井下压力/温度传感器、分布式光纤传感器和井下多相流量计等；而油藏成像传感器测量井筒附近流体分布变化，如四维地震、永久性地震检波器、主动和被动电测量和井中雷达等^[5]。

2.2.1 井下压力监测技术

目前，井下压力监测的技术主要有毛细管测压技术、井下电子压力计测压技术、电子共振膜测压技术及光纤压力监测技术。表 2-2 对各种压力测量技术进行了对比。

表 2-2 井下压力监测的传感器类型及性能对比

压力传感器类型	量程与精度	环境温度	稳定性及寿命	特点
毛细管式	约 60MPa, ≥0.1%	≤370℃	可靠性高, 寿命长	地面设施较多
电子式	约 100MPa, ≥0.01%	一般不大于 150℃	每年的零点漂移量约为 2%左右, 寿命一般不超过 5 年, 易受电磁干扰	成本低, 技术相对成熟
电振膜	约 100MPa, ≥0.01%	一般不大于 250℃	井下电子元器件少, 抗干扰能力较好, 寿命理论上超过 5 年	以数据处理方法解决干扰问题
光纤	约 100MPa, ≥0.01%	≤370℃	稳定, 理论寿命超过 15 年	井下无电子元器件, 抗干扰能力强, 可以进行分布式测量, 数据处理较复杂

2.2.2 温度测量技术

就传感器而言，传统地面温度传感器(包括热电阻、热电偶、半导体热敏元件等)都可应用于井下进行温度测量，但其存在的主要问题是电子器件的寿命、封装工艺和数据

传输技术,这也是所有井下传感器共同存在的问题。

在井下温度监测中,目前广泛采用的是 Raman 反向散射分布式温度传感技术^[6,7]。Raman 反向散射是光通过纤维时被纤维内的玻璃分子散射的一种现象。在散射过程中,能量在光与玻璃分子振动能之间转换,光线经历了频率加速(高能量)或频率减速(低能量)。散射光的频率加速或减速变换率随着玻璃温度的变化而变化。

分布式温度传感光纤监测技术代表了井下温度监测技术上的突破性进展。该系统采用一根或多根光纤封装成的光纤电缆,能使用户测得沿整个井筒的连续、实时的温度剖面。由于分布式温度传感光纤测量可以在整个井段内进行,因而可测量单层产液量,提高井下永久性监测的质量。通过分布式温度传感器测量可以识别出整个储层所有的产油层及各产层的产量。由于具有很长生产层段的油井越来越多,而且很多是大斜度井甚至是水平井,用生产测井仪进行测井作业成本很高,分布式温度传感测量是一种替代方法,传统的测温工具只能在给定时间内测量某个点的温度,要测试全范围的温度,点式传感器只能在井中来回移动才能得以实现,不可避免地对井内环境平衡造成影响。光纤分布式温度传感器的优势在于光纤无须在检测区域内来回移动,能保证井内的温度平衡状态不受影响,而且由于光纤被置于毛细钢管内,毛细管能通达的地方都可进行光纤分布式温度传感器测试。由于 DTS 系统能铺设在井筒中,记录下快速变化的温度数据,可以即时控制井筒条件,并立即得到全井筒温度剖面的快速成像图。广泛应用于井下监测的光纤传感器之一——Raman 反向散射分布式温度探测器,该探测器已经在测量井筒温度剖面(特别是在蒸汽驱井)中得到了广泛的应用。

2.2.3 多相流测量技术

井下流量测量是油藏描述的基础,根据一口井的生产剖面可解释生产层段和产量变化,利用储层的不稳定试井估算每个生产层的渗透率、压力和表皮因子,用注入剖面确定输入流体层段。井下流动测量还可探测与完井有关的问题,如固井质量及油管、套管和封隔器漏失等情况。除此之外,井下流量测量还可反映增产作业是否成功及确定合理的开采速度。传统的井下流量测量方法有示踪剂测量法、流量计测量法、电导式相关测量法、阻抗式相关测量法等^[8,9]。然而,大多数油井分层开采时,各层含水量不同,且有时流速较大,给利用常规生产测井设备测量和分析油井的生产状况带来了巨大的困难。液体在油管中的摩擦阻力和从油藏中向井筒内的喷射使压差密度仪器无法准确进行测量,电子探头更无法探测到液体中的小油气泡。这些测量方法已不能满足当今实时监测的需求。

随着光纤技术的发展,出现了新型的光纤流量测量技术^[10]。井下光纤流量计可以对流动液体进行两种基本测量,即体积流速和混合液体的声波速度测量。根据测量温度和压力下单相流体的密度和声波速度就可以确定两相系统中的某一相流体的流量。

2.2.4 物性(电阻率)测量

电极阵列技术已经广泛用于测井中,用以获取地层物性,达到分辨地层的目的。在智能井监测中,该技术可用于永久性的生产层产出液物性监测和水驱前缘移动分析。电