

中 国 石油勘探开发 百科全书

刘宝和 主编



开发卷

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油勘探开发百科全书·开发卷 / 刘宝和主编.
北京: 石油工业出版社, 2008.12
ISBN 978-7-5021-6807-0

- I . 中…
- II . 刘…
- III . ①油气勘探 - 百科全书
②油田开发 - 百科全书
- IV . P618.130.8-61 TE34-61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 169403 号

中国石油勘探开发百科全书·开发卷

Zhongguo Shiyou Kantan Kaifa Baikequanshu-Kaifajuan

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) 64523542 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

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本: 16 印张: 55.75

字数: 1500 千字 印数: 1—5000 册

定价: 320.00 元 (全套四卷定价: 1280.00 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

《中国石油勘探开发百科全书》总编委会

主任：刘宝和

常务副主任：沈平平 魏宜清

副主任：贾承造 赵政璋 袁士义 刘希俭 白泽生 吴奇
赵文智 李秀生 傅诚德 李文阳 丁树柏

委员：(按姓氏笔画排列)

马纪 马双才 马家骥 王元基 王秀明 石宝珩
冉新权 田克勤 刘洪 齐志斌 吕鸣岗 余金海
吴国干 张玮 张镇 张卫国 张水昌 张绍礼
李建民 李秉智 宋新民 汪廷璋 杨承志 邹才能
陈宪侃 单文文 周虬 周家尧 孟慕尧 岳登台
金志俊 咸玥瑛 姜文达 禹长安 胡永乐 胡素云
赵俭成 赵瑞平 秦积舜 钱凯 顾家裕 高瑞祺
章卫兵 蒋其培 谢荣院 潘兴国

主编：刘宝和

常务主编：沈平平 魏宜清

副主编：冉新权 张卫国 孟慕尧 高瑞祺 潘兴国 单文文

《中国石油勘探开发百科全书》学术委员会

主任：邱中建

委员：(按姓氏笔画排列)

王铁冠 王德民 田在艺 李庆忠 李德生 李鹤林
苏义脑 沈忠厚 罗平亚 胡见义 郭尚平 袁士义
贾承造 顾心悻 康玉柱 韩大匡 童晓光 翟光明
戴金星

秘书长：沈平平

副秘书长：傅诚德

《中国石油勘探开发百科全书·开发卷》编委会

主 编：沈平平

常务副主编：潘兴国

副 主 编：袁士义 阎存章 张卫国 王元基 宋新民

委 员：(按姓氏笔画排列)

孙 平 刘明新 庄惠农 李士伦 李秉智 李春如
肖敬修 杨承志 岳清山 杨普华 俞 理 禹长安
胡永乐 咸玥瑛 贾 迎 贾文瑞 秦积舜 谢兴礼
廖新维

《中国石油勘探开发百科全书·开发卷》审稿人

(按姓氏笔画排列)

万仁溥 方义生 孙 平 朱 斌 任义宽 刘民中 孙志道 刘明新
刘继德 张 锐 吴 湘 陈元千 沈平平 李宇乡 牟伯中 李建芳
李秉智 李春如 沈联蒂 张景存 肖敬修 吴肇亮 杨长祜 杨承志
岳清山 姜文达 禹长安 胡永乐 咸玥瑛 袁庆峰 徐志川 姚逢昌
秦积舜 谢兴礼 韩大匡 韩卓明 裘恽楠 廖新维 潘兴国



序

中国是世界上发现和利用石油、天然气最早的国家之一，但中国石油工业的崛起是在中华人民共和国成立之后。在中国共产党的领导下，新中国一代又一代石油人，发扬爱国、创业、求实、奉献的精神，在草原、戈壁、沼泽、海洋拼搏奋斗，取得了一个又一个辉煌胜利。石油工业从1949年新中国成立之初的年产原油7万吨（不含人造油），发展到2006年的年产原油18367.6万吨、年产天然气585.5亿立方米，跨入世界主要产油国的行列。

石油工业的发展，离不开石油科学技术的进步。新中国石油工业的发展史，也是石油科学技术不断更新和发展的历史。广大石油科技工作者和石油员工，勤奋学习、勇于实践、积极探索，中国石油科技水平迅速提高，在油气勘探开发理论与实践和石油利用等诸多方面，总体上处于世界先进行列，不少领域具有中国特色。

适时地总结我国在石油勘探、开发和工程技术等方面的知识、技术、经验和理论成果，使之传之久远，这对加强石油员工队伍建设，提高石油科技文化水平，促进石油工业的新发展是非常必要的。《中国石油勘探开发百科全书》在近900名石油专家、学者和科技工作者的辛勤努力下，以百科全书条目形式，比较全面、系统、科学地总结了石油工业在勘探开发方面的知识、技术和理论，具有很强的权威性和广泛的实用性。它的编纂出版，填补了我国此类出版物的空白，加强了石油科技文化基础建设，是一项标志性石油出版工程，很有意义，值得庆贺。

当前我国正进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段，新形势、新任务对石油工业提出新的更高的要求。我们要高举中国特色社会主义伟大旗帜，深入贯彻落实科学发展观，继续实施科技兴油，进一步发扬优良传统，不断提高石油员工队伍的综合素质，坚定信心，奋发图强，奉献能源，构建和谐，谱写中国石油工业的新篇章。

马富才

2008年10月



前言

百科全书常被人们视为一个国家、一个行业、一个地区科技文化发展的标志，一个时代的丰碑。石油工业是知识密集、人才荟萃的行业。进入 21 世纪，石油的战略地位更显重要，石油与社会及广大人民的生活更加密切。以百科条目形式，全面汇集石油及其相关学科知识，系统总结中国在石油勘探、开发和工程方面的理论、技术、经验和成果，不仅非常必要，而且十分紧迫。为适应新时期石油工业的新发展，加强石油科技文化基础建设，石油行业需要石油百科全书；为促进石油科学知识的普及与推广，帮助了解石油、熟悉石油，广大读者盼望石油百科全书；为填补中国石油百科类出版物的空白，也为专业百科全书家族增添新的重要成员，出版界期待石油百科全书的问世。

2002 年下半年，中国石油天然气股份有限公司副总裁刘宝和、中国石油天然气股份有限公司副总裁兼中国石油勘探开发研究院院长沈平平、石油工业出版社社长魏宜清和副社长张卫国等同志，在广泛调研、认真分析的基础上提出了编纂《中国石油勘探开发百科全书》（以下简称《全书》）的建议，此事很快得到许多领导和石油专家们的大力支持。中国石油天然气集团公司副总经理郑虎对此项工作高度重视，并在石油工业出版社关于编纂出版《全书》的专题报告上做了“认真组织实施”的重要批示。2002 年 12 月，《全书》编委会第一次全体会议在北京召开，标志着《全书》编纂工作全面展开。

《全书》编纂工作一开始，编委会就明确提出要努力把《全书》建设成一项标志性石油出版工程，编纂成一部高水平、传之久远的大型石油工具书。2006 年，石油工业出版社社长白泽生表示要举全社之力，把《全书》打造成精品。参加《全书》框架设计、条目撰写和审稿工作的近 900 名石油专家、学者和科技工作者大多数是第一次从事这项工作，大家克服了许多困难，在实践中不断加深对百科全书的认识，努力提高编纂质量。特别是许多老专家在撰写释文和审阅条目时，认真推敲，反复修改，精益求精。有的专家为使撰写的条目释文内容准确全面，多次到相关图书馆查找资料；有的专家虽然年事已高，仍认真钻研百科知识，工作一丝不苟，力求撰写出高质量的条目释文；有的专家在病床上还挂念着《全书》条目释文的撰写；有的专家出国探亲时还带着《全书》初稿不时修改。

中国科学院、中国工程院石油勘探、开发和工程方面的院士们，对《全书》工作给予了热忱支持和大力帮助。中国工程院院士邱中建担任了《全书》学术委员会主任，20 位两院院士担任了《全书》学术委员会委员。他们不仅认真审查《全书》的重要条目，把握好重要的学术问题，有的还亲自参加卷首文章和重要条目的撰写，有力

地促进了《全书》的编纂质量和学术水平的提高。

为了使《全书》的撰写、审稿和编辑工作能按统一标准规范进行，在条目框架设计时，《全书》编辑部就组织编印了《全书·撰写须知》，以后又适时编印了《全书·审稿须知》和《全书·编写体例实施细则》。在《全书》框架设计、条目释文撰写、审稿和编辑加工等每一个重要阶段的开始，都请百科全书专家讲座，帮助释疑解惑。针对编纂工作中遇到的难点和重点，《全书》和各卷编委会都及时召开了形式多样的研讨会，解决问题，讲求实效。《全书》编委会还定期召开例会，及时交流情况，认真分析问题，扎实推进工作。

经过近 900 名石油专家、学者、科技人员和责任编辑近 6 年的辛勤劳动、通力合作，最终顺利完成了《全书》的编纂工作。《全书》分综合卷、勘探卷、开发卷、工程卷四卷，总计约 6000 条条目，630 万字，2200 幅图表。《全书》涵盖了石油勘探、开发和工程方面的知识，全面总结了在这些领域具有中国特色的理论、技术、经验和成果，具有系统性、科学性和权威性。综合卷有 11 个分支和附录，共 791 条条目，约 130 万字。分支为一般术语、油气勘探管理、油气田开发管理、油气田勘探与生产业务发展管理、石油科技与教育、信息技术、质量安全环保、石油经济评价、中国石油勘探开发史、中国石油机构、石油人物；附录一是中国石油勘探开发重大科技成果，附录二是中国石油勘探开发大事年表。勘探卷包括油气勘探综述、相关地质基础学科、石油地质理论基础与研究及石油勘探工程技术四大部分 23 个分支，共 2349 条条目，约 220 万字。分支为石油天然气勘探，地层与古生物、沉积与古地理、层序地层和数学地质，石油地质学、油气地球化学、油气储盖层地质、油气构造地质、油气成藏地质、石油地质实验和石油地质综合研究，石油地质调查、遥感地质、石油地球化学勘探、石油地球物理勘探、重力勘探、磁力勘探、电法勘探、石油放射性勘探、地震勘探、石油钻探和石油勘探测量。开发卷有 8 个分支，共 1304 条条目，约 150 万字。分支为石油开发地质学、油层物理学、渗流力学、油藏工程、提高石油采收率、中国主要油气田开发类型、典型油气田开发实例和煤层气开发。工程卷有 10 个分支，共 1450 条条目，约 126 万字。分支有石油钻井工程、完井工程、测井工程、试井工程、试油工程、采油工程、采气工程、井下作业、储层改造和油气田地面工程。

《全书》编纂工作始终得到了中国石油天然气集团公司各有关部门、中国石油勘探开发研究院和石油工业出版社等单位的鼎力支持和热情帮助，在此表示诚挚的感谢！《全书》内容涉及广泛，参加人数众多，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

《中国石油勘探开发百科全书》总编委会

2008 年 10 月



凡 例

1 本书是中国石油勘探开发方面的专业百科全书，分综合卷、勘探卷、开发卷、工程卷四卷，各卷既相互联系，又独立成卷。各卷由条目、附录和索引组成。总计约630万字。

2 条目是本书主体，是供读者查阅的基本单元，本书条目选自石油勘探、开发、工程、管理中的常用科学技术术语和词组。其中，综合卷791条条目，勘探卷2349条条目，开发卷1304条条目，工程卷1450条条目。

3 条目按照学科知识体系分类排列，正文后附有全部条目的汉语拼音索引和汉字笔画索引。

4 条目一般由条目标题（简称条头）、与条头对应的英文或其他拉丁字母文字、条目释文、相应的插图和表格以及作者署名组成。条头上方加注汉语拼音，但不标注声调；有的释文之后列有推荐书目。

5 条目的内容涉及其他条目，或与其他条目互为补充，则用“参见”方式，被参见条目在释文中出现时用棕色楷体字显示，如“应用石油地质学及相关学科理论知识”；未在其中出现时，则加括注，如“……利用试油（见试油工程）”。条目释文的一段内容同其他条目密切相关，设段末参见。整个释文同其他条目密切相关，设条末参见。

6 条目释文可根据需要，设置层次标题，最多分两级，用不同字体字号区别。

7 本书所用数字，执行国家标准 GB/T 15835—1995《出版物上数字用法的规定》。所用计量单位，采用《中华人民共和国法定计量单位》，援引史籍中统计数字所用的计量单位则仍照旧。释文中物理量单位采用符号。释文中涉及外国人名和地名时，按照译名规则译成中文，其后括注原文。

8 各卷之间的交叉条目，在不同卷中各自保留，释文侧重本专业内容。

9 本书综合卷中的石油人物分支选入的是中国科学院、中国工程院与石油勘探开发和工程专业相关院士，石油工业历任部长，中央国有石油石化企业历任主要负责人，部分从事过早期石油勘探工作的著名专家以及铁人王进喜，按照出生年月编排。

10 本书采用的资料和数据截至2005年12月，个别截至2007年。

油气田开发

韩大匡

油气田开发是指从油气田被发现以后开始,经过油气藏评价、储量计算、编制油气田开发方案、产能建设、投入生产、进行监测、开发调整直到最终废弃的全过程。油气田开发的任务是通过对其全过程的优化获得好的经济效益和尽可能高的采收率,为国民经济提供更多的油气商品。

油气田开发业处于石油工业的上游,是石油工业中主要的产业部门。其主要的产品原油和天然气是目前还难以替代的重要战略物资,是重要的能源和化工原料,无论在世界以及国内的能源结构中都占有重要的地位。据统计,中国以油、气为主要燃料和原材料的工业部门的产值约占全国工业总产值的六分之一。

油气田开发是高投入、高风险、高效益的行业。油气田开发需要有坚实的储量基础。由于地质条件的复杂性和不确定性,除了在油气资源勘探过程中充满着风险以外,在探明储量和开发过程中都需要钻大量评价井和开发井,一口井的投资动辄数百万甚至数千万元。综合平均下来,在中国每探明 1×10^8 t 石油储量大体需要 30 亿元左右,每 1×10^8 t 储量可以建成 100×10^4 t (对低渗透油田而言)到 200×10^4 t (中高渗透油田)产能,而每建 100×10^4 t 产能平均又需要约 30 亿元。因此,在开发决策上的重大失误,往往会造成数以亿元计的损失,也具有很大的风险性。沙漠、戈壁、深海、高压、有毒气体等恶劣环境和复杂条件则又会带来更大的风险。由此可见,油田开发需要巨额的投资,又充满了风险,但其效益却是十分巨大的,如 2005 年全国油气开采业共实现利润 2920 亿元,占石油、石化行业总利润的 79%。可见油气田开发不仅向国家提供大量不可缺少的石油、天然气产品,而且是石油工业最主要的盈利来源。

油气田开发的基本概念和方法 油气田开发是一项复杂的工程学科,其中包含有众多的基本概念和各种方法。

储层的非均质性和渗流的复杂性 储存油气的储层具有非常复杂的结构,组成储层的岩石颗粒间存在着大量尺寸不同的微细、曲折的孔隙,有时储层内还有裂缝和溶洞;纵向上常由多个物性各异的砂体组成;这些砂体在横向上连通程度不一,甚至在不远处就尖灭;砂体内部物性的差异性也很大;再加上断层的切割,更增加了其复杂性。因此,储层是一种非均质的多孔介质,而油、气、水在储层中的渗流过程更是发生着各种力学、物理和化学变化的复杂过程,有其自身的规律。研究多孔介质中各种流体渗流规律的学科称渗流力学;研究岩石、油、气、水的物理、化学性质以及彼此间相互作用规律的学科称油层物理学。这是研究油气田开发的两门应用基础学科。而以数值方法求解渗流力学方程组的学科称油藏数值模拟,是研究和预测油气田开发动态变化,进行油气田开发优化决策必不可少的重要手段。

油气田开发进程中油气流动的类型 由于油气藏位于地下几百米或者几千米的深处，必须钻相当数量的油井进行开采。在地层压力及人工增压的作用下，油、气和地层水（采用注水开发时还有注入水）的流动有三个互相连接的过程：（1）依靠油层压力和井底压力间的压差推动油、气、水在油藏内向生产井的井底流动，这属于多相流体在多孔介质中的渗流。（2）油、气、水从井底沿井筒上升流到井口，在流动类型上属于多相流体垂直管流。这又可分为两种情况：一是当井底压力高于井筒内油气流动的阻力时，流体可以自行喷出井口流入地面集输管线，称为自喷方法开采；另一种情况是，当地层压力降低或采出液中含水增加，油井自喷能力减弱甚至停喷，需要采用泵抽或气举等人工举升方法采油，或称机械方法采油。（3）从井口沿地面管网流入计量站和集油站，经过油气分离、计量、脱水等处理后，原油流入输油总站转输向炼油厂，这种流动类型属水平管流或有一定倾角的管流。在总体上这三个流动过程是统一的流体动力学系统中的三个组成部分，应该从整体上进行模拟计算和优化设计，但是一般模拟计算和优化都是分段进行，以后再把它们耦合起来。无疑，这样做的结果很难保证总体方案是最优的。现在正在发展把这三个组成部分作为统一的流体动力学系统进行整体模拟计算和优化的方法。

油田开发过程中的一次、二次和三次采油方法 油、气在油气藏中进行渗流时需要有足够的能量。油田开发时如果油藏有充足的天然水驱能量供给，油藏压力可以长期保持在足够高的水平上，这种条件下的驱油称为天然水驱。天然水驱的驱油动力旺盛，原油采收率最高，是最理想的状况。但一般常常缺乏这种旺盛的天然水驱能量，此时随着油藏压力的下降，溶解在原油中的天然气将逸出，并急剧膨胀而驱替原油。这种驱动方式单纯依靠原油中的溶解气能量驱动，称为溶解气驱。因为这种驱动方式油藏中能量很快衰竭，也称衰竭式开采，原油采收率很低，一般只能达到 10% ~ 15% 上下。因此，当油藏没有充足的天然能量供给时，为了充分利用资源，人们常采取人工注水的办法补充能量来提高原油采收率。一般采用注水的办法采收率可以提高到 30% ~ 40% 上下，所以现在用注水方式来开发油田已经非常普遍，中国采用注水方式开采的产量占总产量的 85% 左右。

视注水时机和作用机理的不同，大体又可分为早期注水保持地层压力和二次采油两种方法，其主要区别在于前者避免采用溶解气驱的方式采油，在开发早期就开始注水；后者在早期先利用溶解气驱开采油藏（称一次采油），达到衰竭状态以后再进行人工注水，即称为二次采油。由于二次采油方法在油田开发初期可以少投资，先依靠天然能量多采一些油，经济效益较好，所以在 20 世纪 20—40 年代普遍采用二次采油的方式开采。直到 40 年代末，苏联开始在杜马兹（Туймаз）油田实行边外早期注水保持压力的做法。经实践证明这样做虽然要提前投入注水工程所需的资金，但早期补充能量，油层压力长期保持高水平，产量能够较长时间高产稳产，采收率也高。所以，后来苏联和中国基本上都采取了早期注水的做法，美国埃克森（Exxon）石油公司在 20 世纪 70 年代新发现的杰伊（Jay）大油田也基本上实行了早期注水，代表了当时国外注水开发方式的发展趋势。人们在总结早期注水经验的基础上，又相继提出了一些新的做法。例如，在一定条件下可以采取在早期注水以前允许油层压力适度的下降，可以在一定程度上对天然能量加以利用。又如，

对低渗透特别是特、超低渗透油藏进行超前注水，以避免或减少储层压敏性的影响，有利于提高这类油藏的开发效果，应该说这是中国在注水开发技术方面的发展和革新。

注水以后，虽然采收率一般可以提高到 30% ~ 40%，但是油藏内还残留很多原油。为了进一步提高原油采收率，对于常规原油，视具体地质条件和驱油剂材料来源不同，可以采取注气混相驱油（包括注入诸如二氧化碳、烃类气体、烟道气、氮气等）和在水中添加化学剂（包括聚合物、表面活性剂、碱等）驱油，以及微生物驱油等方法，或者这些方法的联合应用。一般为了有别于被称为二次采油的注水技术，常称这些方法为三次采油技术，或称为提高采收率新技术。

对于在油层温度下难以流动的稠油（国外一般称重油），则常采取注蒸汽或火烧驱油等热力方法进行开发。

气田开发以定容衰竭式开发采收率最高，不需要注水补充能量。气田开发一般不需要注水补充能量，这是与油田开发的一个根本性的差别。由于天然气的密度非常小，水的侵入使气井的生产压差急剧减小而导致产量大幅度降低，甚至使气井水淹而关井。因此，需要及早采取排水采气的工艺技术，减少水侵的危害。另一方面，由于气体为非润湿相，而水是润湿相，因此水非常容易沿裂缝或高渗透带突进，把大量天然气分割和圈闭起来，降低气藏的采收率，所以不存在边、底水的气田以定容衰竭式开发方式的采收率为最高，常可达到 80% ~ 90% 以上，而水驱气田的采收率一般只有 35% ~ 65%。因此，为了提高气田的采收率，非但不需要进行注水等人工措施，而且对于有边、底水的气藏，还要千方百计地防止水的入侵，这是气田开发和油田开发很大的一个不同点。

对于凝析气田的开发则还另有特点。由于凝析气田开发时凝析油将会随着压力下降而析出，导致采收率下降。所以，为了提高凝析油的采收率，对于凝析油含量高的大型凝析气田常要进行注气保持压力，以避免凝析油的损失。很明显，这又是另一种作用原理了。

油气田开发的长期性和阶段性。一个油田或气田投入开发以后，具有十分漫长的开采周期。中国玉门老君庙油田从 1939 年发现至今，经历了长达 60 余年的开发历程，虽然现在早已处于开发后期，但经采取各种开发调整措施后，至今仍在正常生产。

然而在这漫长的开采周期中，油气田的开发状况并不是一成不变的，往往呈现出阶段性的动态变化。重要的是在不同的开发阶段应该采取不同的对策，这一点在注水开发油田尤为明显。下面就以注水油田开发为例来加以说明。

由于中国陆相油田在层间、平面和层内所存在的复杂非均质性，注水以后注入水的推进非常不均衡，使油田内部各油层、各部位原油被驱替和储量被动用状况出现差异。随着含水的上升，油田内油水不断重新分布，这种储量动用状况的差异性也在不断变化，呈现出不同的矛盾和动态特征，形成开发过程的阶段性。一般注水开发油田随着含水和产量的变化，常分成无水期、低含水期（含水小于 20%）、中含水期（含水 20% ~ 60%）、高含水初期（含水 60% ~ 80%）、高含水后期（含水 80% ~ 90%）、特高含水期（含水大于 90%）等开发阶段。每个开发阶段随着地下水分布状况的不同，其开发动态特征也有很大不同。因此，油田的合理开发，需要预测油田动态

变化状况，及时采取相应的开发对策，保障油气田生产的持续发展。例如，什么时候开始进行层系井网调整或者采用提高采收率技术，就需要根据油田的实际地质条件和动态变化特征进行细致的研究和分析后才能及时决策。

油田开发工程是复杂的系统工程，需要多学科协同，综合集成。为了使油气田开发能够达到资金投入少，采收率高的目标，需要综合运用地质、地震、测井、油藏工程、数值模拟、钻井工程、采油工程、地面集输工程，以及经济管理等多项学科和技术，进行有机的协同和集成，而且这个过程还受到油价、各国的经济政策等外来因素的影响，因此油气田开发工程是一个开放的复杂大系统。

由于油、气处于地下的各种圈闭内，必须依靠地质研究来搞清楚油气藏的构造形态、储层展布和物性参数，以及其中所含流体的性质，才能够经济、有效地开发好油气田。因此，搞好地质研究是开发好油气田的重要基础。又由于油气藏深埋地下，只能依靠地震和测井技术来对油气藏进行探测，以获得油藏描述所必需的各项信息和资料。地震技术是探测和落实地下构造位置、形态，以及储层展布状况的必不可少的技术手段，近年来地震新技术正在向探测储层物性变化和含油气状况，以及监测驱替前缘的方向发展。测井技术是另一项描述油气藏的重要手段，测井资料解释是识别油、气、水层，确定油、气、水界面及计算储层物性参数的有效技术。通过地质、地震和测井技术的综合研究进行油藏描述，不断提高对油气藏的认识，建立符合油气藏实际的三维地质模型，并为有效开发油气藏提供地质基础。

油藏工程是在对油藏地质条件认识的基础上，运用油层物理学和渗流力学原理，以及油藏数值模拟技术，研究油藏动态变化规律，制定油藏开发对策的综合性工程学科。通过油藏工程的研究，不断进行油田开发动态变化的分析，制定合理的开发方案和调整方案，对油田开发的全过程进行优化，包括天然能量的利用和补充，开发层系、井网系统的建立和提高采收率措施的确定等一系列重大开发问题的优化。

油、气井是人们发现、观测和开发油气藏的必经通道。钻井工程的任务就是要优质、高效、经济、安全地钻好各种类型的油、气井。为此需要对井型、井身结构、钻井方式、固井和完井方式、钻井液配方以及油层保护方法等工艺技术进行优选。

采油工程的内容包括：把油从井底高效地举升到井口，进行压裂、酸化等有效的增产、增注措施，采用提高注水效果的分层注水工艺，修复已发生事故或损坏的开发井，以及采取各种应对复杂情况的措施，如防砂、清蜡、防垢、防腐、堵水、调剖等。这些工艺技术对于保证油、气井正常生产以及提高油、气井产量都是必不可少的。

地面集输工程是把油、气、水等井中采出的流体进行收集、分离、计量、输送、储存和初步处理的整套工艺技术。其任务是在符合环保、节能的前提下，向国家和社会提供尽可能多的合格油气商品。

对气田开发来说，也需要根据自己的特点进行各有关学科和技术的研究。其研究内容与油田开发的相应学科和技术大体相同，但也有不同的地方。例如：气藏工程一般不需要研究注水补充

能量的技术，却要研究防止边水入侵的办法等；采气工程要研究防止井口形成水合物的措施以及排水采气的工艺技术等。

为了发展上述各项工艺技术，还需要进行涉及地质、数学、力学、物理、化学和生物等各个领域的应用基础理论和方法的研究。

从上述不难看出，油气田开发确实是一个十分复杂的开放大系统，需要根据系统工程的原理来进行多学科协同，综合集成。

油气田开发的技术特点 由于油气田是一种矿产资源，其开发必然具有矿产资源开发的特点，不像制造业那样可以用同样的工艺重复进行。石油和天然气是在漫长的地质年代中生成的，具有不可再生性。油气田开发井网的钻进又是一次性的，具有不可逆性。考虑到油气田建设的巨额投资中钻井投资占的比例最大，一般要达到 50% ~ 60% 以上，因此，进行开发设计时，必须通过细致的油藏描述，加深对油田的认识，务求所设计的井网部署能够符合油田的实际，避免犯不可改正的错误。

由于石油和天然气都是流体，具有很好的流动性，因此，油气田的开发和煤炭、金属等固体矿藏的开发又有明显的不同。它们的开发过程是通过油气在岩石中渗流状况的不断变化中实现的。因此，人们不必要像开采煤炭或金属矿藏等固体矿藏那样直接到地下的工作面上去进行开采，而是在油气藏描述的基础上，通过其井网系统、压力系统等（对油田来说还有注采系统）的变化间接加以调控，还要在油气渗流过程中不断通过各种测试仪表来检测它的动态变化，并应用油藏工程方法、气藏工程方法和数值模拟技术预测其今后的变化趋势，最后在这些工作的基础上来制定开发对策，采取相应的技术措施。

天然气和原油虽然同属流体，但天然气与原油相比黏度要小 2 ~ 3 个数量级，流动性要好得多，在常温、常压下体积也大得多，所以其输送条件不像原油那样可以使用更为广泛的常规运输工具，如火车、汽车、船舶等。一般情况下主要使用管道输送到各个用户。储存条件除了专门的地下储气库以外，一般都难以用常规的储罐进行工业规模的长期储存，用户必须在天然气输到以后很快用掉。因此，天然气工业体系一个显著的特点就是上游气田开发、中游输气管道和下游用户形成非常紧密的产业链，必须一体化同步建设，良性互动。

同理，由于上述天然气的特性，气井开采时渗流速度要比油井大得多，以至经常出现紊流的流态，在油田渗流计算中所忽略的惯性项，在气田的渗流计算中却不能忽略，因此，其渗流方程具有非线性项，计算更为复杂。此外，有开采价值的气藏其渗透率下限远低于油藏，气井的井距也比油井井距大得多，一般可达 1km 以上，这些也都是气田开发的重要特点。还有，天然气还具有易泄漏、易燃、易爆等不安全因素，且常含有 H_2S 及 CO_2 等有毒或导致腐蚀的组分，所以气田开发时必须高度重视安全和环境的要求，一旦疏忽大意，常造成严重的恶性事故。

由于油气具有良好的流动性，随着油气藏各处压力的变化，油气可以在油气藏内各井间流动。因此，油气田的开发不能以个别油井作为开发对象，而应该以整个油气藏为对象，总体部署优化的开发方案。考虑到在油气田开发建设中钻井投资占的比重最大，地面建设的工作量和投资

额又常和井数相关联，井的钻进还具有一次完成的不可逆性，因此，在确定开发方案时对井网、井距的部署必须通过认真的油藏描述及周密的计算，对多个方案进行对比、优选。

由于油气所在的储层具有十分复杂的非均质性，人们又不能直接到油气层内去进行观察，只能依靠相隔数百米甚至上千米远的油气井的少量岩心和各种测试手段所得到的资料的解释来认识油藏。无疑，对油气层的认识不可避免地带有很大不确定性。因此对油气藏的认识，不可能一次完成，只能在实践—认识—再实践—再认识的过程中不断加深。中国的储层属陆相沉积，非均质尤为严重，更需要通过不断的实践和认识，逐步加深对油藏的了解，只有在这个基础上才有可能制定正确的开发对策。

油气田开发原则 根据中国几十年来油气田开发方面的经验，并参考国外的情况，合理开发油气田总的原则应该是：通过不断深化对油气田地质特征和开发特征的认识，优化开发对策，以尽可能少的资金投入获得好的经济效益和尽可能高的最终采收率。

准确计算储量，保持合理的储采比 储量是油气田开发的物质基础。储量的多少既是决定油气田开发建设规模最重要的依据，这牵涉到巨额资金投入的合理性，又是油气田能否在较长时期内持续发展的基础。对于储量，必须实事求是地认真计算、核实，才能真正成为合理开发油气田的基础和出发点。

储采比是一个国家、一个油气区，或者一个油气田的剩余可采总储量和产量的比值。它的大小标志着该国家、该油气区或该油气田在较长时期内以一定产量供应油气和持续发展能力的大小。对油气开发来说，应当有一个合理的储采比。一般对一个国家来说，希望储采比高一些，油气可以在较长时期内稳定供应，并且有较富裕的持续发展能力；对一个油区，希望储采比可以稳定在一个相对高一点的数值，能够在合理的产量下尽量避免大起大落；而对一个油气田来说，对应于动用储量的储采比实际上就是剩余可采储量采油速度的倒数，则一般应尽可能接近其合理值。

对一个气区来说，由于天然气的开发具有上、中、下游一体化建设的特点，为了确保向下游用户长期稳定供气，储采比应保持较高的水平，一般要达到 (20 ~ 30) : 1 的水平。

提高资源的利用效率，获得尽可能高的采收率 依靠目前所采用的工艺技术最终所能采出的油气总量占其储量的百分数就是它的最终采收率。一般常用的“采收率”的名词，指的就是最终采收率。采收率的高低标志着不可再生的宝贵油气资源的可利用程度。从实际资料来看，油田采收率高的可达到 50% ~ 60%，低的只有 10% ~ 20%；气田采收率高的可达 80% ~ 90%，低的也只有 30% ~ 50%。因此，为了避免大量油气资源遗留在地下，在油气田开发过程中，千方百计地提高采收率就成为合理开发油气田的一条重要原则。

影响油气田采收率高低的因素很多，大体上可以分为油气田的天然地质条件和人工措施两大方面。天然地质条件包括油气田的非均质状况、油气的物理性质等，这是不可改变的客观条件。人工措施是指人们为了更合理地开发好油气田所采取的各种开发措施，如开发方式、井网系统以及各种工艺技术措施，这是人为可以施加影响和控制的因素。因此，从油气田开发一开始，就要采取各种能够经济、有效地提高采收率的措施。当然，正如前面所指出的，油田和气田的开发特

点是不同的，应该按照各自的特点和要求采取相应的对策和措施来尽可能提高采收率。

取得尽可能好的经济效益，同时还要承担国家和社会责任。考虑到中国的市场经济具有社会主义性质，油气田开发企业在获得尽可能高的经济效益的同时，还要承担对国家和社会的责任。除了向国家和社会提供尽可能多的优质油、气商品以及从爱护国家资源的角度出发提高油气采收率以外，还要重视节能降耗、减少温室气体的排放、防止污染环境以及安全生产、提高职工健康水平等，其中有些与增加企业经济效益是一致的，有些即使要增加投入，影响企业经济效益的增加，也要努力去实施。

不断深化对油藏的认识和描述，进行油气田开发全过程的系统优化。一个油气田的开发从发现开始到最后废弃往往要经过几十年或者上百年的历程，这个全过程中一直贯穿着认识油藏和正确开发油藏的矛盾。由于油气藏深埋地下，又具有极为复杂的非均质性，虽然可以依靠所钻的井或地震技术获得很多信息，但井间常相隔数百米，地震资料也受到精度的限制，因此，对这种复杂的地质条件的认识不能不具有很强烈的不确定性。在油田开发早期，由于探井数量有限，资料很少，这个问题就更加突出。另一方面，油气田开发决策包括驱动方式、开发层系、井网井距、产能和开采速度等一系列重大问题的确定，无不涉及投入资金的多少、开发效果的好坏，以及资源利用程度的高低；而且这些决策的实施，又具有不可逆的特点。应该看到，正确的开发决策来源于对油气田复杂地质条件和非均质性的正确认识，因此对油气田地质条件认识的不确定性也必然带来决策的不确定性。在这种情况下，一方面要努力加强油气藏描述，尽量减少对油气藏认识的不确定性，另一方面就必须对开发中重大问题的决策进行优化，力求所做出的决策能够尽可能科学和合理，避免犯不可改正的错误。

油气田开发的经验表明，油气田合理开发的全过程处于一种实践—认识—优化—再实践—再认识—再优化的不断循环中，最终使油气田开发的全过程达到最优，我们应该遵循这个原则来制定合理的开发程序，进行开发决策。

不断进行科技创新，形成和完善油气田开发的技术系列。从历史上看，油气田开发的发展史实质上就是科学技术的发展史。从手工劳动到机械化生产，从单井无序开采到油田整体优化开发，以及各种开发新技术，如三维地震技术、三次采油提高采收率技术、热采技术、水平井和复杂结构井等技术的提出、发展和应用，都极大地推动了油气田开发水平的提高。应该看到，中国虽然发展和应用了大量新技术，取得了很好的成效，但真正意义上的原创性技术还很少，故应加大技术创新的力度，鼓励和支持原始创新技术的提出和发展。

油气田类型很多，具有自己独特的地质、开发特征。油气田开发又是一个复杂的系统工程，要开发好油气田，单纯依靠单项先进技术还不够，必须针对该油气田的地质、开发特征，集成和应用包括引进、消化再创新技术在内的各种先进的、适用的技术，形成并逐步完善技术系列。

油气藏的类型及各类型的基本特征、开发特征和技术对策。国外投入开发的油田绝大多数是海相油藏，全球大约有 42% 的石油储量和 25% 的天然气储量分布于碳酸盐岩储层中，特别是波斯湾盆地、苏联的滨里海盆地、美国的二叠盆地和加拿大的西加拿大盆地等。另一方面，在中国、

中亚、蒙古、巴西、巴基斯坦、哥伦比亚、澳大利亚等国家及地区的一些盆地，相继在陆相地层中也发现了油气田或油气显示。其中中国是世界上发现陆相油藏最多、储量最大的国家，截至2004年底，中国原油地质储量的91%为陆相油藏。

从已开发的油气藏类型来看，有裂缝性碳酸盐岩油气藏，中高渗透多层砂岩油气藏，低渗透砂岩油气藏，复杂断块油气藏，火成岩油气藏，变质岩油气藏，砾岩油藏，稠油、轻质油、凝析油气藏和酸性气藏等。

陆相油藏与海相油藏相比有一些共性，但其地质特征（包括油气藏圈闭类型、储层特征、流体性质等）有很多不同的地方，开发特征和开采技术也有很大的区别。一般来说，陆相储层的非均质性比海相储层严重得多，原油的油质也较重，黏度偏高。

中国油田的储层主要是内陆河流—三角洲或冲积扇—扇三角洲的碎屑岩沉积。这类储层的油气田储量约占已开发储量的90%，其地质特征为：

(1) 砂体规模小，分布零散，平面上连通差，而且颗粒分选差，孔隙结构复杂，非均质严重；

(2) 油田纵向上油层多，层间差异很大；

(3) 油层内部纵向上非均质也很严重，各层段间物性相差很大；

(4) 断层比较多，尤其是渤海湾地区断层极为发育，油田被切割成许多大小不等、物性各异的断块；

(5) 多数为石蜡基原油，含蜡量高，黏度较大，一般约为 $10 \sim 50\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，属中质油，也有一批油田为重质稠油，甚至特稠油和超稠油，还有不少轻质挥发油藏和凝析油气藏；

(6) 大多数油田天然能量不足，很少具备活跃天然水驱的条件，需要注水补充能量。

中国油田的主要开发特征可以归纳为：

(1) 多油层和砂泥岩薄层间互，必须实施分层开采；

(2) 多数油藏边水不活跃，必须实施早期人工补充能量；

(3) 原油黏度偏高，决定了注水开发时，高含水阶段仍是一个重要的开采阶段；

(4) 储层复杂的非均质性，导致较低的采收率，预示着发展改善水驱和三次采油等提高采收率技术是必行之路；

(5) 断层在注水开发中普遍起遮挡作用，对于复杂断块油藏，必须采用“滚动勘探开发”的开发程序。

中国油田的主要开采技术系列包括：

(1) 早期分层注水、分阶段逐步综合调整的技术系列，是中国陆相油田应用广泛的开发技术；

(2) 三次采油技术中化学驱提高原油采收率技术系列符合中国的地质条件，已大规模应用，改善水驱技术正在发展中；

(3) “地震先行、整体解剖、重点突破、跟井对比、及时调整、分批完善注采井网和逐步滚