



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向 21 世纪 课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

石油工程

(第二版)

陈涛平 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

0800223

TE-43
011

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

石油工程

(第二版)

陈涛平 主编



石油大学

0804545

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在《石油工程》第一版的基础上修订的,既保证了石油工程理论的系统性和完整性,又推陈出新,结合油田生产实际和最新工艺技术的应用,更新、增补了内容,使本书更具先进性和适用性。本书内容包括油气田开发设计、石油钻井、固井与完井、采油与注水、油水井维护与油气层保护、油田开发动态分析与调整等石油工程领域的基本内容、基本概念和基本原理及应用。

本书可作为石油高等院校石油工程专业及相关专业的教材,也可供油田有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程/陈涛平主编. —2 版.

北京:石油工业出版社,2011.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-8091-1

I. 石…

II. 陈…

III. 石油工程—高等学校—教材

IV. TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 209262 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)64523574 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 3 月第 2 版 2011 年 3 月第 9 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:35.75

字数:914 千字

定价:54.00 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

第二版前言

普通高等教育“九五”国家级重点教材暨面向 21 世纪课程教材《石油工程》，2000 年 2 月由石油工业出版社出版，2000 年 6 月获中国石油天然气集团公司优秀教学成果一等奖，2002 年 10 月获中华人民共和国教育部颁发的全国普通高等学校优秀教材二等奖。

《石油工程》一直是东北石油大学石油工程本科专业的主干课教材、油气井工程和油气田开发工程硕士研究生入学考试的指定教材，也曾被中国地质大学(武汉)作为石油工程专业的主干课教材，它为东北石油大学《石油工程》校级优质课、省级精品课、国家级精品课的建设以及石油与天然气工程国家一级重点学科的建设奠定了坚实的基础。《石油工程》作为高等院校石油天然气类规划教材，自 2000 年 2 月出版以来共印刷 8 次，已销向全国 10 多个油田的工程技术人员，收到了良好的效果。

为了适应近年来石油工程技术的飞速发展，根据《石油工程》教材使用过程中的情况，听取任课教师和学生的意见及建议，2005 年底开始组织有关人员对《石油工程》的有关内容进行更新及补充完善，以满足石油工程专业主干课程的教学需要。2006 年 8 月《石油工程(第二版)》被正式批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材进行建设。

《石油工程(第二版)》的修订原则是：保持《石油工程》第一版的体系，保证教材内容的系统性、完整性；坚持推陈出新，对第一版中的相关内容进行更新、增补及删改，保持教材内容的先进性；满足教学需要，对第一版中不够完善的部分，重新编写，保证教材的适用性；严格执行标准化及理论联系实际的原则，以培养学生的科学素养和分析解决实际问题的能力。

本书是在《石油工程》第一版的基础上修订的，是东北石油大学石油工程学院全体教师多年来教学科研实践中集体智慧的结晶。本书第一、二、十八至二十章由殷代印负责制定修订大纲，第三至第九章由李士斌负责制定修订大纲，第十至第十七章由陈涛平负责制定修订大纲。具体参加本书修订工作的有陈涛平(第一章一、二、五、七节、第九章四至六节、第十、十一章、第十三章五至七节、第十四章四节、第十五章三、四节、新编写绪论及第十七章)、殷代印(第一章一、三、六节及第二十章、新编写第十九章)、王立军(第一章二、四、五节)、张继成(新编写第二章)、张景富(第三、四、六章)、孙玉学(第五章)、李士斌(第七章四节、第九章二、三节)、毕雪亮(第七章)、范振中(第八章、第九章一节)、王常斌(第十二章、第十三章一至四节)、曹广胜(第十四章、第十六章)、夏惠芬(第十五章一、二节)、吴景春(第十八章)。全书由陈涛平任主编并统稿，殷代印、李士斌任副主编。

为了保证教材内容的系统性和完整性，本教材的总体内容可能超过了某些院校教学计划规定的学时数，对此，建议授课教师在使用本教材时可根据教学大纲进行选讲，必要时对部分内容可指导学生自学。

在本教材的编写及修订过程中，得到了东北石油大学石油工程学院许多师生的帮助与支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误之处在所难免，诚恳欢迎使用本教材的师生和广大读者给予批评指正。

编 者

2010 年 12 月

第一版前言

石油工程专业是在原钻井工程、采油工程和油藏工程三个专业的基础上重新构建的,为了满足石油工程专业主干课——石油工程的教学需要,在“石油行业类主干专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”项目中“石油工程专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”专题组的支持下,根据石油工程专业人才的培养目标,经过充分调研及专家论证,于1996年6月拟定了“石油工程”教材编写大纲初稿,后经修改、完善,“石油工程”教材被正式批准作为普通高等教育“九五”国家级重点教材进行建设。经过全体编写人员的不懈努力,于1997年编写出《石油工程》初稿,并作为讲义在大庆石油学院石油工程专业九五级试用;在试用的基础上进行了认真修改,修改后的第二稿又在石油工程专业九六级试用;后经再次修改和审定,被定为面向21世纪课程教材。

在《石油工程》的编写过程中,努力贯彻“少而精、广而新”的原则,将石油工程领域中原钻井工程、采油工程和油藏工程三个专业的知识有机地结合起来,构建了新的教材体系,使其既避免了原三个专业教材之间的重复,又填补了它们之间的空白,同时注重了有关内容的相互渗透和融合,提高了其综合化程度,从而使本教材具有较强的系统性、完整性。考虑到石油工程专业人才培养方案中,将工艺流程及常规工程设计分别设置在生产实习及“石油工程”课程设计两个实践教学环节中学习,因此,本教材重点介绍石油工程的基本内容、基本概念和基本原理,使学生通过本课程的学习,掌握石油工程领域中广泛应用的工艺技术及其基本原理,从而为后继专业选修课的学习以及未来从事石油工程技术与工程管理工作奠定坚实的专业基础。

本教材是在大庆石油学院胡靖邦和陈涛平的主持下开始进行编写的,其中第一章由宋洪才编写、第二章由张景富编写、第三章由李子丰编写、第四章由孙玉学编写、第五章由张景富编写、第六章和第七章由刘永建编写、第八章和第九章由陈涛平编写、第十章由王常斌编写、第十一章一至四节由王常斌编写、第十一章五至七节由陈涛平编写、第十二章由赵子刚编写、第十三章一至二节由夏惠芬编写、第十三章三至四节由陈涛平编写、第十四章由赵子刚编写、第十五章由王立军编写、第十六章和第十七章由张丽因编写。全书由陈涛平统稿。

在编写、试用及修改过程中,一直得到大庆石油学院翟云芳教授、张建群教授、李邦达教授及石油工程系许多教师的指导与帮助,同时还得到大庆油田许多工程技术人员的帮助与支持,在此一并表示感谢。

西安石油学院李湟教授和周春虎教授分别审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见,给了编者极大的帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编写人员水平有限,书中错误之处在所难免,诚恳欢迎使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编 者

1999年10月

目 录

绪 论	(1)
第一章 油田开发设计基础	(4)
第一节 油田开发方案的主要内容与编制流程	(4)
第二节 油田合理开发程序	(8)
第三节 油田开发方式及其选择	(14)
第四节 多油层油田开发层系的划分与组合	(18)
第五节 砂岩油田注水开发	(20)
第六节 油田开发井网部署	(24)
第七节 油田开发方案的经济评价及优选	(29)
习 题	(36)
参考文献	(36)
第二章 油田开发指标理论计算方法	(37)
第一节 行列注水开发指标计算	(37)
第二节 面积注水开发指标计算	(48)
第三节 底水锥进开发指标计算	(55)
习 题	(60)
参考文献	(61)
第三章 钻井岩石力学基础	(62)
第一节 岩石的力学性质	(62)
第二节 岩石的研磨性与可钻性	(74)
习 题	(75)
参考文献	(76)
第四章 钻 头	(77)
第一节 刮刀钻头及其破岩原理	(77)
第二节 牙轮钻头及其破岩原理	(80)
第三节 金刚石材料钻头及其破岩原理	(87)
习 题	(93)
参考文献	(94)
第五章 钻井液	(95)
第一节 粘土基本知识	(95)
第二节 钻井液性能及调控	(99)
第三节 常用钻井液简介	(103)
习 题	(113)
参考文献	(114)
第六章 钻进参数优选	(115)

第一节	影响钻进速度的主要因素	(115)
第二节	钻进参数优选	(122)
第三节	水力参数的优选	(126)
习 题		(138)
参考文献		(138)
第七章	井眼轨道设计与控制	(139)
第一节	井眼轨道设计的原则和方法	(139)
第二节	钻柱受力分析及设计	(148)
第三节	定向测量及计算	(154)
第四节	井眼轨道控制	(159)
第五节	短曲率半径水平井、径向水平井钻井系统简介	(171)
习 题		(175)
参考文献		(176)
第八章	油气井压力预测与控制	(177)
第一节	地层压力及其预测	(177)
第二节	地层破裂压力及其预测	(183)
第三节	地层—井眼系统的压力平衡	(186)
第四节	溢流的侵入及检测	(189)
第五节	溢流的控制	(193)
第六节	压 井	(197)
习 题		(203)
参考文献		(204)
第九章	固井与完井	(205)
第一节	井身结构	(205)
第二节	套管柱设计	(212)
第三节	注水泥技术	(224)
第四节	完井方式	(233)
第五节	射 孔	(240)
第六节	试 油	(244)
习 题		(247)
参考文献		(247)
第十章	油气井的基本流动规律	(248)
第一节	油气井流入动态	(248)
第二节	油气井生产系统的气液两相管流	(267)
第三节	嘴流动态	(277)
习 题		(279)
参考文献		(280)
第十一章	自喷采油及节点系统分析	(282)
第一节	自喷采油	(282)
第二节	节点系统分析	(285)

习 题	(290)
参考文献	(290)
第十二章 有杆泵采油	(291)
第一节 系统组成及泵的工作原理	(291)
第二节 抽油机的悬点运动规律	(294)
第三节 抽油机悬点载荷计算	(297)
第四节 抽油机的平衡计算	(302)
第五节 抽油机曲柄轴扭矩及电机功率计算	(304)
第六节 影响泵效的因素及提高泵效的措施	(310)
第七节 有杆泵采油系统选择设计	(314)
第八节 抽油泵工况分析	(317)
第九节 有杆泵系统设计计算的 API RP 11L 方法	(322)
习 题	(326)
参考文献	(327)
第十三章 其它人工举升方法	(328)
第一节 潜油电泵采油	(328)
第二节 螺杆泵采油	(335)
第三节 水力活塞泵采油	(341)
第四节 射流泵采油	(345)
第五节 气举采油	(349)
第六节 排水采气	(355)
第七节 人工举升方法的优选及组合应用	(358)
习 题	(364)
参考文献	(365)
第十四章 注 水	(366)
第一节 水质、水处理及注水系统	(366)
第二节 分层注水	(374)
第三节 注水井分层测试	(381)
第四节 注水井调剖	(385)
习 题	(388)
参考文献	(388)
第十五章 油水井增产增注措施	(390)
第一节 水力压裂	(390)
第二节 酸 化	(413)
第三节 高能气体压裂	(425)
第四节 物理法增产增注技术	(429)
习 题	(435)
参考文献	(436)
第十六章 复杂条件下的开采技术	(437)
第一节 防砂与清砂	(437)

第二节	防蜡与清蜡	(441)
第三节	找水与堵水	(444)
第四节	稠油开采	(447)
第五节	防垢与清垢	(454)
第六节	腐蚀与防腐	(458)
习 题	.....	(463)
参考文献	.....	(463)
第十七章	油气层保护	(464)
第一节	油气层损害机理	(464)
第二节	油气层损害评价	(465)
第三节	保护油气层技术	(470)
习 题	.....	(483)
参考文献	.....	(484)
第十八章	油田开发动态分析方法	(485)
第一节	产量递减规律方法	(485)
第二节	水驱规律曲线方法	(494)
第三节	系统辨识方法	(502)
第四节	物质平衡方法	(505)
第五节	天然水能量分析方法	(514)
习 题	.....	(523)
参考文献	.....	(523)
第十九章	剩余油分布研究方法	(524)
第一节	剩余油研究概述	(524)
第二节	研究剩余油的地质方法	(528)
第三节	研究剩余油的井点测试方法	(532)
第四节	研究剩余油的数值模拟方法	(538)
习 题	.....	(545)
参考文献	.....	(545)
第二十章	油田开发调整	(546)
第一节	油田开发调整的必要性及内容	(546)
第二节	开发层系调整	(552)
第三节	注采系统调整	(554)
第四节	井网加密调整	(558)
习 题	.....	(563)
参考文献	.....	(563)

绪 论

石油是不可再生的宝贵资源,它不仅在能源、交通方面支撑着工业化的进程,而且在化工等各个方面也起着举足轻重的作用,因此被称为“工业的血液”。石油工程的主要任务是利用各种科学的工艺技术,经济、合理地将深埋于地下岩层内的油气资源最大限度地开采到地面,从而满足国民经济日益发展的需求。石油工程是一个复杂而庞大的系统,它包括了石油工业上游的各个方面,其基本内容十分丰富,主要有下述几个方面。

一、油气田开发设计

一个含油气构造经过初探发现其具有油气流以后,紧接着就要进行详探并逐步投入开发。因此,石油工程技术人员需要依据详探成果和必要的生产性开发试验,在综合研究的基础上,对具有工业价值的油气田,从油气田的实际情况和生产规律出发,进行油气田开发设计,制定出合理的开发方案。为此,应在对油气藏及其流体进行深入研究的基础上,对油气田开发的各项技术及经济指标进行充分论证,对各种可能的开发方案,采用解析或数值模拟方法,利用电子计算机进行计算,求得不同开发年限的投资、产量、收益等,为最终的科学决策提供依据。

二、钻井

油气资源通常都埋藏在地下深处的岩层内,为了开发这些油气资源,人们必须从地面或海底建立一条条直达地下油气藏的密闭通道——钻油气井。

钻井的目的是破碎地下岩石形成井筒。由于地下岩石具有相当大的硬度及强度,欲破碎其形成井筒,既要选择先进的破岩方法及高性能的破岩工具,又要保证井壁的稳定。为此,需要对地层岩石的工程力学性质及其影响因素进行研究,从而有的放矢地采用破岩方法及工具。

在目前广泛采用的旋转钻井中,钻头是破碎岩石钻凿井筒的基本工具,其性能对钻井效率具有重大影响。因此,需要根据地层岩石特性等合理选择钻头,以提高钻井效率。

在旋转钻井过程中,为了将钻头破碎的岩屑从钻柱与井筒的环形空间返排到地面,人们通过钻柱将钻井液注入井底,从而达到携带岩屑以及冷却、润滑钻头等多种功效。因此,需要根据油气井的类型及地层岩石的特点,设计合理的钻井液,以便成功地进行钻井并降低钻井费用。

地下情况的复杂性决定了钻井是一项风险高、耗资大的工程。为此,需要以地层固有参数为依据,深入研究钻进中的机械参数、水力参数、钻井液性能和流变参数对钻进效益的影响规律,并建立相应的数学模型,从而实施优选参数钻井,降低钻井费用。

由于地面条件限制及地下情况的复杂性,导致油气井有的与地面垂直,有的需要定向弯曲伸向不能垂直钻达的油气藏,有的还要在油气藏内沿一定方向水平或弯曲延伸。这就在地下的三维空间内构成了直井、定向斜井、水平井和多分支井等各种形态的油气井。为此,需要进行油气井井眼轨迹的设计与控制,使钻头在地下三维空间沿着预定的轨迹钻达目标油气层。

地下岩石及其所含流体,在钻井前通常处于压力平衡状态,钻井以后井壁岩层失去了原

有的支撑力,各种岩层内的孔隙、裂缝及其所含流体也丧失了原来的密封性。于是,有可能出现井壁垮塌、钻井液漏失、地层流体井涌甚至井喷。因此,需要深入研究地层及井壁的力学与理化特性,正确预测地层的孔隙压力、破裂压力、坍塌压力,从而有效地防止井塌、井漏和井喷等井下事故。

三、固井与完井

当油气井完钻后,为了长期维持井筒的稳定性,构建油气流的通道,要在钻成的井眼内下入套管,在套管与井壁之间的环形空间注水泥固结,而后在油气层部位进行射孔(或采用其它方式),使油气能够流入井筒,这一过程称为固井与完井,它是衔接钻井和采油的一项系统工程,其质量优劣对油气井的产量和寿命具有重大影响。为此,需要根据油气井的产量及地层与流体物性,合理设计套管柱,合理选择油井水泥、外加剂及其注入工艺,合理确定完井方式及方法,最大限度地保护油气层,获得尽可能高的油气产量。

四、采油与注水

当油气井完井后,经过诱导油气流,油气就会在油气藏压力的作用下流入井底。油气井的产量受油气藏条件、完井状况、油气物性等多种因素的影响,因此,需要根据油气渗流力学的基本理论,利用试油及生产数据,科学预测各油气井在不同井底压力下的产量(油气井流入动态),从而为后续采油系统的设计提供准确的依据。

当油气层自身的能量能够使油气通过井筒喷到地面时,则为自喷采油。自喷采油是所有采油方法中最经济的,因此为了保持自喷井高产稳产,并取得最佳经济效益,必须掌握自喷井生产系统中油气在地层渗流、井筒与地面管流及嘴流的流动规律,采用节点系统分析方法及分层开采等工艺技术,科学设计自喷井生产系统,合理控制和调节其工作方式。

当油层能量较低,不足以使油气自喷到地面时,则需要人工将气体压入井底,或将有杆泵、电泵、水力泵等下入井内,靠气体或泵的作用将原油举升到地面;有时,单纯靠一种方法还不能满足生产要求,则需将不同人工举升方法合理组合用于生产。因此,需要掌握各类人工举升方法的系统设计及分析方法,以油藏和地面生产条件为前提,在充分研究油藏生产动态、不同采油方式的生产动态以及适应性和经济评价的基础上,优选人工举升方法。

在靠天然能量进行采油之后,或油田开发早期,为了提高采收率和采油速度,常通过注水井向油层内注水保持油层压力,将油驱入井底。为此,需要确保注水过程中注入水的水质合格,减少注入水对油层的损害,降低注水能耗,实现分层注够水、注好水。

五、油水井维护与油气层保护

为了实现油气田开发目标,在油气田生产中常需要采取一系列增产增注措施来提高油气井产量或保证注入井达到注入量要求。特别是在低渗透油气田开发中,利用水力作用在油气层中压出一条高导流能力的裂缝(水力压裂)和靠酸液的化学溶蚀作用扩大油气层的孔、缝、洞(酸化)已是油田生产的基本措施。此外,以解除油井近井地带损害为主要目的的高能气体压裂及各种物理法增产增注技术也被广泛应用。因此,需要掌握各种增产增注技术措施的基本原理、工艺设计及提高措施效果的途径,并根据油层性质选择合理增产增注技术措施,从而提高增产增注技术措施的效果。

油气田开采过程中,受油气层及其流体性质与开采技术的影响,常遇到油井出砂、结蜡、出水、结垢、腐蚀及粘稠原油,从而严重影响油气水井的正常生产。为了保证在这些复杂条件下的油气水井能够正常生产,必须深入分析各种影响油气水井正常生产的原因,找出规律,并从防治机理出发,提出相应的防治工艺技术,从而维护油气水井的正常生产。

在进行钻井、采油等各种作业时,常会使油气层受到损害,进而影响油气井产量。因此,需要进行宏观及微观研究,分析各个作业环节造成油气层损害的原因和机理,从而采取一系列相应的保护油气层的技术措施。

六、油气田开发动态分析与调整

对于一个统一的水动力学系统的油气藏,其产量、压力、含水率等开发动态指标受油气藏及其流体性质、开采方式等因素的控制与制约,表现出一定的规律性。因此,需要通过系统地观察油气藏的生产动态,准确齐全地收集整理能说明生产规律的资料,在一定的理论指导下,深入分析这些资料,找出其规律,从而运用已总结出来的规律或经验公式,预测油气藏未来的动态。

随着油气田开发的不断进行,油气在地下处于不断运动的状态,了解地下油气的分布状况,对进一步的开采无疑是非常重要的。因此,需要采用地质方法、油藏工程方法、数值模拟方法等综合分析研究剩余油在地下的分布状况,并有针对性地利利用经济合理的各种提高油气采收率技术(如水驱、聚合物驱、活性剂驱、气驱、多元复合驱、热力驱等),将地下油气资源最大限度地开采出来。

油气田开发过程是一个不断认识和不断完善的过程,无论采用什么方案投入开发的油气田,随着开发的进行,人们对它的认识也将不断深入。对油气田的不断认识既是油气田改造的基础,也是油气田开发调整的依据。因此,当一个油气田投入开发并生产了一段时间后,就要及时依据已掌握的油气田生产情况,采用一切可能的技术方法,不断深化对油气田的认识,并选择适当的时机分阶段进行必要的开发调整,不断完善油气田的开发层系、井网、驱动方式、开采工艺、工作制度等,使其与油气田实际相适应。

鉴于石油工程内容的丰富性,本书重点介绍石油工程领域的基本内容、基本概念、基本原理以及典型油气田的现场实际情况。考虑到提高油气采收率原理和石油工程设计已分别单独设课,本书未介绍有关提高油气采收率和常规工程设计方面的内容。

参 考 文 献

- [1] 罗平亚,杜志敏. 油气田开发工程[M]. 北京:中国石化出版社,2003.
- [2] 胡湘炯,高德利. 油气井工程[M]. 北京:中国石化出版社,2003.
- [3] 何生厚,张琪. 油气开采工程[M]. 北京:中国石化出版社,2003.

第一章 油田开发设计基础

一个含油气构造经过初探,发现工业油气流以后,紧接着就要进行详探并逐步投入开发。所谓油田开发,就是依据详探成果和必要的生产试验资料,在综合研究的基础上对具有工业价值的油田,按石油市场的需求,从油田的实际情况和生产规律出发,以提高采收率为目的,制定合理的开发方案,并对油田进行建设和投产,使油田按方案规划的生产能力和经济效益进行生产,直至油田开发结束的全过程。

一个油田在明确的开发方针指导下,要想进入正规的开发,必须编制好油田开发方案,即依据油田开发的基础知识,对油田的开发程序、开发方式、层系划分、注水方式、井网密度、布井方式及经济指标等各因素进行充分的论证、细致的分析对比,最后制定出符合实际、技术上先进、经济上优越的方案。

第一节 油田开发方案的主要内容与编制流程

油田开发方案是使油田投入长期和正式生产的总体部署和设计,是指导油田开发工作的重要技术文件。油田投入开发必须有正式批准的开发方案。

一、油田开发方案的主要内容

开发方案设计报告应包括以下四个方面的内容:油田概况、油藏描述、油田开发方案设计、油田开发方案实施要求。

1. 油田概况

油田概况主要描述油田地理位置、气候、水文、交通及经济状况,阐述油田勘探历程和开发准备,包括地震工作量及处理技术,测线密度及成果,探井、评价井井数及密度,取心及分析化验资料数量,测井及地层测试情况,试油、试气、试水工作量及成果,试采成果及开发试验情况,并陈述油田规模、层系及类型。

2. 油藏描述

油藏描述是指一个油气藏发现后,对其开发地质特征进行全面的综合描述,为合理制订油藏开发战略和技术措施提供必要和可靠的地质依据和地质模型。

油藏描述可分成:储层的构造,储层物性的空间分布,储层内流体的分布及其性质,渗流物理特性,油藏天然能量。

(1) 储层的构造

储层构造特征形态描述包括:

- 1) 构造类型、形态、倾角、闭合高度、闭合面积。
- 2) 断层性质、条数、分布状态、密封程度、断层要素。
- 3) 划分油层组,描述其岩性及分布状况。
- 4) 划分沉积相带,描述沉积类型、砂体形态、砂体分布状况等。

5) 分层组描述储集层埋藏深度、储层总厚度、砂岩净厚度及有效厚度、单层层数、分布状况、单层砂岩厚度及有效厚度。

(2) 储层物性的空间分布

储层物性的空间分布描述包括：

- 1) 有效孔隙度、渗透率、原始含油饱和度、压缩系数、导热系数。
- 2) 非均质性描述，包括层间非均质性、平面非均质性、层内非均质性。
- 3) 描述储集层的矿物组成及微观孔隙结构，包括孔隙类型、孔喉形态、粘土矿物组分、含量及分布。
- 4) 描述隔层或夹层的岩性、厚度分布、渗透性、水敏性及隔层或夹层在开发中的作用。
- 5) 储集层水敏性、酸敏性、速敏性、盐敏性及碱敏性的分析评价。
- 6) 对储集层厚度、孔隙度、渗透率、砂体连续性、平均喉道半径等主要参数进行综合评价和分类。

(3) 储层内流体的分布及其性质

储层内流体的分布及其性质描述包括：

- 1) 分区块、分层系的油、气、水分布特点。
- 2) 油气界面、油水界面以及油、气、水分布的控制因素。
- 3) 油、气、水饱和度分布。
- 4) 原油的组分、密度、粘度、凝点、含蜡量、含硫量、析蜡温度、蜡熔点、胶质沥青含量和地层原油的高压物性（PVT 性质）、流变性等特性。
- 5) 天然气性质主要描述相对密度、组分、凝析油含量。
- 6) 地层水性质主要描述组分、水型、硬度、矿化度、电阻率。

(4) 渗流物理特性

- 1) 测定油层岩石润湿性、界面张力、油水及油气相对渗透率曲线、毛管压力曲线。
- 2) 测定水驱油效率。

(5) 油藏天然能量

- 1) 统计油层的原始地层压力、压力系统、压力梯度、温度及温度梯度。
- 2) 确定边水、底水、气顶的活跃程度。
- 3) 对油藏天然能量进行评价和分类。

根据油藏描述结果，计算油田地质储量。综合分析各项地质资料，建立储层静态模型。

3. 开发方案设计

在进行开发方案设计时，应考虑以下七个方面的因素：采油速度；油田地下能量的利用和补充；油田采收率的大小；油田稳产年限；油田开发经济效益；各类工艺技术水平；对环境的影响。以上因素往往是相互依赖和相互矛盾的，在开发方案设计时应统筹兼顾，全面考虑。开发方案设计的主要内容应包括下述几个方面。

(1) 确定开发方式和注水方式

在开发方案中必须明确规定开发方式以及开发方式如何转化，如弹性驱转溶解气驱、再注水或注气等。假如决定注水，应确定是早期注水还是后期注水，是采用边缘注水、切割注水还是面积注水。

(2) 确定开发层系

多油层油藏，油层间非均质差异大，若采用一套层系进行开发，层间干扰严重，开发效

果差。因此,必须正确划分和组合开发层系,每个开发层系用一套独立的井网开发。一个油田划分几套层系开发,是涉及油田基本建设的重大技术问题,也是决定油田开发效果好坏的重要因素,更是一个开发方案中的重大决策,因此必须慎重加以解决。

(3) 确定采油速度和稳产年限

采油速度是指油田年产油量与地质储量的比值。采油速度问题是一个生产规模问题,一个油田必须以较高的采油速度生产,但同时又必须立足于油田的地质开发条件、采油工艺技术水平以及开发的经济效益。总体原则是使大部分可采储量在稳产期内采出。

(4) 确定合理的井网密度和布井方式

合理井网密度是指在目前技术经济条件下,兼顾开发效果和经济效益,能够获得最大收益的井网密度。这就要求在保证采油速度的条件下,采用最少井数的井网,最大限度地控制地下储量,以减少储量损失。对注水开发油田,还必须使绝大部分储量处于水驱控制范围内,保证水驱控制储量最大。由于井网问题是涉及油田基本建设的中心问题,也是涉及油田今后生产效果的根本问题,所以除了要进行地质研究外,还应采用渗流力学方法,进行动态指标计算和经济指标分析,对各种布井方式进行综合评价,并选出最佳方案。

(5) 编制射孔方案

考虑到地层认识与实际地层间存在的矛盾,钻井和射孔两步不宜并作一步走。从钻井完成至编制出射孔方案中间要有一个对油层再认识的过程,这往往是射孔方案是否适宜的关键。在井网钻完后,首先应对油层进行再认识。内容包括:对油层分布的再认识;对油层地质参数的再认识;对底水、夹层、断层的再认识;对于调整井,还应对注水后储量动用程度统一编制射孔方案的再认识。然后根据油层地质的特点和采油速度的要求,分区、分块来确定或完善注采系统。较大的区块都必须有完整的注采系统,使绝大多数的油井尽可能做到多层、多方向收到注水效果。

(6) 确定油水井工作制度

确定油水井工作制度的核心内容是编制配产、配注方案。在油水井全部射孔以后,应进行油水井测试,核定各井及油层生产与吸水能力,然后编制油田的配产、配注方案。

在编制方法上,普遍的做法是根据国家下达的产油量指标,或油田开发设计的采油速度指标,按照地质特征和开发形成的区块或生产管理单元分配产油量指标。先按区块或生产管理单元产油量变化趋势预测其产油量指标,然后根据单井产油量的变化趋势,将产量指标落实到每口井上。根据所定的产油量指标和含水率上升速度及提高压力的要求计算年配水量。全油田或区块、井组的年配注水量确定后,可将年注水量分配到区块和各类油层中,再根据每个井组的具体情况和原注水情况,将注水量具体分配到每口注水井的每个注水层段中。

(7) 油田开发指标预测及经济评价

根据油藏地质资料设计若干个油田开发方案,每个方案都要通过油藏数值模拟计算,预测开采未来 10 a 以上的开发指标,主要包括平均单井日产油量、全油田年产油量、综合含水率、年注水量、采收率等。在预测开发指标基础上,计算各方案的总投资、单位生产成本、百万吨产能建设投资、利润总额、投资利润率、投资利税率、投资回收期、净现值、内部收益率,分析影响经济效益的敏感因素。经过综合评价油田各开发方案的技术经济指标,筛选出最佳方案。

开发方案设计中的开发方式、层系划分与组合、注水方式、井网密度、开发指标计算及

开发方案经济评价等将在后面的章节中进行详细的阐述。

4. 油田开发方案实施要求

开发方案中应明确规定方案实施要求，协调好不同生产部门的关系，予以执行。开发方案应明确下述问题。

(1) 钻井后井的投产及投注程序

在实施方案时，首先遇到的是布井方案中的注采井钻井次序问题。从钻井的程序来看，钻井可以按蔓延式和加密式进行。蔓延式既可顺着走向，也可沿着构造倾角向上或向下；既可按着切割区块钻，也可采用其它形式。从投产的时间看，既可短期一次投产，也可以逐批逐口投产；在投注方式上也可先排液后注水，也可一开始就投注，甚至先投注后投产。

以投产时间而言，是逐步投产好还是一次投产好，是全油田投产好还是局部或逐区块投产好，则要权衡其利弊。对于逐步投产，从经济效益来看，对油田快速形成生产能力、回收资金是有利的，对油田地质条件较清楚的情况是适宜的。然而，对于非均质油藏，地质规律尚未掌握清楚，往往由于主客观的矛盾，很容易造成注采系统的不完善，不能发挥注水作用，使油田生产达不到预期的指标，造成后来生产被动的局面，不得不对方案进行大调整。但是，同时投产又势必造成资金周转太差，使当前经济效益降低太多，或者满足不了国家对产量的需要。因此，需要很好地进行分析研究。

(2) 开发试验的要求与安排

在进行开发方案设计时，可能会发现有些重大问题一时难以做出决策，或者有些问题的后果不清楚等。对此，可以通过在油田开辟开发试验区来研究解决。这种做法对于大中型油田尤为重要。因为一个油田的开发过程很长，而认识上又存在着主客观的矛盾，于是，采取开辟油田试验区及试验项目，用“解剖麻雀”的方法来指导全局，可避免仓促决定、全面铺开造成的开发失误。

大庆油田开发初期曾进行了大量试验。1960年在油田中部开辟了30 km²的生产试验区，按生产井网打井，深入研究油层的发育情况和油田开采的规律。1961年在试验区开展了10项开发试验，为合理选择井网、层系和开采方案提供经验。1963年又在中区开展“分层注水控制压差开发试验”和“加强注水、放大压差采油、油井堵水开采方式试验”，其目的是比较不同性质油层分层（段）注水和笼统注水的效果，从而总结出非均质多油层的油田必须分层调整，并进而发展了一套分层注采的工艺技术。

因此，在有条件的油田应该开辟试验区，进行开发试验，提出项目及要求，是取得油田开发主动权的有力措施。

(3) 资料录取和观察系统的要求

要想控制油田的开发过程，首先要把地下动静态参数及情况搞清楚。因此，必须在开发过程中系统地、有计划地录取资料。资料的录取包括两方面的内容：

1) 核实、检验、补充设计时尚不充分的资料，对原始的地层压力、温度、储量、油气水分布等再认识。

2) 掌握不同时期油田开发的实际动态，为采取各项开发措施提供依据。在这方面，应有系统地录取分层测试资料、找水资料以及考虑在适当时期来分析油层水淹状况、地层物性的变化、采收率等，这对注水开发的油田尤为必要。只有了解油田剩余储量的分布、油田的能量状况，才能有的放矢，解决油田存在的问题。

(4) 增产措施

增产措施是提高油水井单井生产和注水能力最主要的方法。实践表明，要取得良好的开发

效果，必须能针对实际储层情况和开发要求，优选增产工艺及方法，优选实施的技术参数。对于油田的重大增产措施，在设计中应考虑并提出要求、步骤、工作量表，以便实施。

二、油田开发方案的编制流程

前述油田开发方案设计的流程如图 1—1 所示。由流程图可以看出：编制一个油田的开发方案必然涉及多个学科，是多种技术联合协作的结果。

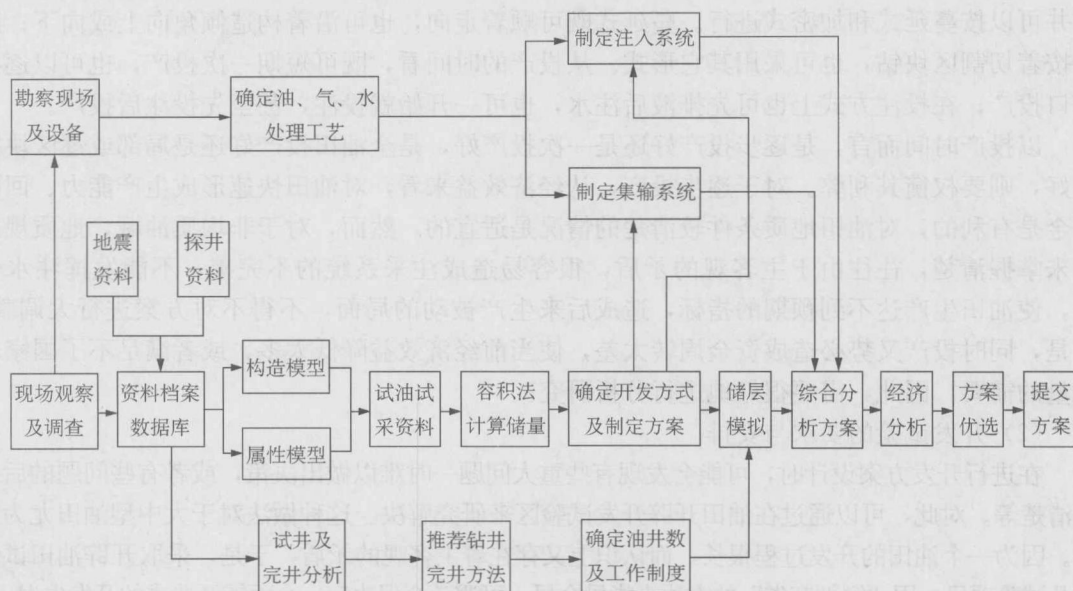


图 1—1 油田开发方案编制流程

油藏地质师根据地震资料、探井资料等，给出油藏构造、断层分布、岩性分布、孔隙度分布、渗透率分布和流体分布，绘制各种沉积相带图，收集和分析试油、试采资料，确定有效产层和开发储量。油藏工程师按照上述地质模型以及采油和地面工程师所得到的资料进行开发设计，提出方案，通过计算给出油田开发技术指标。采油工程师和地面建筑工程师与油藏工程师配合，确定各种设施和规模，设计完井方法，确定对人工举升方案的需求。经济和规划分析专家根据所得到的预期产量、设施的成本，结合对油价的预测及总的业务规划，制定出适合该油田开发的计划。

在规划和决策的过程中，核心要素是数据的管理。一个油田的开发必然需要大量的资料，这些资料应由各方面的专家使用和分享。因此，需要建立数据库来管理这些数据。

第二节 油田合理开发程序

开发程序是指油气田从评价钻探到全部投入开发过程的工作顺序和步骤。各油气田的情况不同，开发程序亦不相同。本节以整装储量油田和断块油田为例介绍油田的合理开发程序。

一、整装储量油田合理开发程序

储量集中、丰度较高的整装储量油田从勘探到投入开发的过程划分成几个阶段，合理地