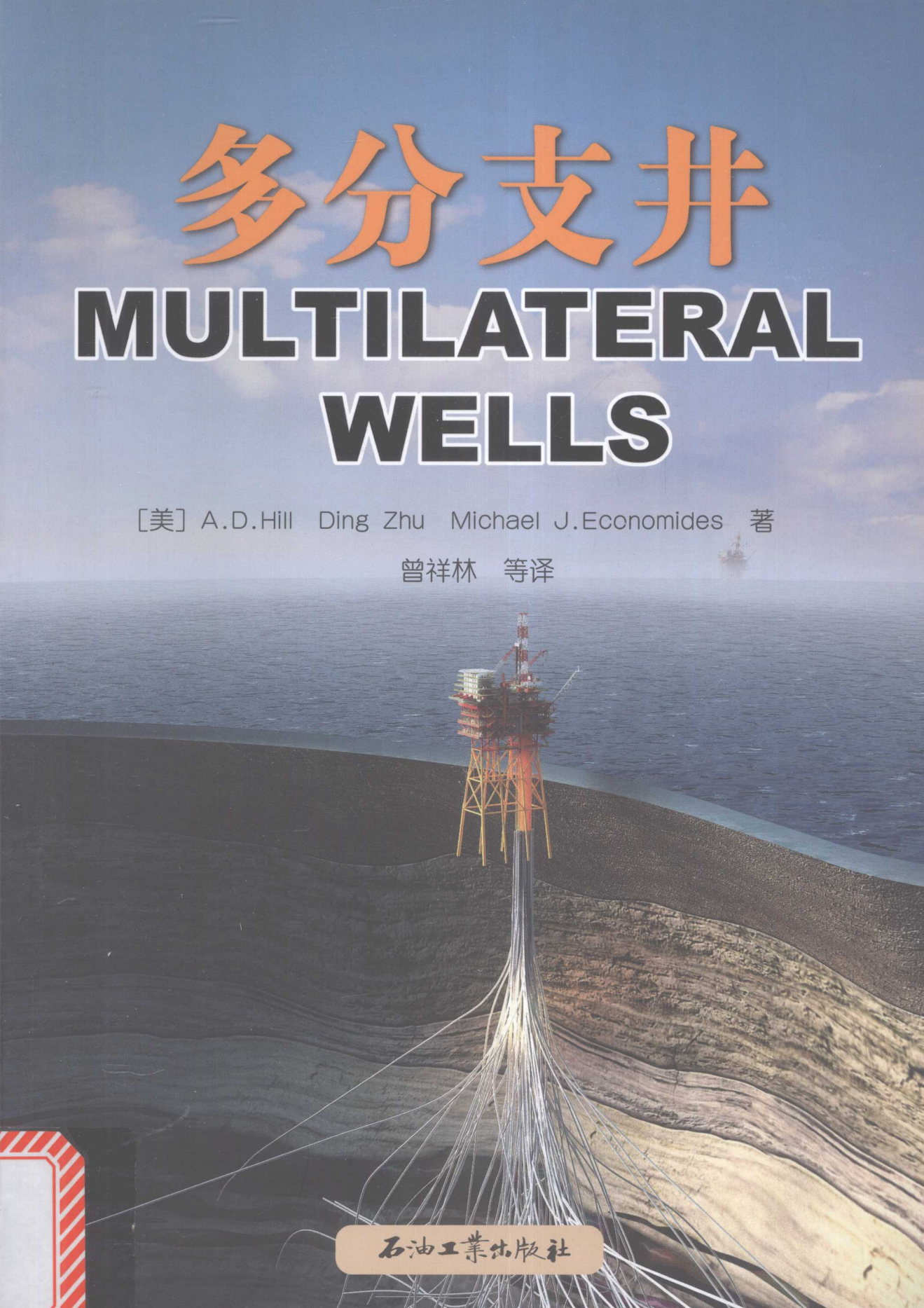


多分支井

MULTILATERAL WELLS

[美] A.D.Hill Ding Zhu Michael J.Economides 著

曾祥林 等译



石油工业出版社

多分支井

[美] A.D. Hill Ding Zhu Michael J. Economides 著

曾祥林 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是关于多分支井技术的基础读物,系统介绍了多分支井油藏描述、钻完井工艺技术及多分支井产能模型,通过现场应用实例阐述了多分支井增产的独特工艺。

本书是一本实用性很强的油气田开发技术参考书,可供油气田开发技术人员、钻完井工程人员及高等院校相关专业师生参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

多分支井 / (美) 希尔 (Hill, A.D.) 等著; 曾祥林等译.
北京: 石油工业出版社, 2015.1

书名原文: Multilateral Wells

ISBN 978-7-5021-9983-8

I. 多…

II. ①希…②曾…

III. 定向井 - 油气钻井

IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 306085 号

Multilateral Wells

A. D. Hill, Ding Zhu, and Michael J. Economides

Copyright © 2008 Society of Petroleum Engineers

All Rights Reserved. Translated from the English by the Petroleum Industry Press with permission of the Society of Petroleum Engineers. The Society of Petroleum Engineers is not responsible for, and does not certify, the accuracy of this translation.

本书经 Society of Petroleum Engineers 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社有限公司所有, 侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2001-0597

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

编辑部: (010) 64523544

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.5

字数: 290 千字

定价: 60.00 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

译者前言

多分支井技术是通过增大油气藏的泄油面积来提高油气井产量,以提高油气田开发经济效益的一项开发技术,是未来油气藏开发的主要发展方向之一。作为油气田开发、提高采收率日益成熟的先进技术,多分支井技术逐渐在国内外油田开发中得到推广应用,中国海洋石油总公司从2002年起开始尝试多分支井技术,首次在绥中36-1油田应用,并随后在渤海海域的南堡35-2、旅大5-2等10多个油田中进行应用,出现了若干口高产井甚至千吨井,显著提高了稠油油藏的单井产能,显示了良好的开发效果。

目前,国内多分支井技术研究方面虽然陆续见到相关文章发表,但这些文章大都是站在局部问题上进行的研究,没有对多分支井的技术体系进行系统论述。而A.D.Hill, Ding Zhu等编写的《Multilateral Wells》一书,详细介绍了多分支井技术的发展历程、适用的地质油藏环境、钻完井技术、生产动态预测、油田应用实例及经济评价等方面,是对多分支井技术的一个全面阐述,对多分支井技术在实际应用中具有重要的指导意义。该书是一本可读性很强的专业工具书,值得石油开发领域的科技工作者、工程技术人员及现场生产管理人员阅读。鉴于该书原版为英文书,为了方便大家进一步掌握书中的知识,专门组织相关研究人员对《Multilateral Wells》一书进行翻译出版,以飨读者。

本书共计9章,内容涉及多分支井应用的地质油藏研究、多分支井钻井技术、多分支井完井技术、多分支井生产动态研究、多分支井产能案例分析、多分支井增产技术、多分支井经济评价技术等,另外本书还单独拿出章节对多分支井智能完井技术做了相应的介绍,内容较为全面。参与本书翻译校对的相关人员分工如下:第1、第2章由曾祥林翻译,第3章由李汉兴翻译,第4章由房茂军翻译,第5章由梁丹翻译,第6章由王旭东翻译,第7章由刘长龙翻译,第8章由杨秀夫翻译,第9章由王旭东、陈冠中翻译。本书最后由曾祥林博士进行了全面的审校,中国海洋石油总公司副总工程师兼工程技术部总经理姜伟对全书进行了审读、定稿。

本书在翻译和出版过程中得到了中国海洋石油总公司科技发展部总经理孙福街,中海油研究总院钻完井总师周建良、开发总师张金庆、技术研发中心主任朱江以及中海油天津分公司副总经理刘良跃和工程技术部经理范白涛的大力支持和技术指导,石油工业出版社给予了无私的帮助,在此表示诚挚的谢意!

在翻译过程中,参与本书译校的人员尽可能尊重原著并注意国内习惯,采用通俗易懂的方式组织语言。当然,限于译校者的水平,难免有所疏忽,还望相关专家与同行不吝批评指正。

前言

在现代油气生产实践中，鲜有其他技术能够与多分支井充分地展示现代油气行业所面临的诸多复杂问题以及由这些复杂问题催生的技术革新方面相提并论。从油气井规划所需的三维地震模型技术，到油气井的独特钻完井实践，再到预测油气井产能的耦合油藏/井筒流动模型，这些复杂的油气井结构都在不断地扩展着石油工程技术的界线。多分支井通过井形成的网络与广布的油气藏大面积接触，因此与传统井相比，多分支井更需要进行油气藏与井筒流动之间的耦合。多分支井的相关文献迅速增加，这些文献记录了多分支井技术的各个方面，但是此类文献大多分散在石油工程的具体专业中。

编撰本书的目的是为了简明扼要地阐述多分支井的重要技术。希望本书可为意欲引进复杂油气井结构的工程师和地质学家提供有价值的参考。在本书编撰期间，我们试图全面地向读者提供可应用于水平井设计与分析的实用工具，同时给出了尽可能多的参考文献，以便广大读者进行更深入的研究。

在此，特向曾为多分支井技术做出过努力与贡献的诸多科学家和工程师致谢，本书中也摘录了他们的部分工作成果。同时向我们的学生表示感谢，感谢他们在文献梳理、范例计算以及在本书提出的方法的研发等方面所做的努力和贡献！

目 录

第1章 多分支井的目的和应用	1
1.1 多分支井的优点	1
1.2 多分支井的历史	2
1.3 协同技术	5
1.4 本书的主要内容	5
第2章 常规地质条件下复杂油气井结构的应用	6
2.1 概述	6
2.2 油井泄油体积的几何形态	6
2.2.1 无气顶或底水的均质厚油藏	6
2.2.2 有气顶或底水的均质厚油藏	7
2.2.3 层状油藏	7
2.2.4 薄夹层油藏	8
2.2.5 天然裂缝性油藏	8
2.2.6 注水开发天然裂缝性油藏	9
2.2.7 构造分割油藏	10
2.2.8 河道或辫状河道砂岩	10
2.2.9 “阁楼”式油藏	11
2.2.10 重油油藏	11
2.3 利用地震技术进行油藏描述和复杂井设计	12
第3章 多分支井钻井	15
3.1 从主井眼开钻分支井眼——侧钻	15
3.1.1 裸眼侧钻	15
3.1.2 套管井段侧钻	17
3.1.3 钻造斜段	20
3.2 钻分支井	20
3.2.1 地质导向技术	20
3.2.2 小井眼钻井	22
3.2.3 连续油管钻井	23
3.3 多分支井的井控	24

3.4 多分支井钻井案例	25
3.4.1 阿拉斯加北坡双分支井连续油管钻井	25
3.4.2 俄克拉何马短半径多分支井	26
3.4.3 委内瑞拉鱼骨形多分支井	28
第4章 多分支井完井	31
4.1 概述	31
4.2 多分支井完井设计考虑的因素	31
4.2.1 油藏结构	31
4.2.2 连接处地层特性	32
4.2.3 连接处压差	32
4.2.4 采油与注入管理	32
4.2.5 重入能力	32
4.3 连接分级	32
4.3.1 1级完井	33
4.3.2 2级完井	33
4.3.3 3级完井	34
4.3.4 4级完井	38
4.3.5 5级完井	39
4.3.6 6级完井	41
4.4 分支井完井	43
4.4.1 简介	43
4.4.2 水平分支井的完井效能	45
第5章 多分支井产能	59
5.1 概述	59
5.2 水平井油藏流入动态	59
5.2.1 水平井流入解析模型	60
5.2.2 适合水平流入的点源法	76
5.2.3 油藏模拟方法	78
5.3 井筒流动特性	78
5.3.1 分支井筒压降	78
5.3.2 造斜段和主井筒的压力剖面	85
5.4 多分支井产能分析模型	87
5.4.1 半解析模型	88
5.4.2 点源法	94
5.4.3 油藏模拟	96

5.5 多分支井井筒窜流	96
5.5.1 从下部分支井筒到上部分支井筒的窜流	97
5.5.2 较上部分支井筒向较下部分支井筒窜流	99
附录 A	100
附录 B 扩散方程的无量纲变换公式推导	101
附录 C 点源法 / 平面源法	103
第 6 章 多分支井产能案例分析	108
6.1 简介	108
6.2 应用多分支井以低成本动用储量	108
6.2.1 Prudhoe Bay 油田多分支井开发实例	108
6.2.2 北海泰恩油田多分支井开发实例	110
6.3 应用多分支井开采稠油	112
6.4 应用多分支井提高波及效率	113
6.4.1 阿曼 Sail Rawl 油田多分支井水驱	113
6.4.2 犹他州 Aneth 油田多分支井行列排状注采井网	116
6.5 应用多分支井以低成本动用储量	117
第 7 章 多分支井增产	121
7.1 概述	121
7.2 多分支井产能分析	121
7.2.1 多分支井试井	121
7.2.2 生产录井	123
7.3 多分支井增产措施	123
7.3.1 多分支井水力压裂	124
7.3.2 多分支井基质增产	133
第 8 章 智能完井	139
8.1 概述	139
8.2 智能完井设备	139
8.2.1 井下监测设备	139
8.2.2 光纤传感系统	140
8.2.3 井下流入控制	142
8.3 智能完井模型	143
8.3.1 流量分布的温度剖面数值模拟	143
8.3.2 水平分支井的温度剖面示例	146
8.4 智能完井的现场应用实例	148
8.4.1 北海海上油田	148

8.4.2 老油田.....	150
8.4.3 Wytch Farm 油田大位移水平井	151
第9章 多分支井的经济评价.....	153
9.1 概述	153
9.2 不同类型多分支井的成本	153
9.3 基本经济考虑	154
9.4 降低资本支出推动多分支井效益	159
9.5 增加储量提升多分支井价值	159
9.5.1 北海 Oseberg 油田	159
9.5.2 阿曼 Saih Ral 油田	160
9.5.3 犹他州东南部 Aneth 油田	160
9.6 实物期权估值	160
参考文献.....	163

第 1 章 多分支井的目的和应用

1.1 多分支井的优点

油气井的目的已不仅仅是进入油气储层，这个目标已经确立了一个多世纪，目前油气井在技术上更进步，目的性更强。在过去的 20 年中，从最初的水平井到最后的多分支井的迅速演变进步，油气藏与油气井接触面积以从未有过的数量级急剧增加。多分支井实现了上述的两项任务，即进入储层和增加与油气藏有效接触面积。

通过多分支井进入目标储层有几个明显的例子。可以钻多分支井，从不连续的储层流动单元中泄油，特别是在不具备单井开发条件的流动单元中。这些单元结构包括透镜状砂岩或辫状河道，其油气藏呈区域分散状态，而且层状油气藏有纵向非连续结构。

接触面积也很重要。低流量油藏，即低渗透率或含有高黏流体的油藏，更容易通过增大油井—油藏接触面积受益。此类油气藏包括致密油气储层或稠油油藏。

多分支井的所有应用都受到严格经济条件的限制；而且与常规技术一样，当普遍考虑生产的经济因素时，油气井建设成本就变得极具地域性并因开发地域不同而大幅变化。因此，世界上某个石油区块可能具有经济效益的油气井结构未必在其他地方具有同样的经济效益。我们在第 2 章和第 9 章中对以上问题进行详述。

当然，多分支井还有其他更加复杂或独特的应用。以下这些简单的案例说明了利用多分支井比单分支井更能够提高油气藏开采策略的效益：

与薄油藏中的垂直井相比水平井更具吸引力，无论垂直—水平渗透率各向异性如何。当油气储层厚度增加，储层纵向连通不佳时，水平井的经济效益也随之下降。但是，叠加式多分支井，即在厚油藏中以一定间距从一条分支井上钻出多口分支井眼，可形成临时的纵向不渗透边界，大大提高生产率，从而使厚油藏的经济效益变得极大。

同时，即使在最佳案例中，水平井的产量也不会仅仅因为水平井段设计长度的增加而增加，尽管从逻辑上讲，井段越长产量就应该越高。造成这一现象的原因包括：流体从油井边缘以不同比例流入；油井自身压降（是长度的函数）的负面效应；分支井更可能具有非均质性。因此，以两口方向相反的分支井为例，各口分支井井眼均为中等长度；与长度等于或大于两口反向分支井眼总长的水平井单井相比，在多数情况下这种反向双分支井的产量至少会高出 50%。

在区域各向异性油藏中，水平井的方向十分重要。在天然裂缝性地层中钻井一般不成问题。但是渗透率各向异性始终存在，而且在构造活跃区域尤其明显。方向不合理的油气井产量明显低于优选定向的油气井，因此定向不当的风险很大。各分支井眼间隔 90° 钻进可大大降低该风险。

为帮助理解本书使用的术语和专用名词，图 1.1 和图 1.2 中介绍了一些常见的多分支井结构（Chambers 1998a）。两个图表内容都很清楚，建议读者熟悉这些术语。

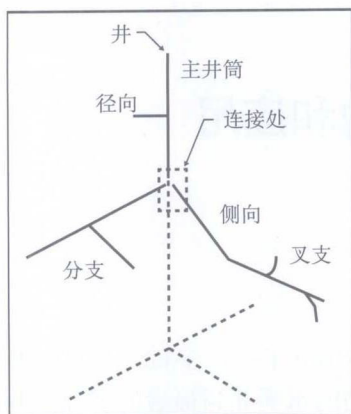


图 1.1 多分支井几何形态

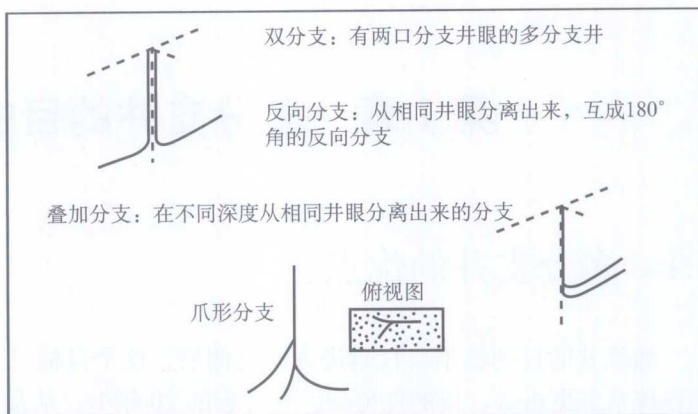


图 1.2 多分支井的常见类型

1.2 多分支井的历史

表 1.1 中列举了多分支井发展历史中的一些重要里程碑，记录的首例是 1953 年在原苏联巴什基尔地区完成的第一口多分支井。这口井相对较浅，在 375m（约合 1200ft）以下侧钻形成分支，但是该井结构十分复杂，共有 10 口分支井眼。图 1.3 和图 1.4 是这口井的侧面图和平面图。原苏联一直是多分支井的唯一技术王国，直至 1984 年在法国 Eschau 完成了一口多分支井（水平井出现几年后，水平井最初也是苏联人的发明）。

20 世纪 80 年代中到 90 年代末基本上是国际石油工业的萧条期，致使新技术的引进步伐放缓。首先是 20 世纪 80 年代中期的油价崩溃，接下来是苏联解体和与之伴随的石油工业解体，然后是 20 世纪 90 年代初发生的海湾战争，最终到 20 世纪 90 年代末的亚洲金融危机，一系列的事件加速了油价的又一次崩溃。这些混乱事件大大延误了多分支井钻井技术发展。

表 1.1 多分支井技术的里程碑

年份	作业方	油田	类型	里程碑
1953		Bashkiria (俄罗斯)	海上	
1957		Borislavneft (乌克兰)	海上	
20 世纪 50 年代		Chernomorneft (俄罗斯)	海上	
1968		Markova (东西伯利亚)	海上	
1984	Elf Aquitaine	Eschau (法国)	海上	
1988		Louisiana (美国)	海上	1 口水平井眼钻出 10 口分支井眼
1989	Arabian Oil Co.	Khafji (沙特阿拉伯)	海上	
1992	Maersk	Kraka (丹麦)	海上	北海首例

续表

年份	作业方	油田	类型	里程碑
1993	ADCO	阿布扎比	海上	
1993	Texaco	Austin Chalk (美国)	海上	
1993	Unocal	Dos Cuadras (美国)	海上	
1993	Maersk	Dan (丹麦)	海上	
1994	Mobil	Galahad (英国)	海上	英国大陆架首例
1995	Phillips	Alison (英国)	海上	英国大陆架首例三分支 / 四分支井
1996	Petronas	Bokor (马来西亚)	海上	亚洲首例三分支井
1996	Norsk Hydro	Oseberg (挪威)	海上	首例五级完井安装
1997	PDO	Shuaiba (阿曼)	海上	双分支 / 三分支井纪录
2000	Petrozuata	委内瑞拉	海上	长分支和二级分支
2002	CNPC	中国南海	海上	中国首例六级分支井完井

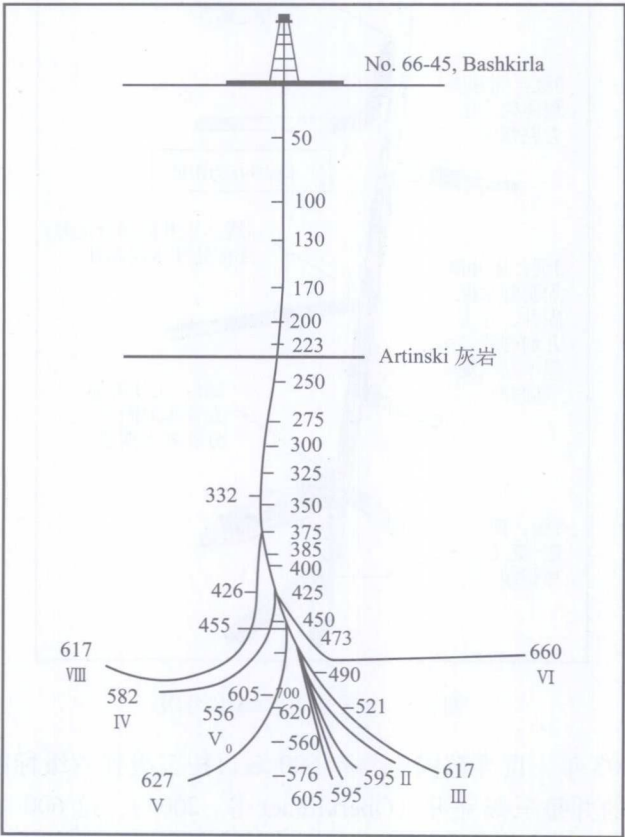


图 1.3 俄罗斯巴什基尔第一口多分支井

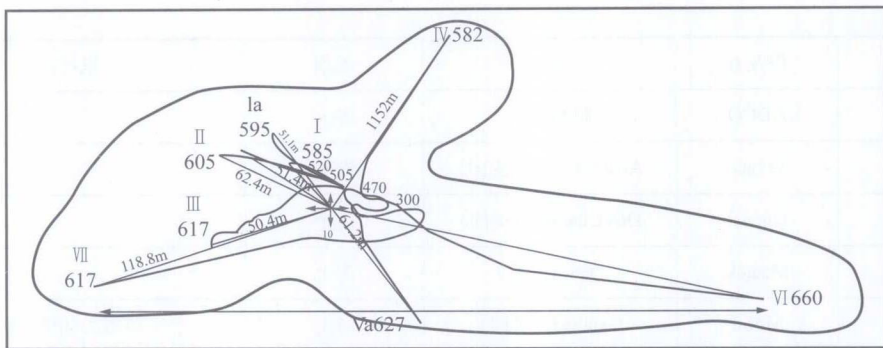


图 1.4 俄罗斯巴什基尔第一口多分支井平面图

1997—1998 年间发生了一个重要技术事件，多分支井技术进步 (TAML) 行业联合组织确立了多分支井的术语命名法，此命名法日后成为行业标准。TAML 分级标准主要是针对分支井与垂直或水平二级分支井眼的连接问题。图 1.5 显示了根据 TAML 标准对多分支井进行分级的情况，从一级（最简单的裸眼连接完井）到六级（连接处具有完全液压完整性的最复杂完井）。六级多分支井完井结构将在第 4 章中详述。

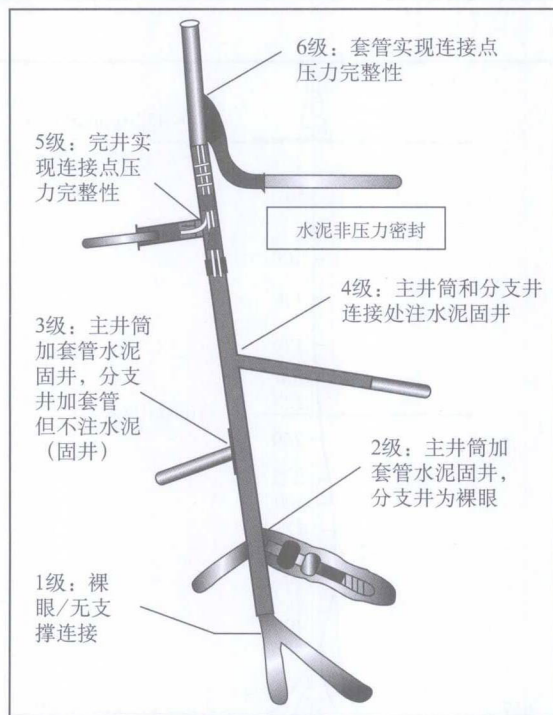


图 1.5 多分支井 TAML 分级

从 1994 年到 2003 年，世界范围内共有 600 多口按三级到六级标准安装完井的多分支井，其中超过 50% 的井是三级完井 (Oberkircher 等, 2003)。这 600 多口井中，约有 76% 为陆地多分支井，20% 为海上多分支井，还有 4% 属于深水应用。大多数多分支井属于较简单的一级或二级井，各分支井均采用裸眼完井，或者下入割缝衬管或射孔尾管，不注水

泥固井。已有成千上万的类似多分支井完成了钻完井作业。

1.3 协同技术

长期以来，多分支井得到了一系列的技术支持，而多分支井技术的大量应用又反过来催生和进一步发展了其他技术。毫无疑问，现代地层特性研究和地层特性改造技术（包括地震勘测和解释）使锁定未泄油的目标储层变得更加简单，也为选择多分支井类型提供了指导。

定向钻井、随钻测井和录井（分别为 MWD 和 LWD）、磨铣和侧钻以及石油工程和地质导向等全新领域的技术改良，有力地推进了多分支井的演变和成熟。现代司钻的一个典型的口头禅是：“只要你能绘图（井），我就能钻井。”多分支井开创了自身独特的完井技术，特别是井眼连接技术。十年之间，多分支井在液压和机械完整性方面已得到大大改善。

更重要的是，各种复杂井结构和多分支井几何学为油藏开采策略带来了新的可能性。近来，已经通过井下监测和调整井下流动条件强化了智能完井技术在多分支井的应用。这些技术可对不同油藏圈闭空间或储层内的流体进行调节控制，通过一口多分支井进行高效开采。

1.4 本书的主要内容

本书是关于多分支井技术的基础读物。第 2 章指出了对多分支井应用具有指导意义的油藏地质问题，强调多分支井在复杂地质条件下的不同应用。第 3 章描述了多分支钻井技术以及连接处侧钻开窗。第 4 章介绍了多分支井的 TAML 分级标准以及多分支井的各级完井过程，并讨论了完井工艺对油气井性能的影响以及水平分支井眼的常用完井方案。第 5 章深入讨论了多种用于预测多分支井产能的模型，包括水平分支井流入动态的解析模型以及研究水平分支井压力和流量分布的分段模型，此外还介绍了多分支井产能以及多分支井的油藏增产措施。第 6 章提出了多分支井技术的现场应用示例。第 7 章总结了多分支井产能评估所运用的试井和诊断方法，描述了多分支井的独特增产工艺。第 8 章阐述了智能完井的现状，展示了如何利用智能技术实现多分支井的效益最大化。最后，第 9 章讨论了多分支井的经济评估和风险分析。

第2章 常规地质条件下复杂油气井结构的应用

2.1 概述

在石油工业的早期历史中，所有的井都是直井，人们对井下地质情况了解甚少，直到钻进地层并进行了录井和取心作业。在那个年代是否能钻到目的层全靠运气，在这样的心理作用下，石油行业 10 口井中能有一口井获得商业成功就已经是一件令人满足的事情了。

现代地震解释技术带来了革命性变革，即使在开始钻井之前也可能获取地质信息和情况。如今，7 口开发井中仅有一口为干井眼；而且可以使用提前获得的地震数据解释结果或者随钻获取的地震和录井数据来引导钻井作业。地震数据可为井眼轨迹设计提供构造和地层解释支持，井眼轨迹可包括一口或多口直井、斜井或水平分支井。

现代地震和地质解释为复杂油气井结构的发展提供了动力。很明显，井的结构（不管是直井、裂缝发育的直井、水平井单井，还是诸如多分支井、多二级分支井或叠加式多分支井等复杂结构）都必须与以下方面相匹配：地质条件、预期泄油体积的形状以及许多其他的地层特性，包括地应力和渗透率各向异性以及地质不连续带（例如断层）的位置。这些因素在实际中影响油气井寿命期内的各个方面，包括采油指数以及油井的储层气水控制。

2.2 油井泄油体积的几何形态

油藏构造和油藏中驻留的流体是决定油井结构、井眼轨迹和完井策略的重要因素。油气藏的非均质性和各向异性也对此起着决定作用。在考虑选择采用常规直井、水平井或多分支井开发油藏时，油气井泄油体积的几何形态是一项决定性因素。下面各部分介绍了常见的油藏几何形态以及相对应的适应井结构。

2.2.1 无气顶或底水的均质厚油藏

对于均质油藏来说，极限流度条件可能有利于垂直井压裂开发，而中等流度条件下更有利于采用常规的、成本便宜的垂直井完井。如果垂直渗透率和水平渗透率比值不是太小，斜井的成本效率可能比水力压裂或水平井的成本效益更高。在厚油藏中，沿水平井眼形成的压裂缝隙可以弥补低渗透率引起的产量下降。

对于厚度等于或超过 150ft 的地层，如果地层的垂直渗透率与水平渗透率比值小于或等于 0.1，通过简单的计算可以发现，水平井单井并不是特别合适的开发井选型；建议采用多分支井结构，分段开发地层。例如，在一个厚 500ft、垂向渗透率与横向渗透率之比为 0.08 及 $K_H/\mu = 1\text{mD}/\text{cP}$ 油层中，一口 3000ft 长的水平井的生产指数为 $0.84\text{bbl}/(\text{d} \cdot \text{psi})$ 。如果该地层钻一口垂直等距离的四分支水平井，生产指数为 $2.5\text{bbl}/(\text{d} \cdot \text{psi})$ ，是单井结构的 3 倍。

这样,采用简单的稳态水平井流量计算方法(见第5章),可以对不同井身结构的产能进行快速、直观的比较。

2.2.2 有气顶或底水的均质厚油藏

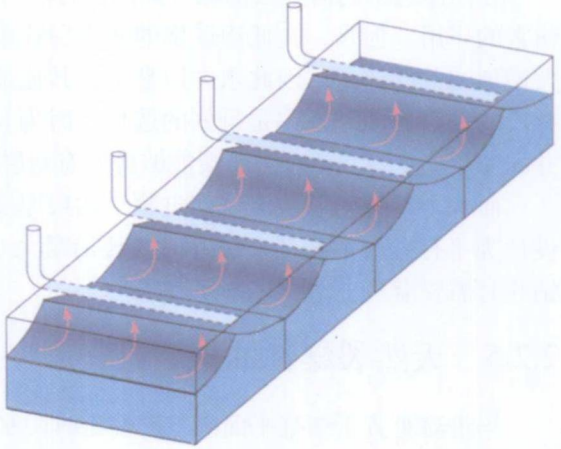
有气顶或底水的油藏开发时会遇到一些特殊的问题。利用直井进行开发时,为了延缓底水锥进,一个普遍的原则是在油层段的高部位附近进行射孔。但是由径向流造成的压力梯度通常很大,引起底水向上运移形成压降漏斗。一旦底水到达射孔孔眼底部,因为水的流动性比原油大很多(由于原油的黏度高),所以水被优先采出来,并且(或者)由于强的底水驱动,认为有充足的能量来支持底水产出。一旦出现底水锥进,会进一步使水锥上升,剩余可采原油的含水率越来越高,并且有可能迫使油井生产进入末期开发类型。为了采出剩余的原油,采取的一个措施是对水锥上部的井段进行回填并重新射孔;另外一个措施是对射孔孔眼以下的井段径向注入凝胶。这样可以延缓或避免水锥,水锥的状态在某种程度上就被加宽了,从而使更多的剩余油被驱替流向射孔孔眼。

在油藏的底水之上、靠近含油地带上部的位置钻水平井,在水平段会产生压降梯度,导致底水向上抬升形成水脊。水脊中的水将优先驱替水脊通道中的原油,根据流动几何学可知,水平井比直径相同的直井的原油采收率要大。从采出油量与水平分支井的空间展部关系来看,这种钻井方式是一种能很好地避免因油水同层、油层厚度及垂向与纵向渗透率的各向异性对开发造成的影响。对分支位于油层顶部、并且每两个分支之间是同样半空间展部的水平井来说(Ehlig-Economides 等, 1996a, 1996b):

$$X_{c,opt} = H \sqrt{\frac{K_H}{K_V}} \quad (2.1)$$

假定水脊为活塞驱替,水体突破时,油藏的波及系数为 $\pi/6 = 0.5236$ 。如果从一个主干井眼往外打分支井,这样理想的井间距离能进一步缩小。这一几何分布适合多分支井结构,也就是在同一个水平面从一个井眼打多分支叉井(图 2.1)。

一般来说,(在厚油层、低垂向渗透率油藏)没有气顶或底水不适宜水平井的情况下,一旦出现气顶或底水时也适合打水平井。同样,图 2.1 示意了井间的空间分布足以引起井之间的干扰。这样的干扰能加速采油,进一步提高采收率。



底水脊进

图 2.1 水平分支井出现水脊时的采收率优化

2.2.3 层状油藏

层状油藏要求对每个层均匀开采。传统上直井从多个油层合采。由于层与层之间产量与

储量的不同,并且这些层在井筒内处于不同的垂深,所处的压力不同,所以易导致油层枯竭的时间不同。这种状况下,无论是降低采油速度还是关井,高压层向枯竭层的倒灌都很难避免。合采的另一种风险是引起下倾的水或上窜的气进入井筒,导致不必要流体的早突破而进入高产层或层系中。这种情况一旦发生,低产油层的油被忽略了。在被忽略的低产油层中钻水平井是一个现时的解决办法。

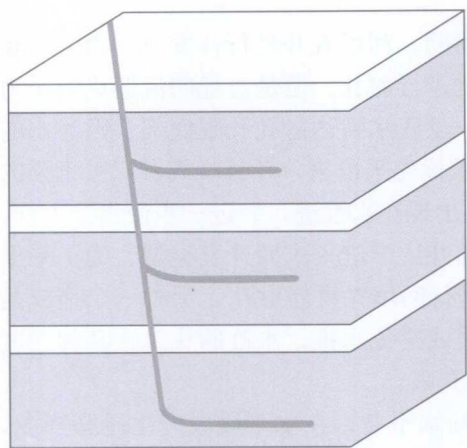


图 2.2 水平多层油藏的分支井储量控制

在被漏掉的低产油层中钻单支水平井由于只生产这一层储量所以不是一个很好的选择,但是打丛式多分支井是一个高效率的策略(图 2.2)。这一种情况,每一分支的长度和该支所穿油层的油流能力成反比。在层状油藏中打斜井是一个提高采油量的低成本策略。可以通过在低产油层中设计不同长度的钻井轨迹来实现采油量的均匀控制。但是在高产油层中一旦发生水突破较早的现象,封堵丛式井的一支比封堵斜井中间段要相对容易。

在高渗透率的薄夹层油藏(如浊流岩层),通过压裂充填可以起到防砂或消除近井地带伤害的作用。但是,在低渗透率的薄夹层油藏,通过对井实施压裂措施产生平面汇,能大大增加油井的产量,因此水力压裂是比其他最好的选择。对薄油层的薄夹层油藏,在水平井段实施水力压裂也许是最好的选择,因为长井段增大了油层的接触面积,尽管增大了油井的泄流体积,然而水力压裂能够将所有储层厚度连通,使流体水平流向井筒。

2.2.4 薄夹层油藏

薄夹层油藏与层状油藏不同。如果夹层厚度不足以影响钻水平井就可以划为薄夹层油藏。通常情况下薄夹层油藏的垂向渗透率较低。由于垂向渗透率较低造成产量较低所以钻水平井不是一个好的选择,即使在一个厚油层,一口水平井甚至不能生产出全部油层厚度的油。在中渗透率的油层直井就能采出较多的油。斜井比直井能轻微增加一些产量。

而水力裂缝可以使流体穿过整个地层厚度,水平流入井筒内。水平井的水力裂缝可以设计为平行井筒的裂缝,钻井时需要沿最大水平应力方向钻进;或者垂直井筒压裂裂缝,钻井时需要沿最小水平应力方向钻进。

在高渗透率的薄夹层油藏(如浊流岩层),通过压裂充填可以起到防砂或消除近井地带伤害的作用。但是,在低渗透率的薄夹层油藏,通过对井实施压裂措施产生平面汇,能大大增加油井的产量,因此水力压裂是比其他最好的选择。对薄油层的薄夹层油藏,在水平井段实施水力压裂也许是最好的选择,因为长井段增大了油层的接触面积,尽管增大了油井的泄流体积,然而水力压裂能够将所有储层厚度连通,使流体水平流向井筒。

2.2.5 天然裂缝性油藏

当沿着垂直于裂缝平面的方向钻进时,水平井单井在天然裂缝性油藏中具有特殊优势。在这些油藏中,天然裂缝的定位和裂缝方位的确定对于井身结构优化设计非常关键。

虽然天然裂缝通常是接近垂直的,但是较浅油藏和超压区带中可能存在张开的可导流近水平裂缝。在这种情况下,理性的选择是钻直井或斜井。采油作业使孔隙压力降低后,向超压区带水平裂缝中注入的支撑剂可以保证裂缝张开。否则上覆岩层重力会使水平天然裂缝闭合。同样,可以通过高压注水再次打开衰竭地层中的或在钻井过程中封堵的天然