

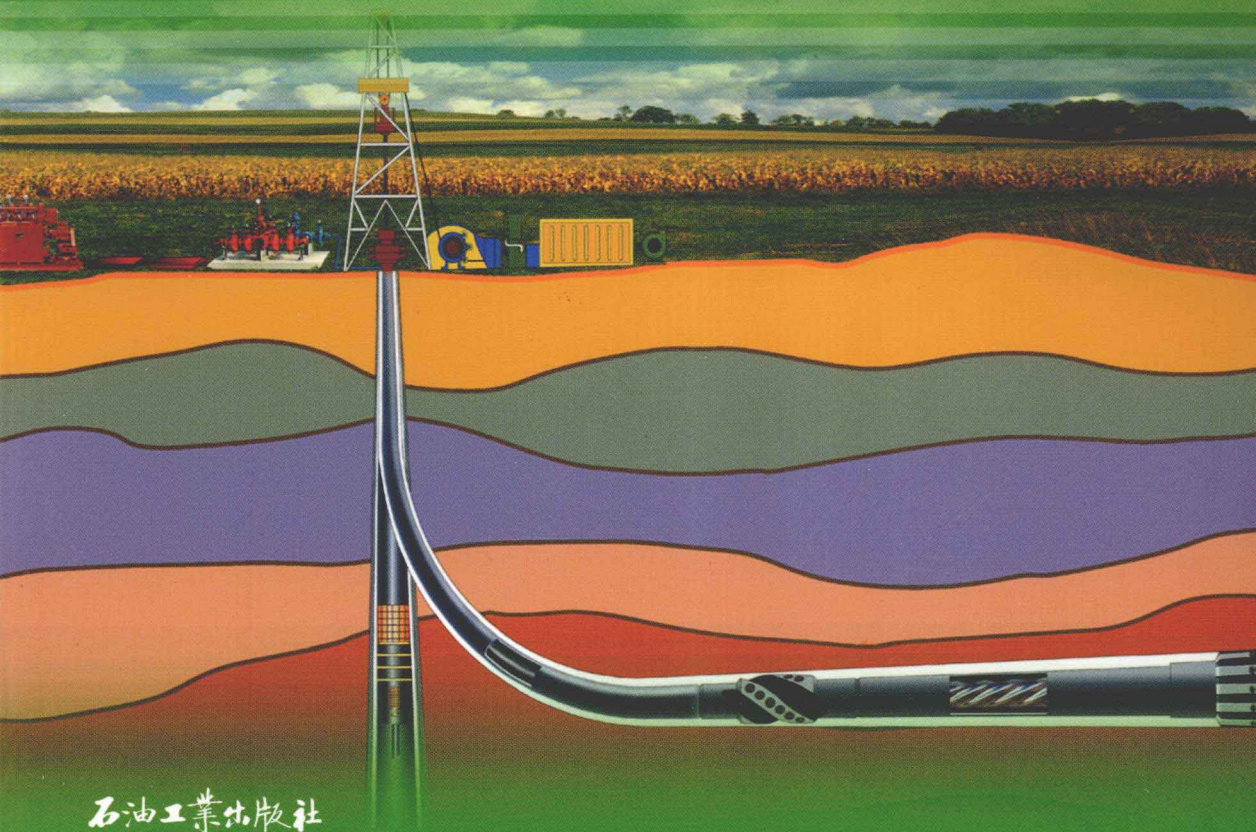


中国石油天然气集团公司统编培训教材

勘探开发业务分册

水平井油藏工程设计

《水平井油藏工程设计》编委会 编



石油工业出版社

中国石油天然气集团公司统编培训教材

勘探开发业务分册

水平井油藏工程设计

《水平井油藏工程设计》编委会 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书围绕水平井技术,以大量的实际资料为基础,诠释了油藏描述概念的内涵,总结了不同类型油藏的三维地质建模方法,阐述了水平井开发油藏工程论证的详细内容,展示了水平井地质设计要点和相关的开发配套技术等内容,是集地震、地质、测井、油藏地质建模技术、水平井开发油藏工程论证、水平井地质设计、水平井开发配套工程技术等多学科相互渗透、多领域技术相互融合的综合性参考书。

本书主要作为从事石油勘探和开发工作的研究人员、水平井工程技术人员和现场工程师的培训教材,也可供高等院校相关专业的本科生和研究生借鉴、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水平井油藏工程设计/《水平井油藏工程设计》编委会编.
北京:石油工业出版社,2011.7

(中国石油天然气集团公司统编培训教材)

ISBN 978-7-5021-8077-5

I. 水…

II. 水…

III. 水平井-设计

IV. TE 243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 201018 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) 64523537 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 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

787×960 毫米 开本: 1/16 印张: 28.5

字数: 490 千字

定价: 98.00 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

《中国石油天然气集团公司统编培训教材》

编 审 委 员 会

主任委员：李万余

副主任委员：金 华 白泽生

委 员：王志刚 连建家 胡宝顺 马晓峰

卢丽平 杨大新 吴苏江 杨 果

方朝亮 王同良 刘江宁 卢 宏

周国芳 雷 平 马新华 戴 鑑

上官建新 陈健峰 秦文贵 杨时榜

何 京 张 镇

秘 书：张玉文 王子云

《水平井油藏工程设计》编委会

主 任：赵政璋

副主任：赵文智 吴 奇 杜金虎 张国珍 王元基

马新华 吴国干 胡炳军 何江川

成 员：赵邦六 李松泉 郑新权 廖广志 何海清

穆 剑 刘墨山 范文科 李 铮 曾少华

王永祥 刘德来 王喜双 尚尔杰 任 东

胡海燕 张守良 汤 林 于博生 李国欣

赵 刚 苏春梅 何 刚 雷怀玉 吴晓敬

段 红 陈 莉

《水平井油藏工程设计》编审人员

主 编：王元基

副 主 编：尚尔杰 胡永乐 郑兴范 田 军

编写人员：李凡华 郝明强 张为民 任殿星 高晓翠

王锦芳 惠 刚 郑亚斌 吴 健 刘鹏程

严增民 陈建文 葛云华 王浦潭 王晓东

卜忠宇 熊 铁 孙德君 邢厚松

审定人员：张国珍 王元基 李松泉 郑新权 胡海燕

尚尔杰 胡永乐 田昌炳 郑兴范 田 军

王连刚 吴洪彪 叶新群

序



企业发展靠人才，人才发展靠培训。当前，集团公司正处在加快转变增长方式，调整产业结构，全面建设综合性国际能源公司的关键时期。做好“发展”、“转变”、“和谐”三件大事，更深更广参与全球竞争，实现全面协调可持续，特别是海外油气作业产量“半壁江山”的目标，人才是根本。培训工作作为影响集团公司人才发展水平和实力的重要因素，肩负着艰巨而繁重的战略任务和历史使命，面临着前所未有的发展机遇。健全和完善员工培训教材体系，是加强培训基础建设，推进培训战略性和国际化转型升级的重要举措，是提升公司人力资源开发整体能力的一项重要基础工作。

集团公司始终高度重视培训教材开发等人力资源开发基础建设工作，明确提出要“由专家制定大纲、按大纲选编教材、按教材开展培训”的目标和要求。2009年以来，由人事部牵头，各部门和专业分公司参与，在分析优化公司现有部分专业培训教材、职业资格培训教材和培训课件的基础上，经反复研究论证，形成了比较系统、科学的教材编审目录、方案和编写计划，全面启动了《中国石油天然气集团公司统编培训教材》（以下简称“统编培训教材”）的开发和编审工作。“统编培训教材”以国内外知名专家学者、集团公司两级专家、现场管理技术骨干等力量为主体，充分发挥地区公司、研究院所、培训机构的作用，瞄准世界前沿及集团公司技术发展的最新进展，突出现场应用和实际操作，精心组织编写，由集团公司“统编培训教材”编审委员会审定，集团公司统一出版和发行。

根据集团公司员工队伍专业构成及业务布局，“统编培训教材”按“综合管理类、专业技术类、操作技能类、国际业务类”四类组织编写。综合管理类侧重中高级综合管理岗位员工的培训，具有石油石化管理特色的教材，以自编方式为主，行业适用或社会通用教材，可从社会选购，作为指定培训教材；专业技术类侧重中高级专业技术岗位员工的培训，是教材编审的主体，

按照《专业培训教材开发目录及编审规划》逐套编审，循序推进，计划编审300余门；操作技能类以国家制定的操作工种技能鉴定培训教材为基础，侧重主体专业（主要工种）骨干岗位的培训；国际业务类侧重海外项目中外员工的培训。

“统编培训教材”具有以下特点：

一是前瞻性。教材充分吸收各业务领域当前及今后一个时期世界前沿理论、先进技术和领先标准，以及集团公司技术发展的最新进展，并将其转化为员工培训的知识和技能要求，具有较强的前瞻性。

二是系统性。教材由“统编培训教材”编审委员会统一编制开发规划，统一确定专业目录，统一组织编写与审定，避免内容交叉重叠，具有较强的系统性、规范性和科学性。

三是实用性。教材内容侧重现场应用和实际操作，既有应用理论，又有实际案例和操作规程要求，具有较高的实用价值。

四是权威性。由集团公司总部组织各个领域的技术和管理权威，集中编写教材，体现了教材的权威性。

五是专业性。不仅教材的组织按照业务领域，根据专业目录进行开发，且教材的内容更加注重专业特色，强调各业务领域自身发展的特色技术、特色经验和做法，也是对公司各业务领域知识和经验的一次集中梳理，符合知识管理的要求和方向。

经过多方共同努力，集团公司首批39门“统编培训教材”已按计划编审出版，与各企事业单位和广大员工见面了，将成为首批集团公司统一组织开发和编审的中高级管理、技术、技能骨干人员培训的基本教材。首批“统编培训教材”的出版发行，对于完善建立起与综合性国际能源公司形象和任务相适应的系列培训教材，推进集团公司培训的标准化、国际化建设，具有划时代意义。希望各企事业单位和广大石油员工用好、用活本套教材，为持续推进人才培训工程，激发员工创新活力和创造智慧，加快建设综合性国际能源公司发挥更大作用。

《中国石油天然气集团公司统编培训教材》

编审委员会

2011年4月18日

前言

21 世纪初叶，随着全球工业化进程的不断加速和对能源需求的日益增大，石油工作者面临更加严峻的挑战，同时承担更加繁重的责任。搞好油田勘探开发以合理高效利用地下资源、实施低成本战略以创造更大的企业效益成为世界各石油公司追求的目标。

水平井开采技术是 20 世纪 90 年代世界油气田开发迅速发展的一项新技术，并且已成功地用于各种类型的油田开发，对新油田的开发、已开发油田开发效果的改善、剩余可采储量的动用、油田的稳产增产等都发挥了十分重要的作用。可以说水平井技术引起了一场巨大的石油工业技术变革。

中国石油已经进入大规模应用水平井技术提高单井产能的时代，这也是中国石油的重要发展战略转变之一。为了适应形势发展，广大技术人员及管理干部迫切需要更新知识、提高技术水平，以便解决实际生产中的问题。

为了满足目前水平井迅速发展的形势和技术需求，我们在认真总结多年来水平井技术应用的经验与教训的基础上，结合对水平井技术的实践和理解，编写了本书。诚然，水平井技术是一项涉及面较广、涵盖学科较多、技术性较强的复杂庞大的系统工程，不可能面面俱到。本书主要对水平井油藏工程中的一些问题进行了有益的探索，书中总结了国内外水平井技术的发展现状，详细阐述了水平井油藏描述技术、三维地质建模技术，重点讨论了水平井开发油藏工程论证的内容，展示了单井地质设计以及水平井开发配套工程技术等，并辅以大量的矿场实例进行说明，以供从事水平井技术研究和矿场生产的科技人员、技术人员、生产人员参考。理论紧密联系矿场生产实际、具有较强的实用性和可操作性，集理论性、方法性、实践性于一体是本书的出发点，也是本书的显著特色，希望它能对广大读者有所裨益。

本书在编写过程中，得到了中国石油天然气股份有限公司和中国石油勘探开发研究院油气田开发研究所领导的关心和支持，中国地质大学（北京）、

中国石油大学（北京）等相关院校专家的帮助，以及中国石油天然气股份有限公司所属油田的积极配合。同时，每次研讨过程中一些特约专家都提出了许多宝贵意见和建议。另外，我国油气田开发领域资深专家裘怿楠、刘雨芬、林志芳、胡永乐、赵永胜、董杰等同志在百忙中抽出时间，不辞辛苦地对全书进行了认真审阅和批改。因此，应该说本书的出版是一部集体智慧的结晶。

尽管如此，囿于编著者的学识和专业水平，书中某些观点或认识还是难免失之偏颇甚至不当，恳请广大读者不吝批评和指正。

谨在此书付梓出版之际，特向以上所有单位和同志表示衷心感谢！

《水平井油藏工程设计》编委会

2011年5月9日

目 录

绪论	1
第一章 油藏描述	6
第一节 油藏描述的发展历史和国内外研究现状	6
第二节 评价阶段油藏描述	10
第三节 开发阶段油藏描述	23
第四节 油藏描述与水平井技术	34
第二章 油藏建模技术	49
第一节 三维油藏地质建模技术	49
第二节 油藏评价阶段的精细砂控建模技术	88
第三章 水平井开发油藏工程论证	110
第一节 水平井开发适应性论证	110
第二节 水平井产能论证	113
第三节 水平井井网论证	167
第四节 低渗透油藏水平井油藏工程研究进展	223
第四章 水平井地质设计	311
第一节 水平井地质设计技术要求	311
第二节 水平井地质设计实例	315
第五章 水平井开发配套工程技术	346
第一节 水平井钻井工艺技术	346
第二节 水平井采油工艺技术	380
第三节 水平井全过程的油气层保护技术	410
第四节 水平井测试工艺技术	421
参考文献	434

绪 论

水平井技术是一项有着广阔发展前景的应用技术，它已广泛应用于能源、水利、环保等许多工程领域，并取得了良好的社会效益。同时，水平井技术的发展与革新更是日新月异。

水平井技术在油气田开发领域的应用和发展尤为迅速，已经成为世界石油工业发展的主要热点。水平井技术的发展给油田开发带来了巨大的效益，也给开发设计带来了全新的理念。水平井可以提高单井产量、降低操作成本、显著提高油气田勘探开发的综合效益。水平井实质上并没有改变油气渗流机理，油藏流体所遵循的渗流方程与直井一样，只是流体流入条件发生了变化，由此改变了渗流场，水平井本身不能提供任何附加能量以助开采，但它可以提高能量的利用率。

水平井的明显优势体现在：产量高及单井控制储量大；增加原油的可采储量，如美国油气杂志统计，通过水平井的应用可使美国石油可采储量增加 $13.7 \times 10^8 \text{t}$ ；采油成本比直井低，以美国为例，水平井钻井成本已降至直井的 1.2 ~ 2 倍，而水平井的产量却是直井的 4 ~ 8 倍；控制储量成本（开发费用/控制储量）亦比直井低 25% ~ 50%；水平井具有比直井更长的完井层段，能够产生较大的泄油区，可以改造断块型油藏的连通性，能够有效的抑制有底水或气顶油藏的水锥或气锥，它具有水力压裂造缝所不能实现的合理的、有效的定向控制和长度控制等。

目前，石油工业在世界范围内均不同程度地面临老油田剩余油资源挖潜、低渗透、超薄、海洋、稠油和超稠油等复杂油藏的开发等难题，加之水平井钻井技术的成熟和成本的降低，各国石油公司开始将水平井技术作为原油高产、稳产的一项保障技术积极推广，并规模应用，水平井技术应用呈现勃勃生机，作为油气田开发第二次革命的趋势已初露端倪。

目前水平井技术应用具有以下主要特点。

一、水平井数量大幅度增加

石油工业中的水平井技术早在 1928 年就已经提出，并于 1929 年在美国

得克萨斯钻了第一口真正意义上的水平井，然而，该井仅在 1000m 深处从井筒横向向外延伸了 8m。苏联于 1937 年在 Yarega 钻了一口水平井，20 世纪 50 年代共钻了 43 口水平井、分支井，中国于 1963 年在南充构造带 270 号钻了一口三支的多底井。事实上，水平井技术直到 20 世纪 80 年代才相继在美国、加拿大等国得到工业化应用。1995 年、1996 年全世界共钻水平井仅 3000 余口，约占当年钻井总数的 5%。到 2000 年底，全世界共钻水平井已达到 24000 口，到 2010 年底，全世界水平井的总数超过了 60000 口。中国地区水平井数量近几年发展更为迅速，仅中国石油每年完钻水平井数量从 2004 年的 124 口、2005 年的 153 口，迅速扩大到 2006 年的 522 口，2007 年的 806 口，2008 年的 1005 口。然而，水平井分布区域整体还不平衡，绝大多数仍属于美国和加拿大。

二、水平井井型更加丰富

除常规意义的水平井外，针对储层特点，还加大了侧钻水平井、鱼骨刺井、多底井、多分支井、阶梯状水平井等特殊井型的应用力度，并且一些非常规水平井应用技术迅猛发展。如哈里伯顿在英国 Jedney 油田完钻了一口 U 型对接井，该井长度为 5864m，总垂深 1545m，水平位移 3106m。壳牌石油公司在文莱海上的冠西方油田完钻一口长度为 8000m 的蛇形井，该井是当前世界上最长、最先进的水平井，这类水平井能够将许多分散的小油藏串联起来，大大降低了一些小而复杂油藏动用的经济界限，并且采用智能技术，使油井产量大幅增加，开发费用降低。

三、水平井应用领域不断拓展

目前，水平井所应用的油藏类型涵盖了稠油油藏、边底水油藏、薄层油藏、低渗透油藏、裂缝性油藏、低渗透气藏，涉及新区和老区。但不同的国家由于地质条件的不同，水平井所应用的主要油藏类型也各有侧重。如美国 53% 的水平井用于裂缝性油藏开发，主要作用是横穿多条裂缝，33% 的水平井用于具有底水或气顶油藏的开发，以延迟水锥或气锥；而在加拿大，45% 的水平井开采重油油藏，40% 的水平井开采中到轻质油藏以及裂缝性碳酸盐岩油藏；俄罗斯则主要利用水平井开采枯竭老油田；在阿曼，从前寒武纪到白垩纪的碎屑岩油藏和碳酸盐岩油藏、薄油层和厚油层、轻质油藏和重质油藏以及深度从 500m 到 5000m 的油藏均钻有水平井，应用范围较广，并且水平

井长度可以达到 10000m。但总的趋势是，水平井早期以开发薄层、底水油藏和裂缝性油藏为主，目前主要转向稠油油藏、低渗透与特低渗透油藏等复杂类型油藏。

四、水平井应用技术日臻完善

多学科综合应用卓有成效地促进了水平井技术的发展与进步。如为了解决老油田稳产增产和提高采收率问题，国外多家公司应用多学科综合方法开展水平井水驱技术的研发和应用。这些方法包括：通过地质解释、岩石力学评估、油藏模拟等多学科相结合的方法对有潜力的油藏进行筛选；应用油藏数值模拟确定油藏的适应性，制订开发方案；应用先进的旋转导向钻井技术钻短半径水平井；改进测井工具的通用性，顺利完成短半径水平井水平段的测井；在水平段采用裸眼完井工艺；通过优化布井方式最大程度地驱替剩余油。同时，水平井专项技术也不断向极限挑战并逐渐转向普及应用。诸如，在钻井工程方面，水平井长度逐渐增加。如 2004 年 11 月，挪威海德罗公司在 Oseberg 油田钻成当时海上最长的水平井，水平段长度为 10007m，总垂直深度为 2807m，水深为 109m，水平位移为 8219m。在水平井压裂改造方面，斯伦贝谢公司的 StageFrac 服务技术已经被应用到全世界的多种地层，从中东的碳酸盐岩油藏到西非的海上砂岩油藏，到北美的水平泥岩气井。如果油藏渗透率很低，哈里伯顿公司的 SurgiFrac 服务技术在增加产能方面与传统方法不同。据报导，SurgiFrac 服务技术在一口长为 488m 的水平井裸眼水平段压开 8 条裂缝，产量达到压裂前的 800%；一口每个分支长 244m 的双分支水平井应用 SurgiFrac 服务技术进行酸化压裂，在每个分支上压裂 6 条小到中等的裂缝，初始产量是压裂前的 5 倍，稳产后产量是压裂前的 4 倍；在新墨西哥东南的一个低渗透碳酸盐岩老油田的一口水平裸眼分支长 488m 的老水平井上，压裂了 8 条裂缝，酸化压裂前的产油量为 0.4t/d，使用 SurgiFrac 服务技术后初始产油量为 7t/d，一个月后为 4t/d；巴西近海应用 SurgiFrac 服务技术压裂一口裸眼水平井，压裂 3 条裂缝，压裂后产量提高 5 倍。

五、水平井应用向整体规模化方向发展

对于具备条件的整装区块，以水平井为主进行整体开发，水平井整体开发的规模不断加大。哈得 4 油田薄砂层油藏是我国第一个整体采用水平井开



发的油藏。哈得 4 油田有东河砂岩油藏和薄砂层油藏两套开发层系，其中东河砂岩油藏属于超深（埋深超过 5000m）、低幅度、低丰度砂岩油藏；薄砂层油藏埋深超过 5000m，油层厚度仅 0.6 ~ 2.1m，储量丰度 $18 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ ，属超深低幅度、特低丰度、超薄砂岩油藏。哈得 4 油田发现之初被评价为边际效益油田。为有效开发该油田，采用了水平井整体开发技术。其中，东河砂岩油藏采用 61 口水平井，薄砂层油藏水平采油井 17 口，双台阶水平注水井 7 口。截至 2005 年底，哈得 4 油田建成产能 $195 \times 10^4 \text{ t}$ ，年产油量从 1998 年的 $1.5 \times 10^4 \text{ t}$ 上升到 2005 年的 $193 \times 10^4 \text{ t}$ 。吐哈油田也将水平井整体开发模式作为破解低效区块、底水油藏、复杂断块、挖掘剩余油的新方法，实现了从单井向地质单元构造高效开发的跨越。新庙油田庙 22 区块还开展了特低渗透油田水平井整体开发试验。

六、水平井应用成效突出

目前，水平井应用效果总体明显，产量增幅较大。如 BirdCreek 油田是一个浅滩中等黏度、下部被水淹的老油田，应用常规直井开发时产量为 0.3 ~ 0.4t/d，含水率高达 98%，Grand 公司应用水平井技术对 BirdCreek 油田进行再开发，取得了很好的效果，产量平均提高了 6 倍，达到 2t/d，含水率下降至 75%。美国和加拿大的资料还表明，水平井可平均增加可采储量 8% ~ 9%，水平井的稳定产能是直井的 2 ~ 5 倍，许多高渗气藏超过了 5 倍。委内瑞拉英特甘伯边际油田应用水平井开发技术日产油则提高近 10 倍。美国 Six Lakes Gas Storage 气田每年产能下降 5.6%，Michigan Consolidated Gas Company 通过采用水平井技术后改变了产能下降的状况，水平井产能是周围直井的 15 倍，而成本却是直井的 2.7 倍，目前水平井为该油田提供一半以上的产能。

我国油气田类型复杂多样，高效开发面临严峻挑战，这也为水平井的推广应用创造了良好的发展机遇。目前，已经进入了水平井开采油气田的新阶段，主要应用于稠油油藏，边、底水油藏，裂缝油藏，天然气藏，薄层油藏，低渗透油藏等几乎所有的油气藏，特别是在我国低渗透油藏的开发、高含水油田三次采油、挖掘老油田剩余油潜力、尤其在补打调整井和滚动开发井的过程中起着关键性的作用。另外，我国大庆油田还在榆树林油田开展了水平井注水开发先导性试验，西南油气田分公司对高含硫气田也进行了水平井开采。

我国早在“八五”期间就开展了“水平井开发技术”国家重点课题攻

关，近几年又开展了水平井储层改造重大专项进行科技攻关，并充分借鉴国外水平井的先进技术和经验，完善了水平井开发的各项配套技术，在水平井地质优化设计技术，水平井油藏工程设计技术，水平井井眼轨迹优化设计技术，水平井钻井液与完井液优化技术，固井、完井和射孔优化设计技术，水平井取心技术，水平井测井和测试技术等方面开发了一些具有自主知识产权的技术和产品，形成了我国水平井开发的配套技术，基本能够满足油田开发的需要。

虽然我们在水平井技术方面取得了一定的成绩，但是，与世界先进国家的水平井技术相比还存在差距：水平井在钻井、测井、完井、采油以及油藏评价方面与国外先进水平还有很大差距；信息化、智能化相关技术的应用还不够；国外各石油公司都拥有自己的综合设计平台和软件，而我们现在还缺少这样的设计平台；水平井配套工艺技术与国外先进水平还有很大差距；水平井类型单一，基本上属于单一水平井和双台阶水平井，分支水平井和多分支水平井发展潜力还很大；各油田应用发展不均衡等。我们还应进一步加大水平井钻井、油藏基础理论研究和前沿技术的攻关力度，特别是在低渗透、特低渗透油藏水平井的钻井、水平井压裂以及裂缝的识别检测，水平井井网、井距、排距的优化等方面还存在尚未解决的技术问题，以期尽快突破水平井在低渗透、特低渗透油藏中应用的瓶颈问题。

当然，随着水平井数量的增多，水平井的生产管理将会面临一系列新的难题，应该及时发现问题，利用配套工具，采用先进的工艺技术，切切实实利用好水平井技术，让先进技术带来更多的经济效益，为创建和谐社会做出我们应有的贡献。

第一章 油藏描述

本章首先介绍油藏描述的发展历程和国内外研究现状，以及在油藏评价阶段和开发阶段油藏描述的主要任务和研究内容，然后根据水平井地质设计要求论述了水平井和油藏描述的关系，并提出了油藏描述所要达到的各项主要技术要求。

第一节 油藏描述的发展历程和国内外研究现状

油藏描述亦称为储集层描述，源自英文 Reservoir Description，是研究和定量描述油藏的开发地质特征，并对油藏进行解释、预测及评价的技术。众所周知，现代油藏描述是以沉积学、石油地质学、构造地质学、储层地质学、层序地层学、地震地层学、地震岩性学、测井地质学和油藏地球化学等为理论基础，以计算机技术为手段，对地质、物探、钻井、分析化验和地层测试、试油、试采等多学科信息进行动态与静态相结合的综合分析与处理，以达到对油藏进行定性、定量描述和评价的目的。勘探开发的实践表明，勘探与开发工作成败的关键在于对油藏的认识是否符合客观实际，这个“对油藏的认识”就是不同阶段油藏描述要完成的主要任务。

油藏描述最早由斯伦贝谢公司在 20 世纪 70 年代末首先提出的，并以测井为主体的油田技术服务项目（RDS），主要针对油藏描述各方面的课题设计推出了一系列软件，随后把三维地震处理、声阻抗以及垂直地震剖面（VSP）等用于测井研究，并结合高分辨率地层倾角、岩性密度测井、能谱测井等最新技术，在印度尼西亚及中国新疆地区进行了实际应用，对油藏进行综合分析，取得了较好的效果。1980 年，由美国阿特拉斯测井公司费特尔（Fertl）博士主持的油藏描述研究工作在油田动态监测（TDT 测井）、最终采收率评价及剩余油分布规律研究等方面取得了较大进展。与此同时，法国埃尔夫（ELF）公司及法国石油研究院方拉伯（Franlab）公司也开始在油藏描述方面