

姚 军 刘均荣 张 凯 编著

国外智能井技术



GUOWAI ZHINENGJING JISHU

石油工业出版社

国外智能井技术

姚 军 刘均荣 张 凯 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书分别从智能井技术概况、系统组成、技术标准、理论研究、现场应用和典型智能井系统等方面介绍了智能井技术特点、应用研究状况和国外先进的智能井系统。

本书可供从事石油行业的人员使用,还可供从事与油气开发、微电子技术、传感器技术、自动控制技术等密切相关的各领域人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

国外智能井技术 / 姚军, 刘均荣, 张凯编著.
北京: 石油工业出版社, 2011.1
ISBN 978-7-5021-8108-6

I . 国…
II . ①姚…②刘…③张…
III . 油气井
IV . TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 216960 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) 64523579 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18.75

字数: 475 千字

定价: 78.00 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

21 世纪早期,世界石油工业开发已步入中年时期,国内多数油气田已处于开发中后期,勘探开发目标已面向复杂地区、滩海及深海等难采难动用储量。此外,随着经济的高速增长,人们对石油资源的需求和消费也在逐渐增加。因此,国内外目前都面临着地下油气资源开发经济价值最优化和最大化的问题。如何进一步提高成熟油田和新油田的采收率和增加原油产量,如何进一步提高油藏在其生命期内的整体经营管理水平给石油工作者带来了新的巨大的挑战。

在油田开发过程中,面临着诸多的问题,其中之一就是油田尚未达到应有的开采程度就大量出水,因而不得不早早将油井关闭。为了获得更多的石油,只得动用修井设备,进行找水、堵水、封堵等费时费力的修井作业。而且所钻遇的油藏多数是非均质多个油层,相当多的油藏含有底水。因此,人们希望能有一套技术,可以同时开采多个油层,随时监测、报告井下各个层段或各分支井眼正在生产并流入井内的是什以及流量、压力、温度等参数的变化,以便人们能随时了解井下各产层的情况,调整和控制采油作业措施,关闭那些已不出油而仅仅出水的层段,容许产油层段继续出油的新技术。

在油藏动态监测方面,通常采用生产测井和试井等技术来收集油藏和油井井下信息。这些方法经常是针对某种情况或根据修井和井下干扰作业计划安排而采用的,作业时间可能不是诊断生产问题或油藏变化的最佳时机。偶尔进行井下测量很少能够在事件发生的时候将其检测到,因此经常无法描述生产特性。此外,定期监测技术涉及的生产作业成本和生产收入的损失可能非常高,尤其是海底设备的作业费用更是惊人。而在井中安装的永久性传感器能够连续不断地或根据需要提供数据,因而能够大大降低或消除为采集数据而发生的作业成本。通常在完井阶段安装的永久性传感器能够连续不断地向油藏和完井工程师提供包括压力、单点与连续分布的温度、流量、流相和井下泵工作状态等方面的数据。这些连续不断的监测结果可以增强各部门专家随时了解井下产状和及时决策的能力,并且还可以为后续布井计划提供指导。

在这样的背景下,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 年代国外专家提出了一种更为先进的、技术上更可靠的和无需实施修井作业的新技术——智能井技术 (smart wells, intelligent wells 或 i-wells)。它是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结果。该技术将油藏实时监测与控制技术结合在一起,为提高油藏经营管理水平提供了一条崭新的途径。

智能井技术是实现智能油田 (digital oil field, e-field, i-field, future of the field) 的主要构成部分,是近年来国际石油开采技术中最值得关注的一项高新技术。该技术自出现以来就得到了迅速发展和广泛关注。

目 录

1 智能井概述	(1)
1.1 定义	(1)
1.2 系统组成	(2)
1.3 系统分类	(3)
1.4 特点和优势	(6)
1.5 应用范围	(7)
1.6 关键技术	(18)
1.7 发展历程	(18)
1.8 面临的问题及发展趋势	(21)
2 智能井系统	(23)
2.1 井下监测系统	(23)
2.2 井下生产控制系统	(37)
2.3 井下数据传输系统	(43)
2.4 地面数据收集、分析和反馈系统	(44)
3 技术标准与可靠性	(56)
3.1 IWIS 标准	(56)
3.2 PRODML 标准	(60)
3.3 SIIS 标准	(63)
3.4 SEAFOM 标准	(66)
3.5 ICON 网络	(67)
3.6 智能井可靠性	(67)
4 理论研究现状	(70)
4.1 研究高校与机构	(70)
4.2 智能井优化技术	(77)
4.3 长期井下压力监测数据处理与解释方法	(81)
4.4 智能井适应油藏类型筛选方法	(90)
4.5 智能井价值评价方法	(92)
5 现场应用案例	(98)
5.1 墨西哥湾的首例智能完井系统	(98)
5.2 SACROC 单元 CO ₂ EOR 项目	(103)
5.3 Iron Duke 油田智能井技术应用	(104)
5.4 Oseberg Ost 油田光纤智能井技术	(106)
5.5 沙特阿美公司智能井系统应用	(107)
5.6 EY-D11 油田智能井系统应用	(108)
5.7 智能内部注气井	(109)

5.8 San Ardo 油田智能蒸汽驱井网试验	(110)
附录 A1 WellDynamics 公司 SmartWell® 技术	(111)
附录 A2 贝克石油工具公司 IWS 技术	(170)
附录 A3 威德福公司 Simple Intelligent™ 技术	(211)
附录 A4 斯伦贝谢公司 RMC 技术	(251)
参考文献	(277)

1 智能井概述

智能井技术是一项新兴的油藏 / 油井生产管理技术，是智能油田的重要组成部分。本章简要概述了智能井系统的组成部分以及分类方法，结合现场应用情况介绍了该技术的优势和应用范围，指出了在实际应用中存在的问题以及未来发展的趋势。

1.1 定义

智能井技术的定义和描述方法很多。简单地讲，它是一个实时注采管理网络，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以及生产层段的压力、温度、流量、组分等参数，通过通信电缆或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。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地对单井多层段油、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和在最大限度地降低作业费用与生产风险的同时最大程度地提高油田的采收率，降低生产成本，加速资金流动。

由此可以看出，智能井技术包含两个即时概念：(1) 实时监测——采集井下流动数据和（或）油藏数据的能力；(2) 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。该系统的原理如图 1.1 所示，其构成和用途如图 1.2 所示。

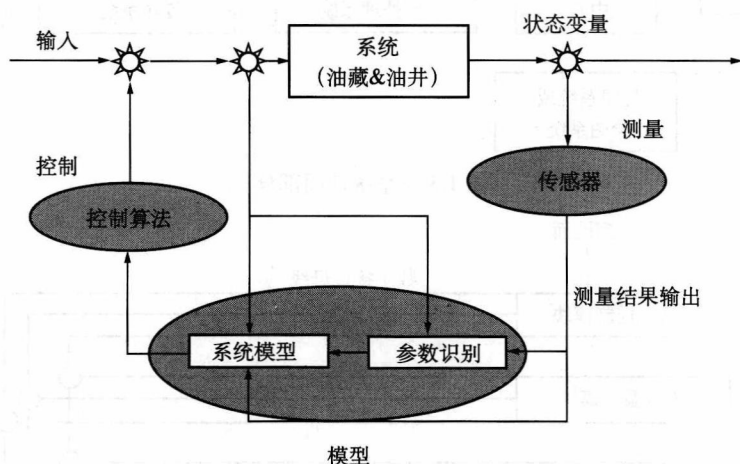


图 1.1 智能井技术系统原理

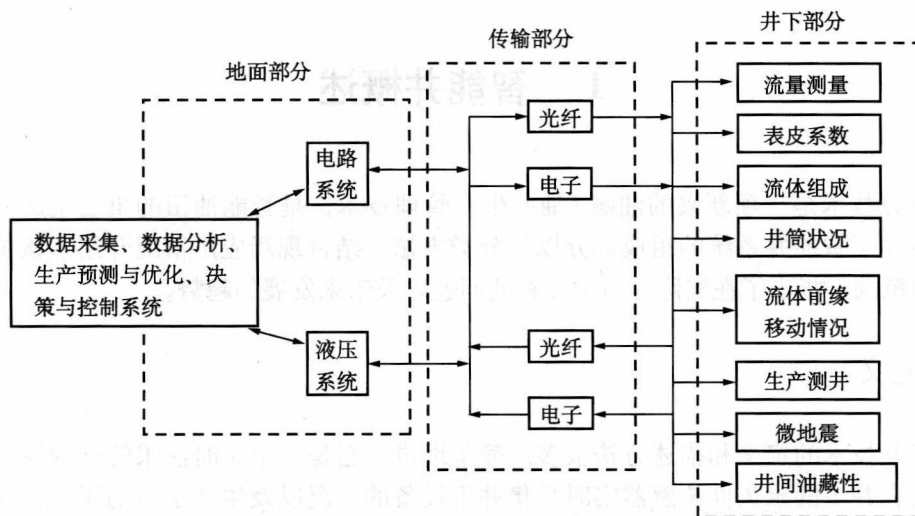


图 1.2 智能井技术系统构成和用途

1.2 系统组成

智能井系统一般包括以下几部分：井下信息收集传感系统，井下生产控制系统，井下数据传输系统，地面数据收集、分析和反馈系统。其地面部分和井下部分分别如图 1.3、图 1.4 所示。

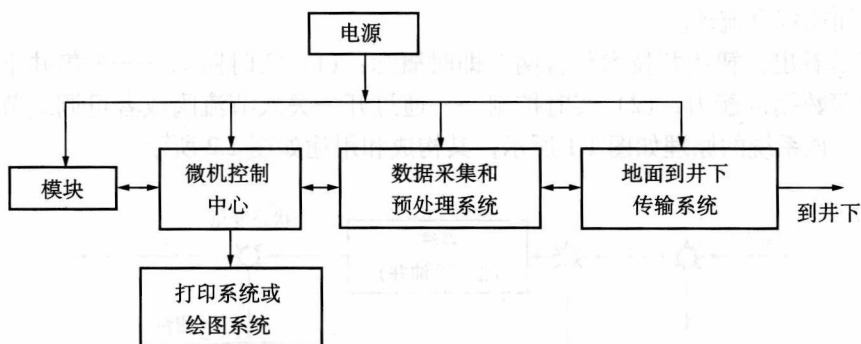


图 1.3 系统地面部分

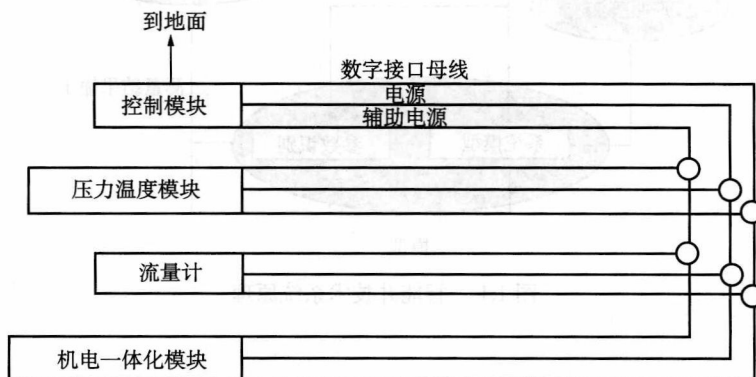


图 1.4 系统井下部分

(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、时间等传感器组构成，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，它可以在油藏中调整各层段之间的产量，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实现的。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：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，传输的数据即使在有井下电潜泵的情况下，信号也不会受影响。

(4) 地面数据收集、分析和反馈系统：包括一台计算机和分析数据用的软件包。计算机用来收集和存储生产数据；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。

1.3 系统分类

1998 年，英国壳牌公司的 Mathieson 根据智能井技术的功能，提出了分类体系。他认为，在系统层面上，该技术可被看作是一种优化油藏管理的过程控制。过程控制包括一个执行机构、一个监测机构以及一个解释传感器输入和调节执行机构所需的程序。据此，定义了如下三个部分。

- (1) 监测功能部分：任何监测完井、油井或油藏状况的井下传感器。
- (2) 调节功能部分：任何用于改变生产特征的井下设备。
- (3) 解释和处理功能部分：用于解释传感器数据和控制调节设备的基础设施或信息（指令）。

根据这三个系统层面的定义和相关功能，表 1.1～表 1.3 详细说明了智能井系统的分类情况。

表 1.1 监测功能部分

监 测	类 别	子 类 别
1	压力和温度监测	永久性井下仪表
		光纤油井监测
		低成本的 FBG 解决方案
2	流动测量	基于 PDG 系统的文丘里管
		文丘里管梯度仪（两相）

续表

监 测	类 别	子 类 别
2	流动测量	非插入式声波测量
		文丘里管与密度计
		流体图像与色谱成像
3	流体组分与流动	气组分
		水组分
		化学传感器, pH, p_{CO_2} , p_{H_2S} , 垢
		出砂探测
		多相流测量
4	油藏成像	套管电极
		井间或跨井地震
		无源微地震 (声波)
		油藏内部监测 (自激传感器)

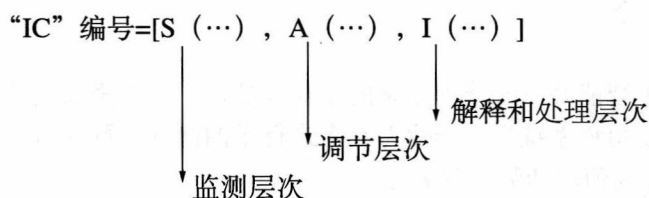
表 1.2 调节功能部分

调 节	类 别	子 类 别
1	辅助系统	化学剂注入
		气举
		ESP
2	分层流动切换	二元 (开 / 关) 滑套——液力
		二元 (开 / 关) 滑套——电子
		二元 (开 / 关) 滑套——电子或液力多站通信系统
3	分层流动调节	液力操作式的多位滑套、节流阀
		电子操作式的多位滑套、节流阀
4	分支流动控制与调节设备	液力操作式
		电子操作式
		智能射孔
5	井下生产工作站	井下油水分离
		井下气体压缩
		井下发电
		井下烃裂解

表 1.3 解释和处理功能部分

解释和处理	类别	子类别
1	τ_1 短期反馈	地面数据读出
		警报, 自动处理
2	τ_2 中期反馈	反馈与生产系统优化连接
3	τ_3 长期反馈	反馈与油藏模型连接

智能井系统的功能可以根据最基本的描述来定义, 其表示方法如下:



根据上述分类命名原则, 就可以描述不同的监测与控制类型。例如, 一个标准的石英压力和温度测试仪器和一个简单的压力和温度数据地面显示软件, 采用该命名原则可表示为 “IC” = [S1, I1]; 完井方式为两个远程控制滑套开关控制两个不同层位油藏进行生产, 在各层上均有压力和温度监测, 地面程序显示分层压力和温度并允许手动调节井下滑套开关的状态, 采用该命名原则可表示为 “IC” = [S1, A3, I1]。这种方法在某些情况下是有帮助的, 比如在油田开发方案中针对具体油井确定采用何种类型传感器的时候。

2003 年, 西安石油大学的肖述琴、屈展等对系统装置的类型进行了进一步的总结和分类。

1.3.1 短期装置

包括“一次激发”工具或作业周期有限的装置。多年来, 国外已经使用了大量的用于油井结构或完井安装工艺与方法的设计。但是, 它们都是传统的、应用先进的原理设计的液压操作工具, 从简单的剪切设计到能够多次进行压力循环的较复杂结构。近年来, 发明了更高级的系统, 提供了更多的选择性, 清除了渗漏通道, 并把完井施工中相应的钢丝绳作业减至最少次数。激励信号可以通过机械的、压力的、压力脉冲的、电磁的或其他方式提供。控制机构可以包括简单的机械、流体逻辑定时器或电子仪器。无论用什么控制方式, 这种短期装置由于安装费用少都能增加其应用价值。由于受其功率和机械性质的限制, 所有这种短期装置都不能应用到生产寿命较长的油井中。

1.3.2 长期装置

可以进行无限次数作业周期的装置, 这些类型的系统具有在一口油井生产寿命期间正常工作的能力。多年来, 仅有几种长期遥控装置得到了广泛的应用, 其中一种引人注目的装置是地面控制的井下安全阀。通过长期实践, 作业者们认识到了长期装置具有能够下入任何深度并能选择性驱动一种或多种工作方式的、不含“故障—保险”的流量控制装置的潜在优点。这些长期装置还可以减少安装成本, 并且能自始至终从各个独立产层进行选择性的生产并进行实时生产的调节, 减少作业成本, 提高油井产能并增加最终采收率。

1.3.3 整套集成装置

包括灵活可动的井下工具及一整套组装的传感器, 它填补了现场延长油井有效寿命的

油藏管理工具箱中的空白。地面控制油藏分析管理系统是一种为昂贵的水下和近海应用而开发的具有代表性的系统。这种系统可以按需要任意组装，以满足特定条件下的完井工作任务要求。该系统最重要的优点之一是具有长期的可靠性。这些系统可以与当前的水下控制系统配套工作，从而通过现有的地面网络获得井下信息。

1.3.4 单独分散的遥控系统

有些应用项目非常希望井下遥控，但是又不需要整个配套系统，例如，不需要某仪器或者减少所需装备数量和减少对功能的要求。单独分散的遥控工具能够以相对低的成本为这些项目服务。

1.4 特点和优势

迄今为止，采用智能井系统体现出来的主要好处是它能够降低采油修理干预成本。现场多年应用证明：采用该系统后，作业者无需进行采油修理干预便可以改变流动特性，从而有可能使油井的净现值增加数百万美元。

然而，只根据与采用修理干预方法对比情况来判断智能井系统的经济合理性是有局限性的。一些具体的实例说明，减少或者完全避免采油修理干预在智能井系统所创造的相对价值中所占的比例实际上还不到 20%。很显然，智能井技术的相对价值效果大大超过采油修理干预的成本，其真实的价值在于加快现金流转并提高最终采收率。

在世界上支持混采的地区，如果具备了管理两层和数层之间的压力的能力，作业者就可以加快资产回收的速度，提高油气产量。在通过从永久性监测系统获取的知识来做出更好的管理决策的基础上，把以往孤立的和废弃的油层进一步投入开采并且提高驱油效率，可以把可采储量提高 2% ~ 15%。

总的来看，智能井技术作为一项新型的油藏管理技术，与常规生产管理技术相比，其技术优势比较突出，主要表现在如下几个方面。

(1) 地面遥控功能：能够在地面上识别流入控制阀的位置，并能在地面上有选择地开关某一油层，从而实现在不关井的情况下进行井身结构重配。由于实时监测与控制系统具有地面遥控功能，便于管理，因此适用于偏远地区，也适用于难以管理的海上油田或沙漠油田，还适用于成熟油田开发。

(2) 实时监测功能：能够获得生产层实时井下信息，并将监测到的资料传输到地面的计算机中存储起来，测试的资料具有较强的连续性。由于监测资料是长期持续记录的，从而克服了不稳定试井分析所引起的模糊性和不确定性。同时，由于能够实时获得关键信息，因此最大限度地减小了测井工作量。

(3) 便于油藏管理：所获得的长期监测资料比传统的短期测试资料更广泛，提供的油藏信息量更多，非常有利于油藏工程师建模。监测的数据不但包括单井数据（压力、温度、流量、含水、黏度和组分），还包括井间数据（地震的、波动的、声波的），从而使信息类型不断地扩大，整个油藏信息的扩大将使先进的油藏管理向着精确的流体前缘图解和油藏描述方向发展，将来油藏可能会进入连续管理阶段。油藏使用该技术越多，被控制的部分越大，油藏获得的潜能就越大。因此，该技术适用于油藏结构复杂、具有较高不确定性、需要录取大量资料的井。

(4) 增加动用油气资产的可采储量，提高油田最终采收率：井下的流入控制阀可以对

不同层位有选择性地开关，从而实现从特定油层段采油的目的。井下的永久性传感器能够监测各油层油、气、水量，并能修正油井工作制度。当生产中出现水或气的锥进时，可通过调整层段流量（即关闭产水层或产气层，控制注水或注气等）来延缓水或气的锥进，从而加速生产，达到提高油田最终采收率的目的。因此，对于油层性质差距较大，需进行多层合采或合注的井或需控制水、气锥进的井可以采用该技术，从而实现提高油田最终采收率的目的。壳牌公司认为采用该技术可以实现的近期目标是：现有油田和新油田的产量可提高 10%，新油田的采收率至少可提高 5%。

(5) 控制不同层位的流量：智能井系统可使油、气从多个层段同时流出并在主井筒中混合，使油气以高的产量采出，各段的流量控制装置将全井筒的压力调节均衡，使各采油层段以各自的生产压差同时生产（出油），控制不同层位的流量，从而加速现金流动。

(6) 节约生产成本，最大限度地降低基建费用（CAPEX）和作业费用（OPEX）：智能井系统可以通过减少大量的井筒维修工作量，优选采油方式和工作制度以及提高最终采收率两个方面节约成本。一口采油井的日常维修管理费用是根据油井所处位置和完井类型而变化的。另一个要考虑的问题是修井所涉及的时间问题，例如一个经营者要检测油层水的突破情况，首先需要安排一个油井作业计划等待作业，这种取决于修井设备有效利用率的一次修井作业与可以实时地进行油井检测的智能井系统相比，常要花去数月时间。另外，油层供油半径得以改善，并有效利用地层能量，智能井系统能方便、适时地提高油层的总产量。

(7) 智能井系统能够通过控制油层的流动特性来恢复油层能量，确保井筒稳定性，延迟地层水侵入采油层段，增加油、气产量，提高油气采收率，优化油藏的管理。

(8) 由于消除了关井时横向流动所造成的影响，可以进行每个产层的压力升降分析，由于消除了多层合采混合流动分析所引起的误差，就更容易进行物质平衡计算且更加精确。

(9) 可以利用邻层气进行气举，从而提高枯竭层段的产量；通过遥控调节气举阀能够优化常规气举方法。在非均质或多层油藏的开发中，如果在注入井、生产井或两者都采用该工艺技术，可以提高注水与注气的效率。

(10) 采用该技术可以在少打井的情况下提高油气的开采量与采收率，利用井下传感器采集到的采油与油藏数据可提高油田经营者对油藏特性的认识并有助于加密井井位的确定与建井设计。

(11) 智能井技术能够使一口井起到多口井的作用，既可以对油藏的多层进行合采，对多分支井进行监测与控制，又可以在一口井上同时实现注入、观测与生产等多种功能。

1.5 应用范围

智能井系统特别适用于调整井和修井费用高的环境，包括海下油井、深水油井、远离无人操作的油井、沙漠油井等，可用于多分支井、水平延伸井等。

(1) 海上油井应用将集中体现在减少和最大限度地消除油井的采油维修工作上。对海下油井的井下流体和油层参数的监测，以及对油井产量或水井注入量的优选，控制功能将所需的油井修理工作减少至最低限度，降低生产成本。

(2) 在深水油井中采用该系统可减少设备和操作人员。采用该系统后，无需再用挠性管或钢丝绳起下检测工具，因而可将它们从采油平台上拆掉。另外，此系统具有远传功

能，而不需要在油井现场便可实现通信联络和控制油井生产，因此可大量减少现场操作人员。

(3) 多分支井也可从中获利。电子设备可精确地监测井下不同层段的压力并调控每个生产层段的生产压差，因而可使油层以最佳方式采油，同时也可使多分支井的各分支井同时采油。

(4) 水平延伸井应用此系统工艺技术，可使流量控制装置下入到比挠性油管更深的位置。

壳牌公司的 Carlos 根据文献报道，结合实例从另一个角度对智能井技术的适用范围进行了分析和总结。认为在下述情况下使用该技术能增加额外的商业开采价值。

1.5.1 多层油藏按序生产

油井通常穿透多个产油层。决策这些层采取合采还是按序开采方式受许多限制条件和油藏管理考虑的制约。当一次仅生产一层时（以典型的自下而上的顺序），在堵塞该层并射开位于上部的下一生产层段之前，要求将当前层段生产到经济极限状态下。这将形成一个接近最优状态的生产剖面，直到下一层段被射开。采用智能井技术将延长该层原油的生产时间而又不会损失储量。在水体不能提供足够压力保持的情况下，暂时关闭某一层段，隔一定时间后再重新打开投产将会增加该层的最终采收率。

北海 Term 油田提供了一个很好的按序生产的例子。常规做法是射开 Brent 地层（低于 Ness 和 Etive 地层）中产量最高的砂岩层，当水淹时关闭这些砂岩层，然后再射开 Triassic 地层（Broom、Rannoch 地层，位于 Ness Tarbet 地层上部）中的致密砂岩层。而采用智能井技术（远程流量控制技术）后，则能在很大程度上减少作业入井次数。最初射开油井所有砂岩层，无需为堵水和重新射孔作业而再次进入井筒。图 1.5 说明了远程切换生产层段带来的加速效应。

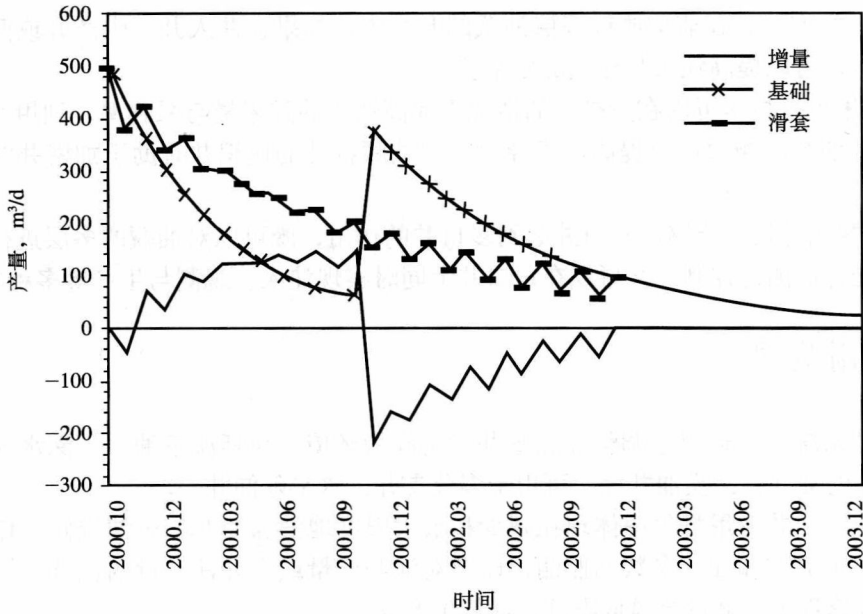


图 1.5 基础方案和智能井方案的模拟产量剖面

通过安装流入控制阀，将生产层位转换到 Brent 地层，使 Triassic 地层压力得以恢复，通过这种方式延缓了 Triassic 产层的产量递减过程。这种生产方式不仅加速了生产，而且与基础方案相比增加了 85000bbl 额外的风险产量。

1.5.2 多层合采

假如油管尺寸不再是流体流出的限制因素，并且压力不协调或化学性质不相容完全可排除在外，则从所有层段进行合采将充分发挥油井生产能力。如果压力不均衡状况能通过试采和（或）井下节流技术加以平衡，则对超高压层段也能进行合采。应用智能井技术控制不同流量和不同含水的各层段的流入量能够实现多层合采。

位于墨西哥湾 Na Kika 开发区块的 Fourier-3 井的模拟结果提供了合采优于按序开采的一个例子。在该井上安装了两个控制阀来控制一个底部层段（F8ra 上部和底部）和一个上部层段（F7.5）的生产。当某层段含水损害到地面净产油量时，使用开—关流入控制阀关闭该层。图 1.6 说明了合采和按序生产的产量预测结果。模拟结果显示 F-3 井合采后，产量增加了 28%。

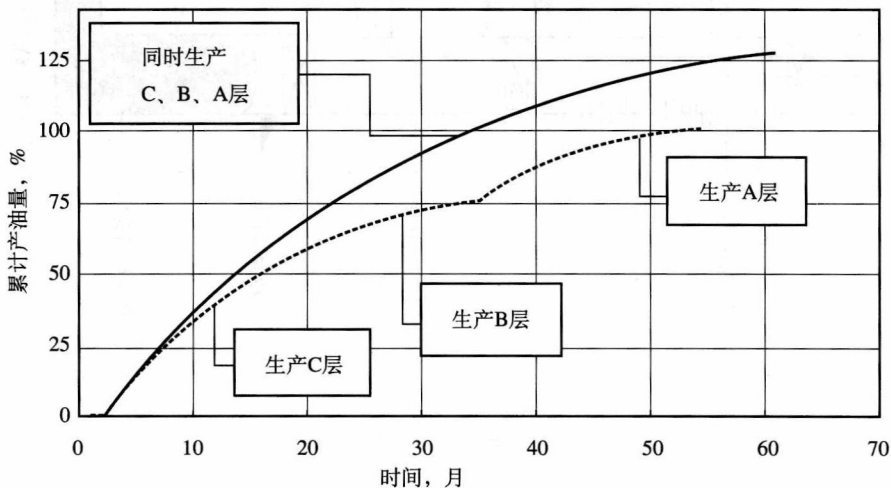


图 1.6 按序生产和合采的模拟预测结果

1.5.3 为驱替或增压而进行流体转移（回注）

当生产层段上部或下部有高压气层或水层时，则油井可将高压气层或水层的流体转移到生产层以维持生产层的生产。无控制“自流注水”技术已应用多年，该技术是将高压水层中采出的水注入到产油层。包括回注流体流量测量和控制的智能井技术拓宽了该技术的应用范围，并降低了该技术的风险。内部注气井的现场例子是 SW Ampa Block 11 油田的 SWA-85 井，该井由文莱壳牌石油公司（BSP）开发。完井设计将深部 AW/AX 油藏的气体注入到上覆 AV 油藏的气顶中，如图 1.7 所示。这个计划节省了在气源和注入设备方面的投资。完井方案（图 1.8）包括裸眼砾石充填、用于上部层段的流动控制阀、用于底部层段的防喷阀以及井下压力计。由于压力维持的结果，产量增加超过 2500bbl/d。

1.5.4 开采单独隔层中的油环

一口水平井位于（油水界面）（OWC）和（油气界面）（GOC）之间一个薄层油柱中，如果整个井段上的压降与跟部压降相当，则在跟部很容易出现早期水淹或气窜。发生气窜或水淹时，由于重力泄油成为主要泄油方式或者由于大量产水导致举升方式改变，产量将

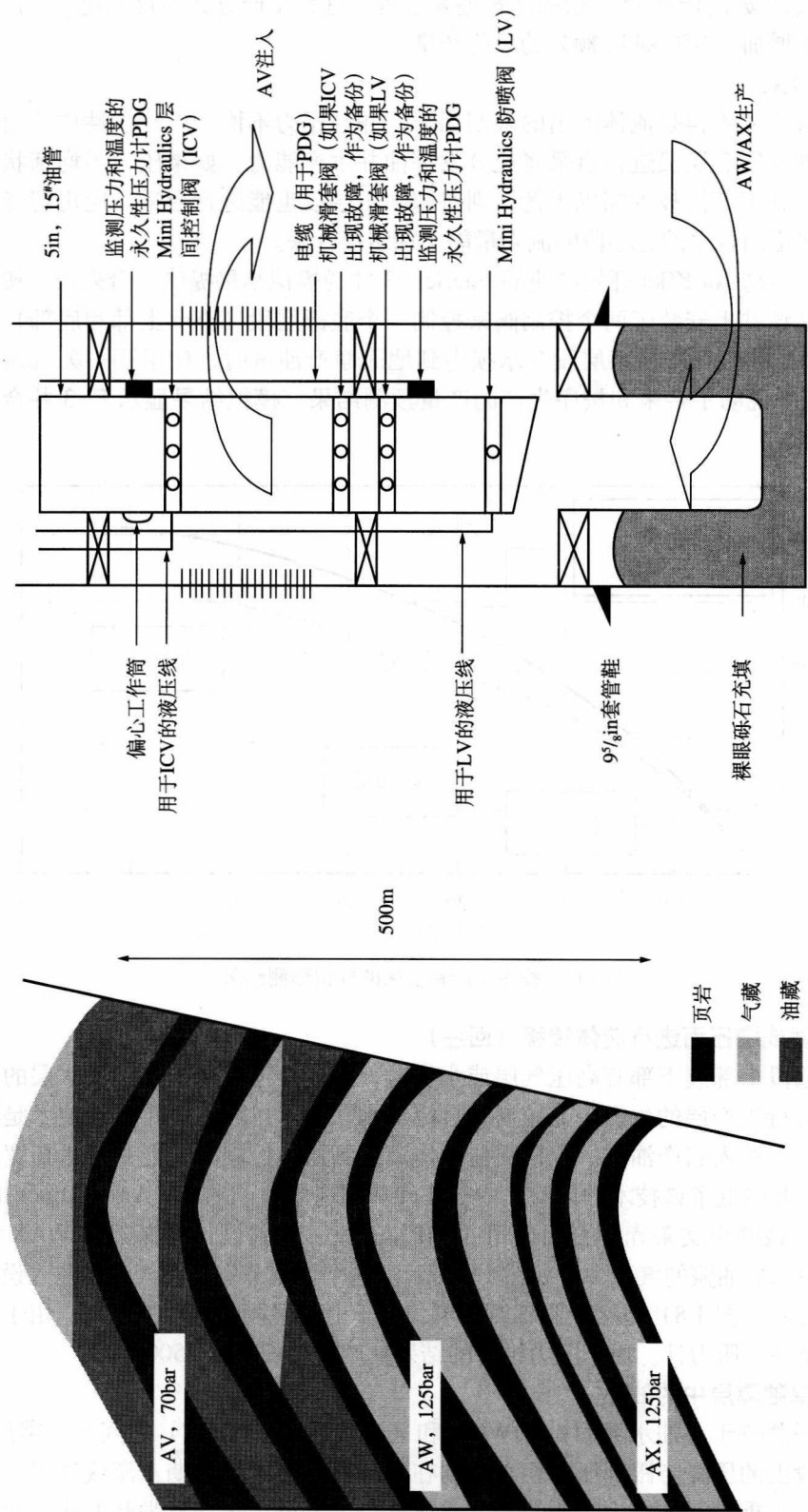


图 1.7 地层横截面示意图

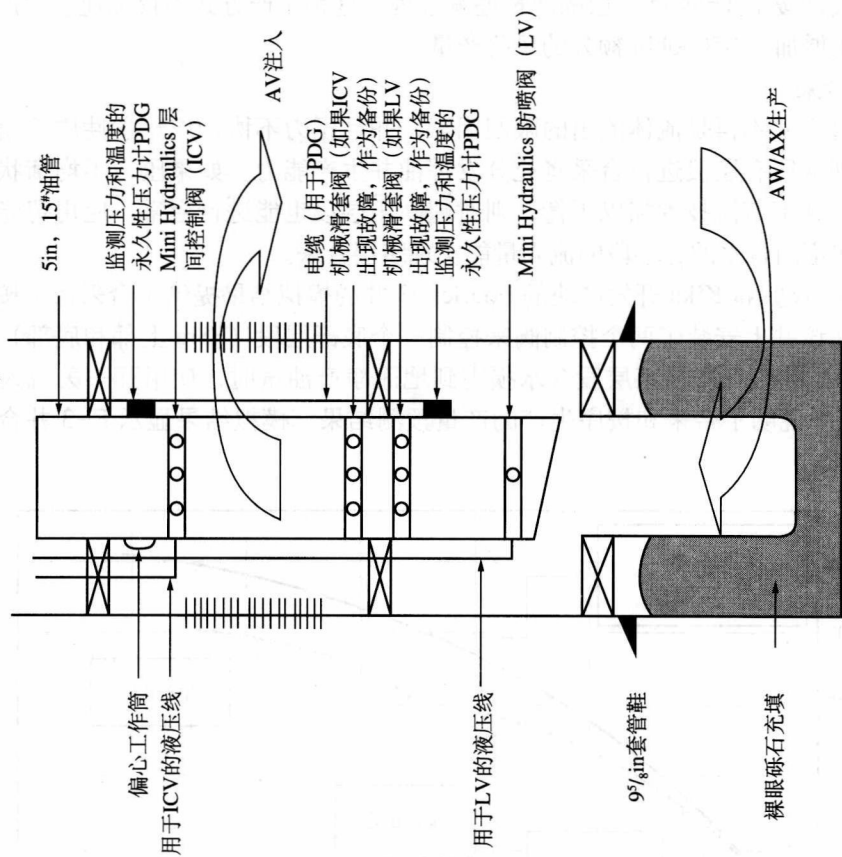


图 1.8 SW Ampa 油田内部注气井完井示意图

急剧下降。在大多数情况下，油井水平段长度与油环厚度之比相当大，在油井中的某个位置发生气窜后，关闭该生产点并将生产点转移到另一个位置，这种开采方式可将油井恢复到在溶解气油比条件下进行生产，同时在关闭位置处锥进的气体将逐渐退回到气顶中以重新驱替油柱。

这个理论被加蓬壳牌成功地应用于 Rabi 油田的油井中。他们在水平段中部使用尾管来提供一个生产点（泄油点），同时安装了一套钢丝操作的 SSD 装置来控制水平段跟部处的压降。

许多研究人员已经对这种想法进行了研究，提出用智能井技术来改变生产点位置，并使得流体分离后能回到各自的主相中去（将油藏作为一个分离器来使用）。

1.5.5 开采复杂隔层中的油环

跨越多个层段或断块的油井将从智能井技术中受益，利用该技术能控制不同层段的流入情况。沿层段分布的油藏性质差异越大（如接触位置、水体强度、气油比和岩石性质等），分段控制所能带来的商业价值也越大。

文莱壳牌石油公司从在 Iron Duke 油田上完钻的一口井中认识到了这种商业价值。图 1.9 为油井井身轨迹。该井跨越了两个断层中的五个层段，在这种情况下只有利用单井才能实现经济开采。

油井生产大约一年后，利用控制阀重新完井以控制具有不同油藏特征的五个层段的流入特性。数值模拟结果表明，无控制生产将是一个次优的生产动态，因为脱气层或水淹层成为生产的主控因素或者损害到从其他层段中采出原油。图 1.10 对比了该井

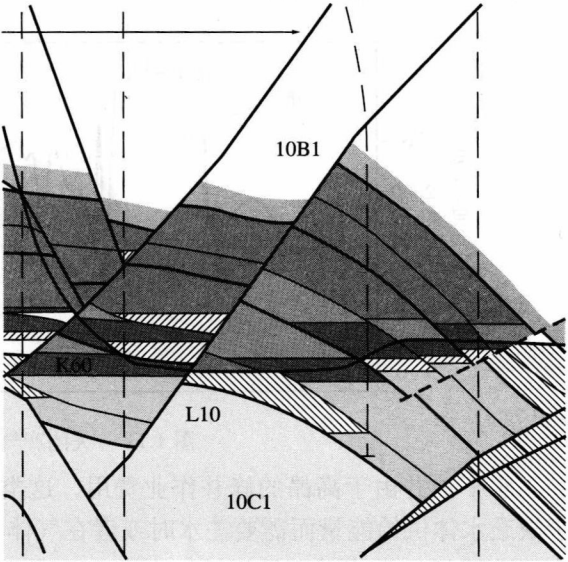


图 1.9 油井井身轨迹

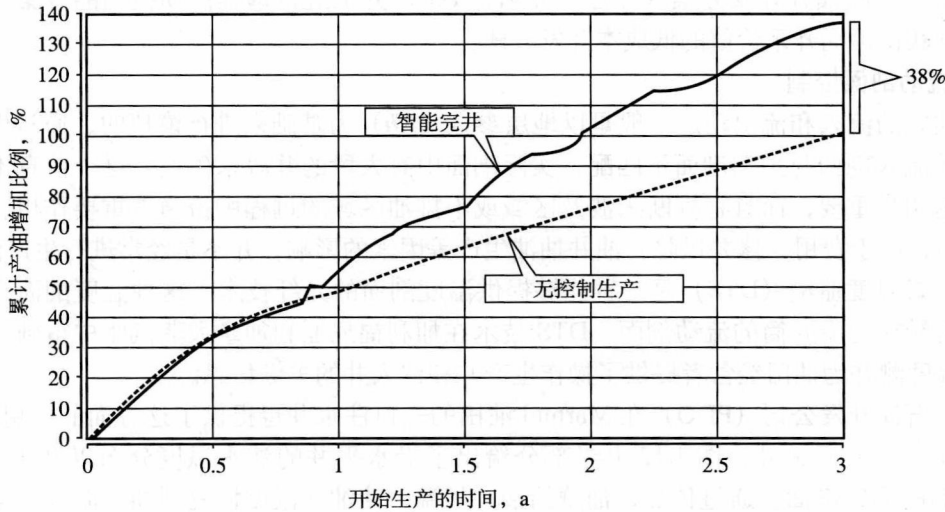


图 1.10 智能完井和无控制完井的产量预测结果