



海洋石油 钻采工程技术与装备

廖谟圣·编著

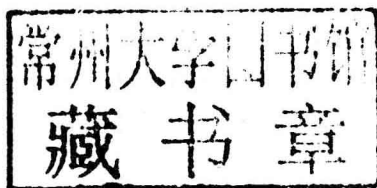


石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

海洋石油钻采工程技术与装备

廖谟圣 编著



中国石化出版社

内 容 提 要

21 世纪是海洋世纪,开发海底蕴藏丰富的油气资源必须采用高端的科学技术、工艺与装备。本书则据此对海洋和深水钻井、完井采油的关键技术与装备进行了全面的论述,主要包括海洋石油开发总概念、技术发展历程;海洋石油钻井、完井采油实用工艺与技术;钻井采油平台(船)的分类、性能和结构特点,各类平台(船)关键工程技术;海洋石油水面主钻井设备、浮式钻井水下设备和水下采油设备系统的分类、性能和结构特点及国内外相应主要设备技术状况;海洋石油钻采作业的安全与环保;深水和超深水钻井采油关键技术与装备以及上述工艺技术与装备的有关实用计算、技术现状与发展趋向。本书还有大量实用插图和技术参数数据等供读者在生产、科研设计、操作与维护中参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋石油钻采工程技术与装备 / 廖漠圣编著.
—北京:中国石化出版社,2010.6
ISBN 978-7-5114-0343-8

I. ①海… II. ①廖… III. ①海上石油开采
IV. ①TE53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 092253 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 482 千字
2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

定价:58.00 元

前 言

浩瀚的海洋，占了地球表面积的 $2/3$ 以上。海底蕴藏的石油天然气资源，约占海陆总资源量的 60% 以上。人类最终将集中关注海底石油等资源开发。

纵观流逝近数百年之世界史，强国之道在于发展海洋科技与经济实力。21 世纪乃海洋世纪，发展海洋科技与高技术装备则尤为重要。石油乃工业之血液，亦乃民生及国防之必需。

海洋石油工业之技术装备大都属于高科技产品，既涉及民族基础工业，亦涉及高精尖之关键技术领域，其国产化程度，实乃国家工业化及国防现代化程度之写照。对此甚为至要之事，吾辈怎能等闲视之。

众所周知，开发石油资源，需要通过地球物理勘探以初步圈闭确定可储存石油的地层位置、范围和深度；最终必须通过钻井、钻入数千米深的地层，以证实发现石油的储藏深度与储量；然后制定详细经济的开发方案，通过钻开发井、完井、采油等高技术手段，以获取工业的血液——石油。而海洋与陆地石油开发主要不同点：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，必须综合采用比陆地高得多的现代高精尖技术，以确保在风、浪、流综合影响下，海洋石油钻井、采油、集油与输送装置可以安全进行作业。

海洋石油钻井、完井采油工程装备，是勘探、开发井的钻井、完井采油必需的关键手段；掌握这些装备的技术及钻井、完井采油工艺技术，是获取海洋油气的关键所在。笔者积累近 40 年海洋石油勘探、开发装备设计、制造与工程管理的实践经验总结编成此书，希望对我国进一步扩大海洋油气勘探、开发有所帮助。

本书比较通俗系统地介绍了有关海洋石油勘探开发的工艺与装备的基本知识、实践经验与相关实用计算，并对当前有关海洋平台（船）及其深水、超深水，深井、超深井（特别是浮式钻井采油）工艺技术与装备及其现状和发展趋势亦作了较为系统的介绍。本书可作为从事海洋石油勘探开发的广大科研设计人员、工程技术管理人员及石油院校相关的专业师生阅读参考用书，同时，对从事海洋石油勘探开发的技术工人和广大陆地石油勘探开发的工程技术人员、管理干部、技术工人也有一定的实用和参考价值。

由于作者经验和水平有限，谬误之处，敬请批评指正。

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 海洋石油钻井、完井采油概念	(1)
1.1.1 海洋石油勘探开发的意义	(1)
1.1.2 海洋石油钻井、完井采油水深和钻井深度的界定	(2)
1.1.3 海洋石油勘探开发的特点	(2)
1.1.4 海洋石油钻井、完井采油总概念及其在海洋石油勘探开发中的地位	(3)
1.1.5 海洋石油钻井、完井采油涉及的主要技术与装备	(3)
1.2 世界海洋钻井、完井采油技术的发展历程	(5)
第2章 海洋石油钻井、完井采油工艺及相关实用设计计算	(13)
2.1 海洋石油钻井工艺	(13)
2.1.1 海洋石油钻井的总分类	(13)
2.1.2 海洋平台的勘探井(评价井)钻井总方式	(13)
2.1.3 不同海洋平台的石油生产井钻井总方式	(13)
2.1.4 海洋非浮式钻井工艺	(17)
2.1.5 海洋浮式钻井工艺	(23)
2.1.6 提高海洋石油钻井效率、确保钻井质量的新技术与新工艺	(33)
2.2 海洋石油完井工艺	(37)
2.2.1 预钻井后的平台回接	(37)
2.2.2 平台完井	(39)
2.2.3 浮式钻井后的海底完井	(42)
2.3 海洋钻井完井相关实用计算	(43)
2.3.1 海洋石油钻井和下套管相关实用计算	(43)
2.3.2 钻井工艺所需泥浆排量、压力等参数计算选择	(45)
2.3.3 采用双压力梯度钻井液钻井工艺方法时泥浆举升泵所需功率及 节能相关计算	(52)
2.3.4 自升式钻井平台相关操作工艺数据实用计算	(54)
2.3.5 海洋石油钻杆和套管相关计算	(54)
第3章 海洋石油钻井采油平台	(56)
3.1 海洋石油钻井采油平台的分类	(56)
3.1.1 海洋石油钻井采油平台总分类	(56)
3.1.2 海洋石油勘探用钻井平台(船)	(57)
3.1.3 海洋石油开发用钻井和完井采油平台(船)	(58)
3.2 海洋石油钻井采油装置涉及的海洋环境基本知识	(58)
3.3 各型海洋石油钻井采油平台的基本构成、主要特点及总体性能特点对比	(59)
3.3.1 固定式钻井采油平台	(59)

3.3.2	移动式钻井采油平台(船)	(66)
3.3.3	各类钻井采油平台总体性能特点对比	(73)
3.4	国外第1~6代浮式钻井平台(船)及其上设备的年代特点与半潜式平台不同 外形结构的优缺点	(78)
3.4.1	国外第1~6代浮式钻井平台(船)及其上设备的年代与特点	(78)
3.4.2	半潜式平台不同外形结构的优缺点	(81)
3.5	常用钻井采油平台(船)通用关键工程技术	(87)
3.5.1	平台设计应关注的问题	(87)
3.5.2	导管架平台有关工程技术	(93)
3.5.3	自升式平台有关工程技术	(94)
3.5.4	浮动式平台(船)有关工程技术	(97)
3.6	海洋固定结构物与浮动结构物的物理力学实用计算	(100)
3.6.1	海洋半潜平台(船)或其他结构物受风、浪、流计算	(100)
3.6.2	海洋固定平台或其他结构物受风、浪、流计算	(103)
3.6.3	海洋锚缆的系泊力	(104)
3.6.4	海洋平台(船)上管道类风载荷	(104)
3.6.5	海洋平台(船)的拖航阻力及所需功率	(105)
3.7	海洋石油钻井采油平台现况与发展展望	(106)
3.7.1	世界海洋石油钻井采油平台现况	(106)
3.7.2	我国海洋石油钻井采油平台现况	(110)
3.7.3	海洋石油钻井采油平台(船)发展展望	(119)
第4章	海洋石油钻井主设备及其系统	(128)
4.1	海洋石油钻井设备总系统概述	(128)
4.1.1	海洋石油钻井平台上的钻井主设备及其系统	(128)
4.1.2	浮动式海洋石油平台(船)上的浮式钻井专用设备及其系统	(128)
4.2	海洋石油钻机主系统	(128)
4.2.1	海洋石油钻机	(128)
4.2.2	海洋石油钻机顶部驱动设备	(144)
4.2.3	海洋石油钻机配套的泥浆泵	(151)
4.2.4	海洋石油钻井的泥浆固控设备	(162)
4.2.5	固井设备	(169)
4.3	海洋石油钻机、泵类及通用管道、构件的实用计算	(173)
4.3.1	海洋石油钻机(含顶驱)的实用计算	(173)
4.3.2	海洋石油钻井泥浆泵、液压泵的实用计算	(181)
4.3.3	通用管道的基本应力计算	(182)
4.3.4	海洋钻井采油常用高压容器的实用计算	(183)
4.3.5	海洋钻井采油常用液缸、活塞杆的实用计算	(184)
4.4	海洋石油钻井设备的发展展望	(186)
4.4.1	石油钻机需求及钻井设备制造业总发展概况与发展趋向	(186)
4.4.2	石油钻机技术发展展望	(191)

4.4.3	石油钻井顶部驱动装置技术发展展望	(192)
4.4.4	石油钻井泥浆泵技术发展展望	(192)
4.4.5	石油钻杆新材料	(193)
第5章	海洋石油浮式钻井水面与水下专用设备	(194)
5.1	浮式钻井水下设备的总体配置类别(方式)与组成	(194)
5.1.1	常规浮式钻井水下设备的分类、总体配置	(194)
5.1.2	深水水面 BOP 钻井专用设备的总体配置	(199)
5.1.3	深水人工海床浮筒的浮式钻井专用设备配置简况	(200)
5.2	常规浮式钻井水下专用设备各组成部件的构成、性能与参数	(201)
5.2.1	浮式钻井专用水下设备的海底井口系统	(201)
5.2.2	浮式钻井专用设备的水下 BOP 系统	(203)
5.2.3	浮式钻井专用设备的立管(隔水管)系统	(212)
5.2.4	浮式钻井专用设备的控制系统	(216)
5.3	海洋浮式钻井专用钻柱升沉运动补偿器与张紧器	(220)
5.3.1	浮式钻井水面钻柱升沉运动补偿器与张紧器系统的主要用途与分类	(220)
5.3.2	钻柱升沉运动补偿器与张紧器的工作原理与特性比较	(222)
5.3.3	常用游车型钻柱升沉运动补偿器系统的组成、典型构造、特点与 简要操作	(224)
5.3.4	钻柱升沉运动补偿器的国外生产厂家及其性能、参数	(227)
5.3.5	张紧系统的分类、组成、典型结构与特点	(230)
5.3.6	张紧器的国外生产厂家及其性能参数	(232)
5.4	海洋石油钻井水下设备的实用计算	(234)
5.4.1	液压防喷器系统的实用计算	(234)
5.4.2	立管(隔水管)的实用计算	(239)
5.4.3	钻柱升沉运动补偿器与张紧器的实用计算	(241)
5.5	海洋浮式钻井水面与水下设备技术发展展望	(243)
5.5.1	海洋防喷器(BOP)技术发展展望	(243)
5.5.2	海洋立管技术发展展望	(243)
5.5.3	钻井水下设备控制系统技术发展展望	(244)
5.5.4	钻柱升沉运动补偿器技术发展展望	(244)
5.5.5	张紧器技术发展展望	(244)
第6章	完井采油设备	(245)
6.1	平台完井采油设备	(245)
6.1.1	回接系统器材	(245)
6.1.2	井内采油(生产)管柱	(245)
6.1.3	井内采气(生产)管柱	(246)
6.1.4	平台采油树	(247)
6.1.5	平台采油管汇与控制系统	(248)
6.2	海底完井采油系统(设备)	(248)
6.2.1	海底采油树总成	(248)

6.2.2	海底采油控制系统	(254)
6.2.3	海底管汇与采油相关管缆	(255)
6.2.4	海底采油树、管汇等的布设	(256)
6.3	近水面完井系统	(257)
6.4	平台的机械采油提升系统	(257)
6.5	完井采油设备的实用计算	(258)
6.5.1	密封壳体受外压的实用计算	(258)
6.5.2	受外压中空球体的壁厚计算	(258)
6.5.3	海底完井采油管道的计算	(259)
6.6	海洋完井采油设备的现况与发展展望	(259)
6.6.1	海上固定式、自升式和坐底式平台完井采油系统	(259)
6.6.2	海底完井采油系统	(260)
第7章	海洋石油钻井采油作业安全与环保	(263)
7.1	海洋石油钻井采油作业的安全管理	(263)
7.1.1	实行油气田开发工程全方位、全过程的安全管理	(263)
7.1.2	实行有效的安全培训	(263)
7.1.3	设计配备可靠的安全防火救生设施	(264)
7.1.4	实行严格的安全检查、持证投产与持证操作	(264)
7.2	海洋石油开发工程的环境保护	(264)
7.2.1	海洋石油开发工程环境保护的关键点	(264)
7.2.2	严格执行国家规定的环境保护法规	(264)
7.2.3	严格执行海洋石油开发与环境保护的“三同时”制度	(265)
7.2.4	增加配备必须的环境保护设施	(265)
7.2.5	严格执行环保检测	(265)
7.3	海洋石油开发工程的 HSE 体系	(265)
第8章	深水钻井采油技术与装备	(266)
8.1	深水海洋钻井采油与装备概述	(266)
8.1.1	深水和超深水钻井采油是当前世界海洋油气开发发展的必然	(266)
8.1.2	深水和超深水钻井采油装备与普通水深钻井采油装备的主要不同点	(267)
8.1.3	当前主要深水产油国发现油藏简况	(269)
8.1.4	世界深水油气开发总概况与预测	(270)
8.1.5	深水开发投入资金与预测	(271)
8.2	深水海洋石油钻井和完井采油的主要工艺技术要求	(272)
8.2.1	深水和超深水钻井的套管程序	(272)
8.2.2	深水、超深水钻井和完井方式	(273)
8.2.3	深水和超深水钻井和完井关注的工艺技术要求	(277)
8.3	超深水海洋石油钻井设施现况及其选择	(279)
8.3.1	超深水海洋石油钻井平台(船)新建造概况	(279)
8.3.2	至2010年世界超深水移动式钻井平台(船)计划新增数量简况	(283)
8.3.3	深水海洋石油钻井平台(船)的选择	(285)

8.3.4 深水海洋石油钻井平台(船)动力定位设备的选择对比	(285)
8.3.5 深水海洋石油钻井设备与器材选择的关注要点	(286)
8.4 深水海洋采油设施现况及其选择	(286)
8.4.1 深水和超深水海洋采油平台概况	(287)
8.4.2 深水海洋石油采油平台的选择	(291)
8.4.3 深水和超深水采油设备与器材选择关注的技术要点	(292)
附录 1	(294)
表 F-1 API Std 5A 钻杆钢级和强度条件	(294)
表 F-2 API Std 5CT 套管和油管钢级的强度和硬度条件	(294)
表 F-3 API Std 5CT 套管和油管钢的伸长率	(295)
表 F-4 API Std 5CT 套管和油管钢的化学成分(%)	(295)
表 F-5 API Std 5L 输油输气管线钢级的强度和硬度条件	(295)
表 F-6 API Std 5L 输油输气管线钢级及其化学成分(%)	(296)
附录 2	(297)
海洋石油工业常用单位换算表	(297)
参考文献	(299)

第 1 章 概 论

海洋约占地球表面积的 70.9%，人类最后剩下的石油、天然气资源储备在这里。海洋石油(包括天然气，下同)开发是一项高投资、高技术和高风险的系统工程；海洋石油开发具有重要的政治意义和经济价值，也是促进国家科技、经济发展的重要手段。海洋石油钻井、完井和采油工程技术与装备，主要包括海洋钻井采油装置(平台、船)、海洋勘探开发的钻井、完井采油工程技术、工艺与相应的设备，它们均是获取海洋油气的关键技术与手段。

1.1 海洋石油钻井、完井采油概念

1.1.1 海洋石油勘探开发的意义

地球的表面积为 $5.11 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，其中海洋表面积为 $3.62 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，占了我们人类生活和活动面积与空间的 2/3 以上，是人类最后剩下的活动场所和财富储备的宝库。

在海平面以上的陆地高度平均值为 840m，而海洋深度平均值高达 3730m。人类科学技术的发展，使之涉足于月球和宇宙空间，然而深海的奥秘尚未完全探明。全世界海洋深度在 0~200m 的大陆架仅占海洋面积的 7.49%，而水深在 6000m 以上的也仅占 1.38%；海洋深度为 200~1000m 占 4.42%；海深 1000~3000m 占 12.88%；海深 3000~6000m 占了海洋面积的绝大部分，达 73.83%。深水海域海底资源的开发，是当代高新技术之一。

海底地形地貌，与人类开发海洋有密切关系，海洋地形大致可分为大陆架、大陆坡、海盆、海沟和海岭 5 类。大陆架呈 1/500~1/1000 的平缓坡度；大陆坡是大陆架与洋底之间的过渡带，坡度约为 1/10~1/40；世界最深的马里亚纳海沟深度达 11034m。

石油是工业的血液，它支撑着国民经济的发展，也是国防装备、导弹等的动力，在国家经济和政治上的重要性不言而喻。二十一世纪是海洋的世纪，对目前易于开发的工业的血液——海洋石油，当然成为当今人类开发海洋的重点。据地质学家的预测，在海底石油天然气总储量约为 $1000 \sim 2500 \times 10^8 \text{ t}$ 之间，是世界 70 多年来探明陆地总储量的 2 倍，其经济价值约为 $(10 \sim 25) \times 10^{12}$ 美元甚至更多。

第二次世界大战前，海洋石油产量占世界石油总产量的比率很小，战后，随着电子技术、宇航技术、造船工业、机械工业等的飞速发展，带动了海洋石油勘探开发技术及其装备工业的迅速发展，海洋石油开发技术的发展，又反过来促进了其他工业，特别是海洋石油工业的发展。截至 1977 年，世界海洋石油总产量占世界石油总年产量的比率已突破 20%，1988 年上升到 22.83%，1994 年升至 27.65%，2000 年上升至约 35% 以上，现今超过 38%。巴西、泰国、英国和挪威的油气工业，则主要依靠开发海洋油气资源。

我国海洋石油工业从 1970 年至今已近 39 年，发展突飞猛进。海洋石油产量从 1971 年的 $8.69 \times 10^4 \text{ t}$ ，至 2003 年国内外油气产量 $3336 \times 10^4 \text{ t}$ (国内约 $3000 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量)；其勘探开发装备从无到有，至今已具有相当规模。成绩突出，令人鼓舞。2003 年，油气产量约占我国海陆总油气产量的 20%；2004 年，中国海洋石油总公司提出了到 2008 年，实现国内

生产 $4000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的油当量, 2010 年实现国内 $(5000 \sim 5500) \times 10^4 \text{ m}^3$ 的油当量, 海外实现权益油达 $2000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的油当量的战略目标。随着陆地油气资源的逐步减少甚至枯竭, 向海洋, 特别是深海开发石油、天然气, 是世界油气工业发展的重要趋势之一。据我国第三次石油资源评价得知: 我国海洋石油资源量为 $246 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气资源量为 $16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (油当量 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$), 合计油当量约 $406 \times 10^8 \text{ t}$, 为 2007 年中国探明油气当量储量 $45.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 8.9 倍左右。目前海洋石油的探明率仅为 12%, 海洋天然气的探明率仅为 11%, 极具勘探开发潜力。而开发我国海洋及深海石油, 对促进我国造船业、机械制造、电子工业等的发展, 补充能源的急需, 对国家经济发展、国防实力的增强也有十分重要的意义。

1.1.2 海洋石油钻井、完井采油水深和钻井深度的界定

超深水(UDW)和超深井钻井(UDD)是近十余年来海洋石油钻井、采油不断向深水和深地层推进而形成、用以区分普通深水和普通钻井井深的概念。

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。对于浅水与深水的划分, 国外有关的油公司或厂商说法不一, 有的以 305m(1000ft)划分, 有的以 457m(1500ft)划分, 有的以 610m(2000ft)划分, 又有的则以 500m 划分。据 2002 年在巴西召开的世界石油大会报道: 油气勘探开发水深的界定是 400m 以内为常规水深, $400 \sim < 1500 \text{ m}$ 为深水(DW), $\geq 1500 \text{ m}$ (或 5000ft)为超深水。另据国外相关报道, 钻井深度能力 $\geq 4500 \text{ m}$ (15000ft) $\sim < 7000 \text{ m}$ (25000ft)为深井钻井; $\geq 7000 \text{ m}$ ($\geq 25000 \text{ ft}$)为超深井钻井。本书则遵循本深水、超深水和深井、超深井这一界定进行以下相关论述。

1.1.3 海洋石油勘探开发的特点

海洋石油勘探开发的特点, 即与陆地石油勘探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。故必须使用当代最先进的科学技术, 包括造船技术、卫星定位与电子计算机技术、现代机械、电机和液压技术、现代环保和防腐蚀技术等综合技术, 以便解决海洋石油天然气勘探开发所遇到的茫茫大海中的定位、建立海上固定平台或深海浮动式平台的泊位、解决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。要解决上述难题, 必须采用高技术和高额资金的投入。因此, 海洋石油天然气开发, 无论在资金的投入和高技术的应用和具体的实施工艺方面与陆地石油开发均有很大不同。其主要不同点:

① 海洋地球物理勘探技术方法和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, 产生并释放高能量地震波, 穿透 6000 ~ 9000m 的海底地层, 由飘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机械震动的震源, 其效率比海上低很多。

② 海上钻勘探井和开发井, 必须采用专门的钻井平台(船)、大功率的海洋钻机及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; 每口探井的成本要比陆地高 5 ~ 10 倍; 海上钻井采油的安全风险也数倍于陆地。

③ 海上采油与集输均需适应海洋的特殊环境, 而采用与陆地差异很大的高技术性能的采油、集输工艺与装备(如各类生产平台和海底采油装置等)。

④ 海上钻井、采油作业者的作业器材和生活物资均需用船舶或直升飞机运送, 受气象影响大, 费用高。

⑤ 鉴于上述原因, 它是一项高风险、高技术、高投入的系统工程。

1.1.4 海洋石油钻井、完井采油总概念及其在海洋石油勘探开发中的地位

海洋石油开发的总体阶段是勘探与开发两个阶段。勘探阶段主要是地球物理勘探(重点是二维、三维与四维地震勘探)和随之的勘探钻井,勘探钻井主要是利用移动式钻井平台(如坐底式钻井平台、自升式钻井平台、半潜式钻井平台、钻井浮船)在经过地球物理勘探确认可能含有油气储藏的区块和井位钻若干口勘探井,最终通过地质录井、取心和井内油气测试等综合手段及计算分析,必要时钻评价井,以确定是否有开采价值的油气储量;而开发阶段的四个主要内容是开发钻井、完井采油、油气分离处理和油气集输。开发钻井是继勘探钻井之后,为开采石油所进行的钻井,它包括钻生产井和开采中后期钻调整井,而钻生产井的方式有浮式钻井和平台钻井两种,并可细分为海底基盘的预钻井、自升式平台为井口平钻井和两者采用的辅助平台钻井等;钻井方法通常有丛式集束钻井、定向钻井、水平钻井、井内多支钻井等。海洋完井是把海底具有石油或天然气的油气层通过已经完钻成井的井中,以一定的作业程序和下入井内的作业器具,通过射穿油气层,到控制油气按照人们的意志从井中开采油气的整个过程称为完井,即将已钻成的井孔,通过一系列井下作业,安装好井下生产管柱和井口采油树,使其从地层中具备产出油气的阶段称为完井,完井即具备了采油的硬件条件;随之按油芷地质家的规划,分别进行指定油层和井位开启采油树阀门进行采油和随之进行的油气分离处理、储存与外输油气。因此,海洋石油钻井包括了钻勘探井、钻评价井和钻生产井;海洋完井采油主要是在钻生产井完钻成井的井中进行上述完井作业(含安装好井下生产管柱和井口采油树)和采油。

因此,海洋石油钻井和完井采油正是勘探与开发这两个阶段的关键而核心的工程内容。它是这两个阶段中技术先进程度最高、装备最复杂、作业难度最高、投资最大、风险也最高的关键环节。

1.1.5 海洋石油钻井、完井采油涉及的主要技术与装备

(1) 海洋石油钻井、完井采油工程技术与装备涉及的现代高精尖科学技术

海洋石油钻井、完井采油工程技术与装备综合采用了现代高精尖科学技术包括:

- ① 高精度卫星测量、定位与通讯技术。
- ② 超深钻井与定向钻井和水平钻井技术(含钻机之顶部驱动技术、井内动力钻井装备、随钻测量及地质导向钻井技术、多支井钻井技术等)。
- ③ 深海动力定位装备与技术。
- ④ 高性能海底遥控机械手[如无人有缆遥控水下作业船(ROV)等]装备与技术。
- ⑤ 大型、高寿命双燃料燃气轮机、天然气压缩机等设计、制造技术。
- ⑥ 高强度、高性能钢管、结构钢之生产、焊接装备与技术。
- ⑦ 大型结构之海上浮吊吊装、水下打桩装备与技术。
- ⑧ 远程遥控平台无值守生产装备与技术。
- ⑨ 高性能、高可靠性大洋深海平台计算机设计、制造技术。
- ⑩ 海底钻井采油系统设计、制造技术。

(2) 海洋石油钻井、完井采油涉及的主要工程装备系统

海洋石油钻井、完井采油涉及的主要工程装备系统,包括海洋石油开发除油气水分离处理、油气集输以外的所有系统。现以表1-1-5-1列出海洋石油钻井、采油涉及的主要工程装备系统并说明如下。

表 1-1-5-1 海洋石油钻井、采油涉及的主要工程装备系统与说明

系统类别	涉及的主要工程装备分系统	说 明
主要钻采工程装备系统	固定式钻井采油平台	普通水深(<400m)海上钻井、完井和采油必需的钻井采油平台
	移动式钻井采油平台(船)	普通水深至超深水($\geq 1500\text{m}$ 或 $\geq 5000\text{ft}$)钻井和完井采油必需的移动式钻井采油平台(船)
	海洋石油钻机主系统	包括钻机本体、顶部驱动系统、泥浆泵系统、固体含量控制系统和非浮式钻井的井控系统、钻具拧卸排放系统等
	浮式钻井水面与水下设备系统	适用浮动式钻井的水下井口系、封井系、立管系统、控制系统和水面钻柱升沉运动补偿和张紧系统等
	完井采油设备系统	含水面、近水面与水下完井采油系统,包括井内生产管柱、水面或水下采油井口装置、电潜泵等机械提升系统和管缆及控制系统等
	海洋固井系统	含固井泵、水泥储存输送与混合系统及相应的仪表控制系统
	钻井、完井采油的动力系统	含柴油或燃气轮发电机组、空气压缩机组、变频与控制系统等

(3) 海洋石油钻井、完井采油涉及的主要配套工程装备系统

海洋石油钻井、采油涉及的主要配套工程装备以表 1-1-5-2 说明。

表 1-1-5-2 海洋石油钻井采油涉及的主要配套工程装备系统

系统类别	涉及的辅助主要工程装备分系统	说 明
钻井采油辅助装备系统	海洋修井设备系统	专门的钻修井平台(船)或装于钻采平台(船)上或作业时装于钻采平台(船)上
	海洋试油设备系统	装于钻井平台(船)上或作业时装于钻井平台(船)上
	海洋测井、录井设备系统	
	海洋供应和维修系统	后勤生产、生活物资供应和设备维修保养
海洋钻采船舶工程通用系统	船舶动力与电力设备系统	装于钻采平台(船)上
	锚泊定位系统	装于钻采平台(船)上
	安全与消防系统	装于钻采平台(船)上
	水下作业与潜水设备系统	包括 ROV、饱和或非饱和潜水设备系统
	海水和淡水供给系统	装于钻采平台(船)上
	水处理与环保系统	装于钻采平台(船)上
	空调和冷藏设备系统	装于钻采平台(船)上的加热、通风、空调设备
	救生设备系统	含导航、指挥、呼救系统及密闭救生艇、救生阀等,均装于钻采平台(船)上
	通讯联络系统	含卫星通讯、船上固定或移动电话通讯、高频通讯设备等,装于钻采平台(船)上
	监测仪表和自动化系统	装于钻采平台(船)上
	空中运输设备服务系统	含直升机平台及服务于直升飞机的通讯、燃油加注及应及系统,装于钻采平台(船)上
	气象和配套的电子记录监测系统	装于钻采平台(船)上

系统类别	涉及的辅助主要工程装备分系统	说明
海洋油气钻采 主要海上施工装备	海上大型浮吊	用于钻采平台安装或吊装大型构件
	铺管船	用于海底油气管线铺设
	潜水作业船	
	三用工作船	用于钻采平台和海上施工船舶拖航、油气水及器材物资供应或守护
	管道开沟、埋设船	
	管道维修船	
	海上作业守护船	
	半潜式运输船	用以运输自升式或半潜式平台等
	其他专用施工装备等	如水下打桩设备等

1.2 世界海洋钻井、完井采油技术的发展历程

现将 100 多年来世界海洋石油钻井、完井采油及关键技术与装备的发展历程简述如下：

1897 年，在美国加利福尼亚州萨姆兰德 (Summerland) 离岸约 76.2m 的木架码头上安装钻机钻井，可视为世界上首次涉入海洋钻井。

1911 年，世界上第一座固定平台钻井装置，竖立在美国路易桑纳州的卡多 (Caddo) 湖上。

1925 年，原苏联在里海建造的人工岛上进行石油钻井。

1932 年，美国得克萨斯公司用钻井驳船“麦克布雷得号 (Mcbride)”用数只锚定位在路易桑纳州“花园岛 (Garden)”湾首次浮船钻井，但由于船上钻井器材太重而沉坐到海底，因而成为坐底式钻井平台的构想。

1933 年，按上述构想而正式设计建造的“盖娜松号 (Ciliasso)”成为业主建造的首座坐底式钻井平台在路易桑纳州的“裴脱 (Pelto)”湖钻井，井深达 1377m。

1937 年，由木质桩插入水深 4.3m 泥底的、距海平面高 4.6m 的钻井采油平台，首次在墨西哥湾的海上钻井，在海底约 1710m 深获得日产 85.9m³ 的海底石油。

1953 年，一艘巡逻艇改装的第一艘钻井浮船“沙玛瑞克斯号 (Submarex)”采用悬臂式钻井井架，首次在加州岸外进行浮式钻井。

1954 年，J. Ray mc dermott 公司建造了第一艘采用气动机械升降、可移动的自升式石油钻井装置。

1955 年，由 YF 型供应驳船改装的钻井浮船“卡斯 1 号 (Cuss1)”和具有中心船井的钻井驳船“西方勘探者号”诞生。

1956 年，美国雪佛龙 (Chevron) 公司在加州近海，创造了当时世界上海洋采油井最深的采油纪录，其采油井深达 4036m。

1960 年，由美国维高公司 (Vetco) 设计和制造的遥控钻井和采油井口的操作系统，装于壳牌公司 (Shell) 的“莫伯特 (MOBOT) 号”海洋石油钻采装置上。

1960 年，我国用驳船安装冲击钻，在海南岛岸外莺歌海盐场水道口浅海打了井深约

26m 的两口井，首次在海面上获得约 150kg 的重质原油。

1961 年，美国环球海洋公司的“卡斯 1 号 (Cuss1)”成为第一艘应用舷外马达推进器的动力定位钻井船，同年，特别为海底工作而设计了防喷器 (BOP) 和控制系统。

1962 年，第一艘半潜式钻井平台“碧水 1 号 (Blue Water No. 1)”投入使用 (可视为第 1 代半潜式钻井平台诞生)。因其原为坐底式钻井平台，工作水深 23m，为减少移位时间而在吃水 12m 的半潜状态下拖航，发现在拖航状态下平台稳定，可以钻井的启示而改装成半潜式钻井平台。

1963 年，第一个工业用的海底防喷器组 (BOP Stack) 控制系统在美国卡姆伦 (Cameron) 公司出现。

1964 年，我国茂名石油公司以“浮筒”拼装的平台装上陆用钻机，在海南岛岸外的莺歌海水道口作了浮式钻井试钻，水深约 15m，钻深 388m，获原油约 10kg。

1967 年 6 月 14 日，在我国渤海 - 1 井井深 2441m 发现工业油流，试油结果为原油 35.2t/d；天然气 1941m³/d。

1968 年，一条设计完善的“格洛玛·挑战者 (GLOMAR CHALLENGER) 号”动力定位船开始在深海进行以科学考察为目的的大洋取心钻井作业；同年，海湾石油公司 (Gulf Oil) 在美国路易桑纳州近海创造了当时海上钻井深度为 6962m 的世界纪录。

1970 年，在美国加州近海，“伍德柯 4 号 (WODECO IV)”钻井浮船首次成功地采用了钻柱升降运动补偿器；同年，该船首次创造了用导向绳系统的钻井水下设备、使用于 456m 水深的世界纪录；同年，钻井船“格洛玛·挑战者号”创造了无导向绳钻井系统在 3962m 水深重返井口的纪录。

1971 年，美国 Hunt 石油公司在路易桑纳州近海开创了采油井深度为 6248m 的海上的深井采油纪录。

1971 年，我国在渤海“海四油田”正式建立了两座固定式采油平台，累计采油 60.3 × 10⁴t，是我国第一个海上油田。

1972 年，第一座 Spar 平台在北海投入使用；同年，我国大连船厂建成国内第一艘电动液压升降的自升式钻井平台——“渤海一号”，并运用于渤海海区的钻井。

1973 年，联合石油公司 (Union Oil) 在加里曼丹近海最先应用多井口的海底井口基板 (多井口的井口盘) 用于油田开发，为以后使用导管架采油平台的井口回接装置创造了条件。

1973 年，“大洋世纪 (Ocean Century) 号”矩形半潜式钻井平台建成，是世界石油杂志 (World Oil，以下简称《WO》) 2000 年 12 期报道中建成最早、至今未升级改造、视为第 2 代半潜式钻井平台。钻井工作水深为 244m，钻井深度能力为 7620m (25000ft)。

1974 年，维高公司第一次推出了工业性的 105MPa (15000psi) 工作压力的浮式钻井海底井口头 (套管头) 组，应用在北海的“五角 84 号 (PENTAGONE 84)”半潜式平台进行浮式钻井。

1974 年 6 月，由我国自行设计建造的第一艘双体钻井浮船“勘探一号”，在南黄海利用我国自行设计制造的钻井水下设备试钻成功，第一口探井钻深 1500 余米，之后又继续成功钻井 8 口 (已退役)。

1974 年，“JW Mclean 号”半潜式钻井平台建成，1992 和 1996 年完成升级改造，为第 3 代半潜式钻井平台。钻井工作水深为 381m，钻井深度能力为 7620m；船体尺寸为长 64m ×

宽 42.7m 矩形 6 立柱平台; (《WO》2000 年 12 期报道, Transocean Co. 推荐资料)。

1975 年, 第一个工业用多路传输和声学海底钻井控制系统在美国卡姆伦公司出现。

1976 年, “七海发现者号 (Discover Seven Seas)” 钻井浮船成功地采用电、液多路传输控制系统, 用于无导向绳的水下 BOP 组的控制。

1977 年, 第一艘动力定位半潜式石油钻井平台“赛德柯 709 号 (Sedco709)”, 在格陵兰投入海上钻井作业。

1977 年, 第一个电液多路传输海底采油控制系统在美国卡姆伦公司出现。

1979 年, 世界海洋石油钻井工作水深接近 1500m (为 1486.2m)。

1979 年, 我国开始海洋石油开发对外技术合作, 与 13 个国家的 48 家石油公司签订了 8 个海洋地球物理勘探协议; 1980 年发现有利于油气生成的珠江口盆地 169 个、莺 - 琼盆地 47 个、南黄海盆地 74 个, 并在渤海发现 BZ28 - 1、BZ34 - 2 油田, 在北部湾发现 W - 103 油田, 在琼东南发现崖城 13 - 1 大气田。

1981 年 12 月, 美国瓦科 (Varco) 公司将世界上第一个成功研制的顶部驱动系统 (TOP Drive system, 简称 TDS) 正式用于自升式钻井平台上进行钻井, 替代了传统的以转盘旋转钻柱进行钻井, 是石油钻井的又一重大技术变革。同年, 我国第一座坐底式钻井平台“胜利一号”投入极浅海石油钻井作业。

1982 年, 封井压力为 105MPa (15000psi)、垂直通径为 476mm (18 $\frac{3}{4}$ in) 的海底 BOP 组、井口头组及相应工作压力等级的节流压井管汇正式在美国卡姆伦公司、维高公司、N. L 谢弗尔公司 (N. L Shaffer) 等生产并正式用于浮式钻井作业。

1983 年, 由欧洲经济共同体财政支持建造的张力腿平台 (Tension Leg Platform, 简称 TLP) 基本完工; 1984 年 8 月, 第一座张力腿平台 (TLP) 在北海 Hutton 油田安装投产。

1984 年 9 月, 由巴西石油公司在巴西近海的 PU - 2 号井创造了当时世界完井的工作水深纪录, 工作水深达 307m (突破 1000ft)。

1984 年, 世界海洋石油钻井的工作水深突破 2000m, 达 2116m。同年 5 月, 由我国自行设计建造的半潜式石油钻井平台“勘探三号”投入中国东海石油勘探钻井, 迄今已在东海成功钻发现井逾 20 口。

1986 年, 世界海洋移动式石油钻井装置发展到 946 艘, 移动式钻井装置从数量上发展到顶峰。

1986 年建成、1996 年完成升级改造的“Jack Baqtes 号”半潜式钻井平台, 为第 4 代半潜式钻井平台。钻井工作水深为 1219m (4000ft), 钻井深度能力为 9144m (30000ft); 船体尺寸为 (长) 64m $\times$ (宽) 42.7m; 立柱为矩型 4 立柱平台 (《WO》2000 年 12 期报道, Transocean Co. 推荐资料)。

1987 年, 钻井工作水深达 2292.4m (突破 7500ft)。

1987 年, 我国第一个对外合作开发的渤海埕北油田建成投产, 年产原油 40×10^4 t。该油田共有 8 座平台, 其中最大的导管架储油平台甲板负荷达 1.3×10^4 t, 可抗 1.7m 厚冰层的挤压。

1987 年, 在北海爱德华 E (Edward E), 一个获专利的特殊罐型 Spar 平台用于海上采油。

1988 年, 世界海洋石油钻井工作水深再创纪录, 达 2328m。同年, 由我国自行设计建造的当今世界上第一座液压步行式坐底式钻井平台“胜利 2 号”建成投入试用 (已退役)。

1989年,在美国墨西哥湾587m水深的张力腿平台(TLP)投入使用。

1991年3月,海底完井工作水深突破500m,达到721m,是由巴西国家石油公司在巴西近海的MRL-3号井创造的;同年,又在MRL-6号井,再创海底完井工作水深为752m的世界纪录。

1991年,全世界投入海底完井操作使用的井数突破500个,实际达669个。

1991年7月,美国联合石油公司在加州近海的A-21固定平台上钻井,其最大钻井水平位移(HD)为4535m,真实的垂直井深(TVD)为1463m,比值 $HD/TVD=3.1$;同年,其在加州近海的C30号井,以 $HD=1485m$, $TVD=294m$,创造了比值 $HD/TVD=5.05$ 的高纪录。

1992年3月,美国联合石油公司在泰国湾的FUNANE-7井,每天钻井858m,用3天零19.5小时钻完深度为3273m的井,其快速钻井世界纪录亦是该公司在泰国湾埃拉旺气田钻井创造的,其效率为1850m/d。

1994年3月31日,由菲利浦石油公司用HYCALOG 12 $\frac{1}{4}$ in DS34HG HYBRD PDC钻头,24h进尺2211.03m,如以纯钻井14.7h计,效率为150.42m/h,用一个PDC钻头钻进2833m(是在54°定向井创造的)。

1995年,在美国阿拉巴马州(Alabama)水域,由美孚(Mobil)石油公司,在Lower mobile湾的S.L350-5 Tract 95区块,创造了采气井井深达7393.23m的世界纪录。

1995年,全世界投入使用的海底完井井数超过900个,达948个,占当年实际拥有数(包括停待的井)1340个的70.75%,比上一年实际投入使用数871个提高8.8%。

1996年,用于海上采油的第一代传统的筒形Spar平台“海王星号(Neptune)”投入使用。

1996年,在日本三菱重工完成改造设计的胜利级(Victory Class)第4代半潜式钻井平台“大洋探索号(Ocean Quest)”(在日本三菱重工完成改造)、“大洋明星号(Ocean Star)”(在Avondale船厂完成改造)和“大洋胜利号(Ocean Victory)”(在Avondale船厂完成改造)。其工作水深分别达1067m(3500ft)、1372m(4500ft)和1524m(5000ft);钻井深度能力均达7620m(25000ft);可变载荷均为5000t;平台上配备钻机为Emsco C3或Oilwell E-3000;TDS为Varco TDS-4S;BOP系统为476mm(18 $\frac{3}{4}$ in)、105MPa。

1996年,在美国OCS海湾,由壳牌(Shell)近海石油公司在花园礁(Garden Bank)427的OCS-G7493 AOU井,创造钻井深度达7881.82m的纪录。

1996年7月,由挪威海事液压公司(Maritime Hydraulics)成功开发了无绞车液缸升降型(Ram Rig)钻机。它的优点是省去了庞大笨重的绞车,用升降液缸替代了绞车,同时也替代了浮式钻井庞大的钻柱升沉运动补偿器,可降低成本约30%。于1999年和2001年分别装备于建成的第5代半潜式钻井平台“西方未来II号(West Future II)”和“STENA DON”号[其工作水深为2438m(8000ft),钻深10060m(33000ft)]上及“西纳维I号(West Navion I)”钻井浮船[工作水深为2500m、钻深能力10060m(33000ft)]和“西·奥丁号(West Odin)”钻井浮船(工作水深为2500m)上。

1997年,中国海洋石油总公司南海东部公司油田作业者与其伙伴合作,在位于离香港东南130km的西江24-1油田的15/11合同区块,在西江24-3平台上顺利钻成西江24-3-A14大位移井,该井完钻深度为9238m(斜深),创水平位移为8062.7m的世界纪录,完井后,裸眼产层段最深达8961m(斜深),日产原油稳定在约1113m³(7000bbl/d)。

同年,英国石油公司再创水平位移达10113.57m的世界纪录,其垂直深度为1605.08m,水位位移与垂深比值 $HD/TVD=6.3$ 。