



高等院校石油天然气类规划教材

海洋钻井工程

石晓兵 张 杰 王国华 © 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

海洋钻井工程

石晓兵 张 杰 王国华 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对海洋油气工程专业的知识结构要求,以海洋油气开发为主线,系统地介绍了海洋钻井工程的基本原理和工艺技术。全书共分为9章,既注重海洋钻井理论的系统性和成熟性,又兼顾了相关理论和技术的最新发展,同时理论联系实际,以增强读者的工程实践意识。

本书可作为石油高等院校海洋油气工程、石油工程、机械工程、海洋工程、安全工程、力学等专业的学生用书,也可作为海洋油气行业和陆上石油钻探及海洋工程专业等领域的工程技术人员的参考资料,或作为相关人员自学和培训的教材。

图书在版编目(CIP)数据

海洋钻井工程/石晓兵,张杰,王国华主编.

北京:石油工业出版社,2016.12

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5183-1571-0

I. 海…

II. ①石…②张…③王…

III. 海上油气田-油气钻井-高等学校-教材

IV. TE52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 259889 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里2区1号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷

787毫米×1092毫米 开本:1/16 印张:18.25

字数:467千字

定价:39.00元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

为适应我国海洋油气工业的发展,2011 年教育部审批新设“海洋油气工程”本科专业,各石油院校陆续开始招收该专业学生。为此,石油工业出版社 2012 年 4 月于西南石油大学召开海洋油气工程专业教学与教材规划研讨会,邀请国内众多石油高校的老师 and 专家,从专业建设的角度,共同规划了海洋油气工程专业系列教材。本书为其中的一本。同年 12 月,西南石油大学、东北石油大学、西安石油大学、重庆科技学院等 4 所院校的老师聚集一堂,共同研讨了《海洋钻井工程》的编写大纲,并确定编写分工,以期打造一本代表行业水准的规划教材。经过 4 年的打磨,本书终于得以面世。

本书在内容构成上涵盖了海洋钻井工程的主要内容,建立起较完整的海洋钻井基本概念和相关技术领域的原理、方法和主要技术。本书注重石油高校海洋工程专业方向的特点,采用国内外学科领域的最新材料,遵照海洋工程学科发展的规律,把握本学科发展的动态、趋势和前沿,突出本领域主流的学术和技术。本书既有系统的理论体系和自身的客观规律,又与海洋钻井工程实践相联系,即理论与实践相结合,同时适应国家海洋油气发展战略需求,符合海洋油气资源开发特殊要求的人才培养模式,能够满足为海洋石油工业培养高层次的专门技术人才的现实需要。

通过对本书的学习,学生除具备一定的工科基础理论和海洋法规基础知识外,还能熟练掌握海洋钻井专业知识,可胜任海洋钻井的设计、工程施工与技术管理等工作,具有应用研究和科技开发的基本能力,成为从事海洋石油工业的专门技术人才。

本书由西南石油大学石晓兵、张杰、王国华担任主编,由西安石油大学郭建明、东北石油大学李玮、重庆科技学院苏堪华担任副主编。具体编写分工如下:第一章、第三章、第五章、第七章由石晓兵、张杰、王国华编写;第二章、第四章由石晓兵、张杰、王国华、李玮编写;第六章、第九章由石晓兵、张杰、王国华、苏堪华编写;第八章由石晓兵、张杰、王国华、郭建明编写。全书由西南石油大学海洋油气工程研究所所长熊友明教授、中海油深圳分公司深水工程中心韦红术、张俊斌主审。

本书是在经过了西南石油大学海洋油气工程本科专业两届教学使用,并征求了中国海洋石油总公司许多相关专家的意见的基础上编写完成的。在编写过程中,参阅了相关的教材、专著和文献资料,在此,对相关作者、同仁表示真诚的感谢!

由于编写时间仓促,不足之处在所难免,希望读者提出宝贵意见。

编 者

2016年6月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 海洋油气开发概述	1
第二节 海洋钻井工程概述	7
习题	17
第二章 海洋钻井平台与装备	18
第一节 海洋钻井平台简述	18
第二节 海洋钻井装备	29
习题	50
第三章 海洋钻井工艺	51
第一节 井身结构	51
第二节 海洋钻井方法	70
第三节 两种典型海洋钻井平台的钻井程序	83
习题	90
第四章 钻井工具与钻井参数	91
第一节 钻头与破岩机理	91
第二节 钻具	101
第三节 水力参数	111
习题	122
第五章 海洋钻井液技术	123
第一节 海洋钻井环境对钻井液技术的影响	123
第二节 钻井液概述	127
第三节 海洋钻井环境下钻井液的工艺性能	130
第四节 水基钻井液体系及性能	146
第五节 油基钻井液体系及性能	155
习题	160
第六章 海洋固井工程	161
第一节 海洋固井工程概述	161
第二节 套管柱强度设计	165
第三节 油井水泥	187
第四节 注水泥	192
习题	203

第七章 海洋特殊轨迹井设计与控制	205
第一节 特殊轨迹井概述	205
第二节 定向井井眼轨迹设计	207
第三节 井眼轨迹测量计算	219
第四节 井眼轨迹控制	232
第五节 大位移井钻井技术	247
第六节 丛式井钻井技术	255
习题	258
第八章 海洋钻井井控	260
第一节 海洋钻井井控概述	260
第二节 溢流关井及关井方法选择	263
第三节 井控压井方法	266
第四节 海洋钻井的防喷器组及控制系统	273
习题	280
第九章 海洋钻井安全	281
第一节 海洋油气开发的安全管理与环境保护	281
第二节 海洋钻井安全及对策措施	283
习题	286
参考文献	287

第一章

绪 论

第一节 海洋油气开发概述

随着全球经济的复苏和不断增长,石油消费需求也不断增加,为世界石油工业带来巨大的发展机遇,同时也使全球油气勘探与开发面临更加严峻的挑战。近十年来,由于陆上油气勘探程度较高,发现油气田规模渐小,新增储量对世界油气储量增长的贡献降低。相比之下,世界海洋油气勘探开发迅速发展,不断获得重大发现,发现的油气田规模大、产能高,其油气产量占世界总产量比例不断增加,对于促进世界石油工业可持续发展、增加油气产量、保障能源安全具有重要意义。

一、海洋油气资源状况

地球表面面积为 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$, 海洋面积占 70.8%, 即 $3.62 \times 10^8 \text{ km}^2$ 。由大陆架、大陆坡和大陆隆三部分组成的大陆边缘占海洋总面积的 25%。大陆架一般是指由陆地向外延伸到水深 200m 左右的海域;大陆坡是指由大陆架向外延伸到水深 2500m 处的海域;大陆隆则是指由大陆坡再向外延伸到水深 4500m 处的海域。根据油气生成于沉积岩的正确假设,油气生成取决于沉积层的厚度。大陆边缘的沉积层厚达数千米,它们的油气潜在资源比深海海底大得多。据专家估计,海洋油气资源主要分布在大陆架,约占全球海洋油气资源的 60%,但大陆坡的深水、超深水海域的油气资源潜力可观,约占 30%。从区域看,海洋油气资源主要分布在墨西哥湾、北海、中东、西非、巴西及东南亚海域等,约占全球海洋油气资源的 60% 以上,两极大陆架也蕴藏丰富的油气资源。据估计,俄罗斯海洋油气资源的 80% 以上,聚集在其北极海区域,约 $(1000 \sim 1200) \times 10^8 \text{ t}$ 油当量。

海洋里石油和天然气的储量极为丰富。海洋石油资源量约占全球石油资源总量的 34%, 累计获探明储量约 $400 \times 10^8 \text{ t}$, 探明率 30% 左右, 尚处于勘探早期阶段。在近十年, 全世界新增加的油气田有 65%~70% 位于近海大陆架区。2001 年全球重大油气发现有 18 个, 其中 13 个位于海上。据美国地质调查局(USGS)评估, 世界(不含美国)海洋待发现石油资源量(含凝析油) $548 \times 10^8 \text{ t}$, 待发现天然气资源量 $78.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 分别占世界待发现资源量的 47% 和 46%。

近年来, 全球新增的油气发现主要来自于海上, 尤其是深水和超深水。据了解, 近年来全球重大油气发现的 70% 来自深水。另外, 寒冷的北极也是世界油气的新增长点, 预计至 2025 年, 北极地区油气年产量将达到 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量, 北极地区将成为重要的资源区域。因此, 全球海洋油气资源潜力巨大, 勘探前景良好, 为今后世界油气勘探开发的重要领域。

根据油气所在的地理位置和沿海国家海底油气产量分析,全世界海底油气资源大致可分为波斯湾、墨西哥湾、北海、马拉开波湖、东南亚近海、鄂霍茨克海、中国近海等海区。

我国近海陆架海域(未含南沙海域)发现了 17 个含油气沉积盆地,总面积达 $114 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。经资源评价,石油为 $245.6 \times 10^8 \text{ t}$,天然气为 $8.43 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。至今近海海域共发现 100 余个含油气构造和近 70 个油气田,具有商业性开采价值的油气田 40 个,其中超亿吨的油田 6 个,超千亿立方米的大气田 2 个,探明石油地质储量约 $26 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气地质储量近 $4000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。现已投产 25 个油气田,石油年产量达到约 $1800 \times 10^4 \text{ t}$,天然气约 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

我国 $488 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海域中,深水约有 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要位于南海海域。我国深海石油储量预测约 $100 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气储量约 $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$,但目前我国在深海的勘探开发面积只有约 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$,可以说是刚刚起步。而且,从现已投入开发的我国首个深水南海荔湾气田来看,其水深也仅仅是 1500m,远未至更深水处。由此不难看出,我国的深水油气田勘探开发方兴未艾,其前景灿烂,且大有可为。

二、海洋油气开发的发展历程

海洋油气开发是陆地油气开发的延续,经历了一个由浅水到深海、由简易到成熟的发展过程。1897 年在美国加利福尼亚海岸萨姆兰德,为了开发由陆地向海里延伸的油田,从防波堤上向外搭建了一座木质栈桥,在上面安上钻机打井,这是世界上第一口海上油井,它拉开了海洋石油开发的序幕。到 1900 年共钻了数十口这类的井,井位离岸仅 90~150m。1920 年委内瑞拉在马拉开波湖发现油田,油田水深 3.5~4.3m,采用木结构平台钻井和采油,原油通过管线输送到岸上处理。1930 年,苏联在里海发现油田,采用人工岛的方式钻井和采油,并建造长堤,敷设管线,将油气送到岸上,在里海共陆续建造了 45 个人工岛及 135km 的长堤。1897 年到 20 世纪 40 年代初是海洋石油开发的初始阶段,采用的是土木工程技术,主要工程设施是木结构平台和人工岛,只能在近岸的海边和内湖采油。

第二次世界大战结束后,世界经济复苏,海洋油气开发也获得发展。油气开发需要各种专门技术,海洋油气开发更是这样,包括地质研究评价技术、勘探技术、钻井技术、开采技术、输送技术及环境保护技术等。海洋油气开发所需的许多技术和装备都是从陆上设备发展过来的,但在海洋环境下,为了适应海浪冲击、海冰、风暴等恶劣环境条件,它们变得更为复杂。正是这些装备的出现推动了海洋油气开发的发展。

海洋油气开发首先是寻找油气,先通过地球物理勘探寻找含油的地质构造,再通过钻探证实是否存在油气,所以必须要有钻井装备。1947 年在美国路易斯安那州马尔根城西南 12n mile^① 的海域,有一座带有驳船的钻井平台投入使用。钻井需要的燃油、水、钻井液、钻杆及生活必需品都放在驳船上,这是首次使用的海上移动式钻井装置。由于抗风浪能力弱,它只能在较平静海域内使用。1953 年美国建成世界上第一艘移动式钻井平台“马格洛利亚号”。这是一艘自升式平台,工作水深 12m。这种类型的平台由于移动灵活、适应能力强,所以发展很快。1954 年美国建造了第一艘坐底式平台“查理先生号”,用在密西西比河河口打井。这也是一种移动式装置,下部是船体,上部是钻井甲板,用数根圆柱结构连接。1956 年浮式钻井船投入使用,它能在 30~90m 水深的海域钻井。1962 年第一艘半潜式钻井平台投入使用。该平

^① 1n mile(海里)=1.852km(千米)。

台的排水量为 9700t,工作水深可达 60~90m。从第二次世界大战后到 60 年代末的 20 多年中,海上移动式钻井装置发展迅速,全世界的拥有数达到 151 座,而且式样不断更新,得到离岸更远的海域寻找油气,推动了海洋油气勘探向大陆架的迈进。

在钻井设备发展的同时,海洋采油设备也在迅速发展,在第二次世界大战后的 20 多年里出现了各种适合大陆架开发的工程设施,保证了大陆架油田建设的需要。

1947 年美国在墨西哥湾建造了一座钢结构固定平台,由 6 个导管架组成,所在位置水深 6m,它是世界上第一座钢平台。钢平台具有安全可靠、施工方便、适应水深大等优点,所以在海上油田开发中很快就取代了木结构平台。

1955 年美国在墨西哥湾的第一个大型海上油田投产。该油田离岸 64km、水深 12m,共敷设有 75km 的管线,可把原油直接送到岸上。

1960 年美国在墨西哥湾离岸 96km、水深 30m 处的一个日产原油 360t 的油田投产,这是一组全海式的工程设施,由 3 座平台组成。这一年美国还在墨西哥湾第一次采用海底油罐,成功地应用了油水置换技术。同年,美国壳牌石油公司经过 5 年的试验,研制成功第一个水下井口,安装在 305m 水深的海域,由海底井眼、井口和采油树三部分组成。由于水下井口可通过与海底管线相接将原油采出,不需要再建生产平台,这样大大降低了海上开发工程投资。

1966 年海上第一艘浮式生产储油轮(Floating Production Storage Unit,FPSU)在墨西哥湾投入使用。它和一个称作单点系泊的装置及原有的 3 座固定平台一起,组成一套浮式生产系统。原油经海底管线和单点系泊装置送到 FPSU 上进行处理和储存。这艘 FPSU 是用旧油轮改造的,排水量为 7166t。该单点系泊装置的浮筒直径为 7.3m,用 4 根锚链固定在入泥 6m 的锚桩上。同年,波斯湾的法特油田也投产,它采用的是世界上第一个大型海上集输装置,有 3 座海底油罐,总储量为 30×10^4 t,可同时为两艘穿梭油轮(Shutter Tanker)输油。

20 世纪 60 年代末,美国、英国、法国、日本、加拿大等国都相继成立了海洋资源开发的学术研究组织,以加强对新技术的研究。为推动国际技术交流,1969 年美国举办了第一届近岸技术会议,此后每年举办一次。到了 70 年代,海洋油气开发更为活跃,全世界有 150 多个国家管辖着一定的近海地区,其中约有 80 个国家进行了大陆架勘探,海洋开发成为国际合作的领域。大陆架范围内列为租让区的面积达到 650×10^4 km²,约为全球大陆架面积的 1/4。

从 20 世纪 80 年代开始,联合国对海洋油气开发给予关注。1980 年,为对今后海底巨大财富开发的约束和机会进行评价,联合国海洋经济技术局召开“海洋石油的未来”专题讨论会,集中讨论影响海洋油气勘探的几个主要因素,即地质、技术、环境、经济和资金。

海洋油气工业的国际化及先进技术的应用,使海洋油气产量连年增长,1994 年增长 5.9%,以后每年增长 3.5% 以上。很多大的石油公司都到外国海域进行风险投资活动,全球的勘探与开发活动大量增加。90 年代中海上移动式钻井装置发展到 588 座,主要类型为自升式(362 座)及半潜式(147 座),主要分布在美国墨西哥湾(150 余座)、东南亚和澳大利亚(70 座)、北海(77 座)、阿拉伯海域(27 座)、巴西(20 座)、南非(20 座)。1994 年、1995 年勘探钻井都保持相当数量,1995 年完成 2663 口,比 1994 年增加 1.1%。其中钻井最多的海域是美国墨西哥湾,达 865 口;钻井超过 100 口的国家和海域有:英国、挪威、印度、印度尼西亚、马来西亚、泰国及美国加利福尼亚海域,巴西为 86 口。

由于在不同水深海域钻井需要用不同的钻井设备,海洋油气勘探装备发展迅速,出现了坐

底式、自升式、半潜式和浮式等多种类型。它们的技术性能日臻完善,钻井水深不断创新,1965年首次超过180m,1974年突破了600m水深的界线。为了在600m以下水深打井,发展了动力定位钻井船。动力定位系统不用锚链系泊,按照预先放置在海底的声波信号装置来保持船位。声波信号由船底的检波器接收,并经船上的计算机处理后,控制强力推进器以保持船位处于井口正上方,事实证明此系统非常有效。与此同时还发展了深海立管系统和防喷器组合等技术,因此到1979年已经能在1496m水深钻探井。

同样,为了要在更深的水域采油,海洋油气生产技术也发展迅速。到20世纪70年代,在大陆架海域开采油气所需的复杂技术已基本解决,并在实际中得到应用。最有代表性的大陆架海域是北海,那里海况恶劣,风速高达140km/h,波高30m,而且恶劣天气延续时间很长。为了缩短生产设备的在海上安装时间,研制了一种新的重力式平台,它不必打桩,靠其自身重量固定在油田位置上。这种重 $(25\sim35)\times10^4\text{t}$ 的混凝土平台是在深水港预制好后再被拖到安装地点灌水下沉的。该结构物还可以用于储油,以保证油井能连续生产。为适应恶劣海域的作业,还发展了半潜式新型铺管船,解决了铺管难题。

在20世纪70年代,还开展了针对大陆坡开发的大量研究试验工作。这时由于导管架式固定平台建造已是成熟技术,而且在平静海域使用可达300m水深,已接近它的经济界限,因此提出了一些新的平台概念。研究的重点是带柔性钢缆的塔式平台和张力腿平台,它们可望在600m水深海域经济有效地使用。此外,还开展了海底生产系统包括海底支架和油田标准设备等部分的研究。它们有的已经在浅水中安装试用,研究目标是要能在1500m的深水中使用。

到了90年代,由于对在温带气候水深300m海域的钻井、采油、集输、储存等技术问题已成功解决;对平台和管线在冰区及冰山流经区域中使用的技术难题也接近解决,海洋油气开发便逐步向大陆坡进军。深水油田开发活动最多的地区之一是巴西的坎波斯盆地。在那里,巴西国家石油公司完成了1000m水深的研究计划,并在721~752m水深处开发了马立姆油田,从而在深水技术领域处于领先地位。其次,是在墨西哥湾,美国在304m水深处找到49个油田,910m水深处找到17个油田,估计地质储量为 $31.8\times10^8\text{m}^3$ 。1994年美国壳牌石油公司在墨西哥湾的“Garden Banks 426”区块水深872m处安装了一座张力腿平台,日产原油8100 m^3 。第二年,又在马尔斯油田水深894m处建成一座张力腿平台,日产原油15000 m^3 。英国也积极开发北海的深水油田,1995年BP公司在1350m水深处开发了聂海油田,第二年又在门萨油田水深1646m处敷设长约101km(63mile)、直径约30cm(12in)的管线。

在全球水深超过500m的地层里已经发现了 $69\times10^8\text{m}^3$ 的新增储量,可能还有137 $\times10^8\text{m}^3$ 的潜在储量。在预计含油气的深水区域中,已经勘探过的面积只占一半左右。有些估计预示,全世界未发现的海上油气储量有90%潜伏在水深超过1000m以下的地层。因此,深海油井是决定石油工业前途的关键所在。这些深水区域处于勉强能够达到的水平,有的已经超过了目前的极限。种种迹象表明,未来将钻到更深的海底。水深是海洋石油勘探开发技术的第一指标。近年来随着科学技术的进步,开发水深继续增加。水深也是制约钻井的关键因素。

目前,海洋油气勘探开发范围已从浅海、半深海延伸到深海。探井水深最大已达到2970m(2002年加州联合石油公司在美国墨西哥湾深水地区钻探),2005年水深达2187m的卡姆堡—西尔斯气田已投入开发。美国墨西哥湾深海、北海、北非海上、西非深海、滨里海地区近年油气勘探不断取得新发现,已成为诸多跨国石油公司勘探开发的热点。

三、海洋油气勘探开发的主要过程

海洋油气开发在方针政策上与陆上有较大的差别。在陆上,施行的是边勘探边开发边建设的滚动式开发战略;而在海上,由于开发油气田的基础设施投资大(例如,建设一个固定式平台往往需要数百万甚至数千万元的投资),资金和技术密集程度大,因此需要实施整体式开发战略,由此带来的问题是在勘探过程中要不断地取得资料,不断地进行评价,不断地完善开发方案设计,审慎地制订一个油气田的整体式开发方案后才对油气田正式投入开发,这样一来,从勘探到开发这一周期就比陆上要长。海洋常规钻井技术特点,主要是针对固定式和坐底式钻井平台所采用的钻井工艺技术特点而言的。单纯从钻井工艺的角度讲,海洋钻井工艺技术与陆上钻井工艺基本相同,无本质上的差别。然而由于海洋钻井要克服海洋环境带来的诸多困难,就需要一系列的特殊工艺技术,并在许多概念上和做法上与陆上有着相当大的差别。所有这些就构成了海洋钻井的技术特点。

(一)地球物理勘探阶段

一般做法是进行 40~80km 间距的地震测线勘探,并结合重力、磁力资料进行区域性的大地构造和盆地对比,按板块理论进行盆地分类。最后,对每个盆地进行远景资源预测,做出是否进行进一步勘探的评价结论。海上进行物理勘探的方式是用工作船或海上地震船进行,船上安装有高精度、高灵敏度的检波装置、重力仪、磁力仪等。并可边勘探边对数据用计算机进行处理,勘探质量一般比陆上高。而且海洋地震船和勘探工作船可以在海上直来直往,能在短期内高速度、高精度地完成勘测工作,而成本只有陆上勘探成本费用的 1/10 左右。

确定要钻勘探井前,还需要进一步收集和分析盆地周围和盆地内的一切资料,在有油气远景区进行 $3\text{km} \times 6\text{km}$ 的地震测线勘探,深水区进行 $18\text{km} \times 18\text{km}$ 的地震测线勘探,作高精度的重力、磁力调查,钻一定数量的参数井。根据以上工作成果,进行油气储量的估算,提出钻井前的油气资源评价报告。

(二)钻勘探井阶段

在正式钻勘探井之前,先经投标才能确定勘探公司负责作业区块,因为海上勘探风险大,这一程序是必不可少的。在中标区域确定后,就由该中标公司做钻井前的准备工作,如加密地震测线和工程调查等。然后才正式勘探钻井,并根据钻探结果,做出商业性评价。

(三)钻评价井阶段

根据已发现油气流和储量估算情况(包括控制储量、概算储量和可能储量),才开始钻评价井。钻评价井的目的是为了完善和提出最终的开发方案,并最后确定这一油气田是否属于边际油田(指在经济上不足以支持安装固定式钻井和采油平台的海上小型油田)。

(四)开发阶段

在完成上述 3 个步骤后,才能对海洋油气田正式投入开发,包括建浮式平台、钻开发井、油气的储运等。

海洋油气勘探、开发、集输流程如图 1-1 所示。

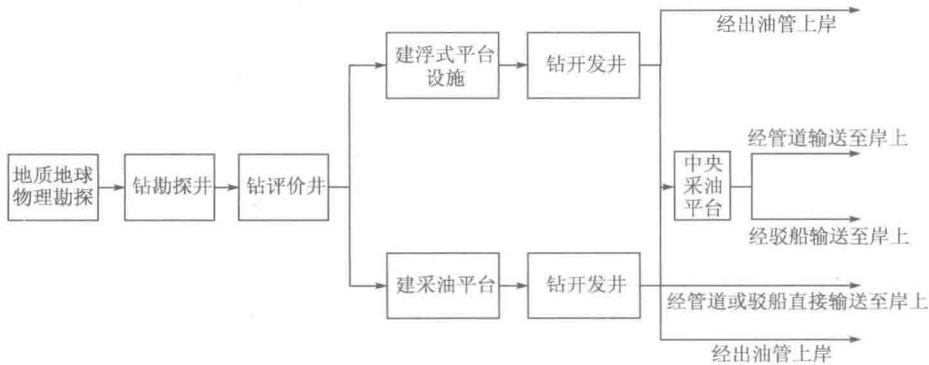


图 1-1 海洋油气勘探、开发、集输流程示意图

四、海洋油气开发的特点

海洋油气开发与陆地油气开发主要不同点是：海洋具有一层汹涌澎湃的海水，而随着水深的增加，开发难度骤增。故必须使用先进的科学技术，包括造船技术、卫星定位与计算机技术、机械制造技术、电动机和液压技术、环保和防腐蚀技术等，以便解决海洋油气开发中的定位、建立海上固定平台或深海浮动式平台及其泊位，以及浮动状态下的海上钻井、完井、油气水分离处理、废水排放和海上油气的储存和输送等问题。

(1) 海洋地球物理勘探技术与装备与陆地截然不同。海洋地震勘探必须采用专门的船舶，采用大功率、高压空气压缩机组，驱动宽阵列和长阵列的气枪，产生和释放高能量地震波，穿透 6000~9000m 的海底地层，由漂浮在离水面一定深度的多道检波电缆接收。而陆地则多用放炮或可控液压、机械震动的震源，效率比海上低很多。

(2) 海上钻勘探井和开发井，必须采用专门的钻井平台(船)、大功率的海洋钻机、适应船体升沉平移运动而保持船位与钻压的专用钻井水下与水面设备；每口井的成本要比陆地钻井的成本高 5~10 倍；海上钻井、采油的风险也大于陆上。

(3) 海洋采油与集输都需要适应海洋的特殊环境，采用与陆地差异很大的采油、集输工艺与装备(如各类生产平台和海底采油装置等)。

(4) 海洋钻井、采油作业者的作业器材和生活物资，都需要用船舶或直升机运送，受气象影响大，费用高。

鉴于上述原因，海洋油气开发是一项高风险、高技术、高投入的系统工程。

五、海洋油气开发所涉及的新技术

海洋油气勘探开发是现代海洋开发中典型的高新技术产业，是技术与资金最密集的产业。从油气的勘探、钻探、开采和油气输送等，几乎全靠高新技术的支撑。

(一) 海洋地震勘探技术

海洋三维地震勘探技术是目前海洋油气勘探中广泛应用的手段，它能对地下含油构造和地质储层实施长、宽和深三维的声波成像。目前，海洋地震勘探技术的发展方向是海洋四维地

震勘探技术。通过对同一油气区重复应用三维地震,就形成了四维地震勘探,地震勘探从二维到三维使油气藏发现率从 25%~30%提高到了 40%~50%,四维地震勘探技术的实现将油气藏发现率提高到 65%~75%。

(二)海洋油气资源开采技术

(1)深海工作平台:1984 年 8 月世界上第一座张力腿式平台由 CONOCO 公司安装在北海以后,美国、日本、挪威等国相继采用。新型的垂向张力所支撑平台已成功用于 1000m 水深的油田开发。

(2)深海浮式生产装置:浮式生产储油、卸油装置(FPSO)相对于生产平台,具有建造周期短、投资少、回收快、重复使用 and 环境保护等特点。90 年代以来,FPSO 已成为 200m 以下油田生产装置的首选方案。

(三)水下生产系统

水下生产系统是将油气生产装置及辅助设施全部或部分安装在海床上,构成一个完整的水下工程进行自动采油、集油、输油的生产系统。对于卫星油田、边际油田,特别是对于海洋中、深油气田的开发,比采用海上平台会获得更高的经济效益。新型的遥控水下开采系统已在 10 多个深海油田试验运行。

(四)大位移钻井技术

大位移钻井技术是 20 世纪 80 年代后期在水平钻井技术的基础上发展起来的,是在原来定向井的基础上,把井眼进一步向外延伸的定向井。大位移井钻井技术已在世界范围内取得了成功,已成为边际油田开发选择的最佳方案之一。目前,最大的水平位移已达 10114m。

(五)海洋数控成像测井技术

在油气的勘探与开发中,测井技术是非常重要的探测方法和手段。进入 20 世纪 90 年代,国外的一些测井公司如法国的斯仑贝谢、美国的阿特拉斯等相继推出新一代数控成像测井系统和配套的井下成像测井仪器。数控成像测井是当今世界油气测井技术发展的前沿。

第二节 海洋钻井工程概述

一、海洋钻井的特殊性

海洋钻井与陆地钻井不同之处就在于钻井平台与海底之间有一层海水,海水的潮起潮落、海流、因风产生的涌浪等,使平台发生漂移、摇晃、升沉以及产生其他问题。这些问题不解决,海洋钻井就无法进行。

钻井井位的精确定位是首先要解决的问题。地质研究人员经过对地质资料和物探资料的研究之后,提出上钻进行验证,并确定了钻井井位。钻井平台进入工区就须按照确定的井位,

精确定位。如果井位偏差太大,就有可能打不到油气。现在依靠 GPS 卫星确定井位,误差在几米之内,这样的误差就能满足钻井的要求。精确定位是保证找到石油的关键。

钻井平台在海洋钻井,特别是浮船钻井,受到风、浪、流、潮外力的作用,不可避免的产生运动。这些运动给海上钻井带来许多麻烦和困难,以平台的上下颠簸升沉为例,平台井架提吊着钻杆,钻杆接着钻头,平台在动,钻头在井底就像“捣蒜”一样,一会儿在井底,一会儿又被提起来,钻头怎么钻进呢? 平台受风浪影响,必然会产生漂移,离开垂直的海底井位漂来漂去,漂移大了,钻杆和隔水管都会蹩断。另外平台的摇晃、钻井液的上返循环、钻头的导入、高压油气的溢出等,这些在陆上钻井不成问题的事,可在海上钻井中却成了问题。就连钻井深度这样一个最基本的数据测量,海上与陆上也截然不同。陆上钻井钻杆下了多少,钻头在什么位置,技术人员一量方入^①,一算就是井深。而海上就不是这样,方钻杆与转盘的相对位置时时都在动的。光量方钻杆的“方入”是不行的,必须根据当时的潮位及升沉计算才能得出准确的井深。

自升式钻井平台钻井类同陆地一样,但也有插桩、拔桩、升台、降台问题。当然,为了保证钻井能够得以安全顺利进行,首先平台要结构牢固,能经得起风浪,锚泊系统好,抓得住,站得稳。然后就要有专门的设备和方法来解决上述这些问题。

除此之外,海洋钻井还有不少的辅助工作,钻井平台在进入井位之前必须要有专门的工程船进行海底工程地质调查,以确定海底地貌、地表土壤岩性和地质情况,了解浅表地层是否含有浅层气,以便尽早预防,保证自升式钻井平台的插桩和浮式钻井装置的抛锚作业。海洋作业平台的抛、起锚要用专门的辅助船。平台作业为了保证安全,特别是在钻遇油气层和测试阶段,在钻井平台附近要有守护船,以保证救生、消防。平台作业人员的上下平台,除了交通船之外,还要使用直升机进行接送。钻井平台所用的大量物资、专用设备、管材、工具材料、淡水、生活用品要由海上供应船运输供应。

如果水下井口防喷器需要安装、检查及处理故障,要有水下机器人(ROV)及潜水设备等。为了保证钻井平台的安全,要请专门的海事部门、船级社和海洋管理部门对平台进行各种检验。

诸如上述,这些都是陆上钻井没有的,也是不需要的。所以海洋钻井投资高,风险大,运用许多高科技的手段和方法,成本要比陆上高得多。当然一旦发现油气田,产生的效益也是可观的。

二、油气勘探开发水深的界定

目前世界对深海海域石油勘探开发的界定,是以水深为依据的。据 2002 年在巴西召开的世界石油大会报道:油气勘探开发水深 400m 以内为常规水深,400~1500m 水深为深水,超过 1500m 为超深水。

三、海洋钻井的主要技术指标

(1) 钻井工作水深。国外钻井水深已达 4000m,而我国海上油气生产主要集中在水深不足 500m 的浅海区进行。我国第一个真正意义上的深水油气田于 2014 年建成,位于南海东部,香港东南 300km 处,平均水深 1500m。我国南海拥有丰富的油气资源,但这一海域水深为 500~

^① 方入是指转盘补心以下方钻杆的长度。

2000m,因此我国目前正大力发展深水油气勘探和生产技术。

(2)钻井井深(钻井垂直深度)。2003年2月,美国雪弗龙德士古公司在墨西哥湾绿色峡谷640号区块钻井井深达9210m(30217ft)。我国钻井井深小于5500m。

(3)水平钻井位移。1997年,英国石油公司完成水平钻井位移10113.5m,垂深1605.8m,水平位移与垂深比为6.3。1997年,我国在西江24-3平台与国外合作的西江24-3-A14井的水平位移为8062.7m。

(4)水平井完井深度。2003年,在北海海区雪弗龙德士古的Capta油田,由贝克石油工具公司在水平距离2768m(8305ft)的开孔卵石板叠层中完井成功。

(5)下套管重量。2003年8月25日,美国Unocal在Walk Ridge 678区块的St. Malo 1号井下406.4mm(16ft)钻井套管,下套管重632.93t,深度6874m(22554ft);2003年9月13日,美国Unocal在同一井中下340~346mm套管柱,套管柱重652.7t,深度7400m(24277ft)。我国下套管柱重小于400t。

(6)连续油管井内下放深度。2003年,在墨西哥湾密西西比Canyon区Shell公司的张力腿平台(TLP),由斯伦贝谢公司完成连续油管井内下放深至8303m(27240ft)。

(7)随钻测井(LWD)下入。2003年,斯伦贝谢公司在加拿大近海用四芯导线组合的LWD下入井深9375m(30757ft),成功完成钻井时的LWD作业。我国随钻测井下入深度小于500m。

四、海洋钻井新技术

(一)大位移井钻井技术

目前比较通用的概念认为,大位移井是指位移与垂深之比等于或大于2的井。位移与垂深之比等于或大于3的井为超大位移井。

大位移井的主要用途和优越性如下:

(1)用大位移井开发海洋油气田,可利用现有平台外扩钻井,节省新建平台的投资,从而降低整个油气田的开发成本。

(2)实现海油陆采,节省建平台和人工岛的投资。

(3)实现一口井开发一个小油田,节省投资。有些小油田或几个不连通的小断块油气田,用一口大位移井就可以开发。

(4)使用大位移井可以替代复杂的海底井口开发设备,节省投资。

(5)有些油气藏在环保要求高的地区钻井困难,利用大位移井可在环保要求不太高的地区钻井,以满足环保要求。

(二)分支井钻井技术

20世纪90年代以来,钻井技术迅速发展。为了实现高效益、低成本地开发老油田中的剩余资源及低渗、超薄、海洋、稠油和超稠油的特殊油藏,水平钻井技术不断发展和完善,同时也促进了包括多分支井技术在内的特殊工艺水平井技术的诞生和发展。多分支井,也称为多底井,是指在一口主井眼中钻出两口或多口进入油气藏的分支井眼,主井眼可以是直井,也可以是水平井。主井眼为直井的分支井能有效地开采多层段的油藏;而主井眼为水平井的分支井,则极大地提高了油藏的裸露程度,增加了油藏的泄油面积,进而提高原油产量和采收率。

与常规直井相比,分支井的一个显著特点是享有共同的井口和上部井段,因而可以缩短钻井时间,降低钻井成本。除此之外,分支井还具有以下优点:

- (1)可以有效地开采多产层油藏;
- (2)以较少的井开采形状不规则的油藏;
- (3)可以减少海上平台的井槽数量,进而缩减平台的数量和尺寸;
- (4)可以降低地面采油和集输设备、海上钻井隔水管及井口等材料成本;
- (5)可以减少对环境的影响;
- (6)提高了边界油田的经济效益。

(三)小井眼钻井技术

小井眼钻井技术出现于 1942 年,最早用于采矿工业,然后才应用于石油工业。关于小井眼的定义,目前尚不统一。比较普遍的认为是:90%的井身直径小于 177.8mm 或 70%的井身直径小于 127mm 的井为小井眼。小井眼钻井技术可用于勘探井、生产井、加深钻井、开窗侧钻井、水平钻井及多分支井。由于小井眼具有投资费用少、钻进速度高等优点,与常规钻井技术相比,小井眼钻井技术可降低成本 25%~75%。

小井眼钻井系统有:转盘钻进、井下马达钻进、连续取心钻进。

(四)优快钻井技术

要提高油田的经济效益,必须提高海上的钻井速度。优快钻井是高新技术与现代管理综合配套的结果。美国一家公司在泰国湾钻一口 3500m 左右的井,平均建井周期只需 5~6 天,最短的仅需 4 天。渤海绥中 36-1 油田,选取了目前国际上一些先进钻井及配套技术,并成功地进行了集成和应用。这些技术包括整体块装式开口、PDC 钻头、PDC 可钻式浮箍浮鞋、导向马达、低度阳离子钻井液、随钻测量(MWD)、大满贯测井、无候凝固井等,优化集成配套,从而大幅度提高了钻井速度。绥中 36-1 油田二期 186 口井,仅优快钻井本身带来的经济效益就达数亿元。东海西湖凹陷,在 1995 年以前,平湖、春晓油气田钻井平均机械钻速仅为 6~7m/h,平均钻井的台月效率为 1500~1900m/(台·月)。钻井周期较长,台月效率低。后来采用优快钻井技术,钻井平均机械钻速达到 10~11m/h,平均钻井台月效率达到 3300m/(台·月)。钻井台月效率提高了,钻井成本明显降低。

优快钻井技术,既是传统钻井观念的突破,也是管理思想的重大突破,主要是优化井身结构、近平衡钻井、优选钻头类型、优化钻具组合、优化钻井参数、优选钻井液体系、优化固井工艺和水泥浆配方等快速钻井技术。

优快钻井包括了从技术到管理的三大部分,这就是先进实用的配套技术、先进严密的组织管理及发扬团队协作精神。

五、海洋钻井技术的发展

(一)深水钻井难点

与陆地和浅水钻井相比,深水钻井有着更为复杂的海况条件,面临着更多的难题,主要表现在以下四个方面: