

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



深海浮式结构设计基础

● 张大刚◎主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

哈尔滨工程大学“十一五”研究生教材建设专项资金资助出版

船舶与海洋工程系列
CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG XILIE



深海浮式结构设计基础

● 张大刚◎主编 邓忠超 闫发锁◎参编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书总结了深海浮式结构的设计、分析以及基本方法和原理。全书共分为5章。其中,第1章主要介绍国内外海洋工程和海洋工程结构的发展现状、行业标准等基本内容;第2章主要介绍浮式结构设计的基本知识;第3章主要介绍浮式结构强度设计的基本方法;第4章主要介绍浮式结构疲劳强度分析的基本理论和方法;第5章主要介绍浮式结构屈曲强度的分析方法。

本书适用于海洋工程专业的本科生和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

深海浮式结构设计基础/张大刚主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2012. 1
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0301 - 7

I. ①深… II. ①张… III. ①浮式建筑物 - 设计
IV. ①P754

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 003319 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 380 千字
版 次 2012 年 1 月第 1 版
印 次 2012 年 1 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着世界能源消费的不断增长与陆地石油资源的不断消耗,海洋油气资源已成为未来几十年世界能源消费的重要支撑。目前,ExxonMobile, BP, Shell 等国际石油公司纷纷将开发重点指向深海油气。深海浮式结构是进行深海油气开发的重要基本工具,在深海采油的巨大需求刺激下,近年来深海浮式结构的设计、分析与建造、安装已经基于船舶工程技术形成了自身的一套完整系统。在以美国为首的采油技术发达国家该系统已趋于成熟。

本书立足于介绍深海浮式结构的设计、分析以及建造、运输、安装工程中的基本方法和原理。全书共分为 5 章。其中,第 1 章主要介绍国内外海洋工程业的发展现状,深海浮式结构的主要用途、结构分类、主要的设计内容以及参考的规范和行业标准等基本内容;第 2 章主要介绍浮式结构设计的基本知识,包括浮式结构的受力特点和设计的基本原理、海洋环境荷载、有限元分析方法等;第 3 章主要介绍浮式结构强度设计的基本方法,包括各种板材及骨材的设计、平台的局部结构分析和总体结构分析等;第 4 章主要介绍了浮式结构疲劳强度分析的基本理论和方法;第 5 章主要介绍在浮式结构设计中,各种板材、骨材屈曲强度的分析方法。

多年来,作者长期从事深海浮式结构的设计与分析工作,张大刚教授有着 20 年的深海设计和管理经验,主要从事浮式结构的设计、建造、运输、安装及项目管理。在 11 个张力腿平台、1 个半潜式平台和 3 个单筒式平台项目中担任总设计师。这些深海项目代表了当今海洋结构最先进的技术和发展方向。代表性项目包括:世界上目前已建造的最深的单筒式平台(GOM Devils Tower Platform)、世界上目前已投产的第二深的张力腿式平台(GOM Marco Polo Platform)、世界上第一个深海采油混合系统主体工程(印尼 West Seno 项目)、西非第一个深海采油混合系统工程(Amerada Hess NGB)等等。本书是作者根据多年的工作经验编写而成的,其内容为从事深海浮式结构设计的人员应掌握的基础知识。

本书由张大刚、邓忠超和闫发锁共同编写。具体分工为:张大刚编写第 1 章、第 2 章;邓忠超编写第 2 章、第 4 章;闫发锁编写第 2 章、第 3 章、第 5 章。全书由张大刚统稿。

本书在编写的过程中参阅了同行专家的大量资料和研究成果,在此向他们表示感谢。在本书的编写过程中得到了哈尔滨工程大学深海工程技术研究中心孙丽萍教授、段文洋教授、张亮教授等的大力支持与帮助,在此向他们表示感谢。

本书的出版得到了哈尔滨工程大学研究生院的资助,也向他们表示由衷的谢意。

由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者多提宝贵意见。

编 者

2011 年 9 月于哈尔滨工程大学

目 录

第1章 概论	1
1.1 世界海洋石油工业发展概况	1
1.2 中国海洋工程现状和发展趋势	6
1.3 浮式结构发展状况简述	9
1.4 浮式平台的主要分类	16
1.5 平台的外输和内输管线	17
1.6 油田开发的基本要求和平台设计的主要控制条件	22
第2章 浮式结构设计基本知识	30
2.1 各种浮式结构简介	30
2.2 浮式结构受力特点及设计的基本原理	42
2.3 海洋环境条件及波动力基本理论	58
2.4 浮式结构设计的主要内容	90
2.5 有限元分析及其在浮式结构中的应用	104
2.6 施工建造和安装对结构设计的要求	113
2.7 工程项目管理对浮式结构设计的重要性	115
2.8 浮式结构设计规范和工业标准介绍	117
第3章 浮式结构强度设计和分析	126
3.1 适用规范	126
3.2 结构设计	126
3.3 主体结构强度设计	128
3.4 局部强度设计	131
3.5 总强度设计	145
3.6 结构强度设计实例	151
第4章 疲劳强度分析设计	157
4.1 疲劳问题基础	157
4.2 疲劳裂纹的起始或疲劳开裂	166
4.3 在恒幅荷载下疲劳裂纹的扩展	174
4.4 变幅荷载下的疲劳行为	181
4.5 疲劳性能测试及其工程应用	188
4.6 疲劳强度分析和设计	207
4.7 疲劳计算实例	212
第5章 浮式结构的稳性强度设计	215
5.1 概述	215
5.2 梁与柱的屈曲	216

5.3 加筋板架的屈曲 220

5.4 圆柱壳的稳定及设计 228

5.5 稳性设计规范及其应用 236

参考文献..... 241

第 1 章 概 论

1.1 世界海洋石油工业发展概况

1.1.1 世界以及我国的能源需求

众所周知,石油、天然气是国家的重要能源。随着世界经济的不断发展,人类社会对油气资源的需求也不断上升,这对油气资源的勘探和开发提出了更高的要求。据英国石油公司(BP)《2009年世界能源统计年评》统计报告,2008年全球一次能源消费增幅为1.4%,虽然增速少许放缓,但仍然处在增长状态。我国2008年的一次能源消费量增幅明显高于世界平均水平,达到7.2%,占世界全部能源消费增量的3/4。截至2008年底,全球原油探明可采储量为1.258万亿桶(不含加拿大油砂)。如按2008年的年开采速度计算,还可继续开采42年。全球天然气探明可采储量为185.02万亿立方米,按2008年的年开采速度能满足60年的开采。报告中揭示的中国化石资源数据,呈现了一幅化石能源难以支撑我国经济社会可持续发展的现实情景。截至2008年底,中国原油剩余探明可采储量为155亿桶,仅占全球总量的1.2%,按2008年的年开采速度计算,还可继续开采11年;天然气剩余探明储量为2.46万亿立方米,仅占全球总量的1.3%,按2008年的年开采速度计算,还可继续开采32年。可见我国的能源形势已相当紧迫。

目前,世界石油工业正面临着极大的挑战。全球油气储量增长乏力,难以弥补每年的产量,然而全球的油气消费量仍将以较快的速度增长。未来巨大的油气需求将如何得以满足,这是摆在世界石油工业面前的一个大难题。根据BP的能源统计资料,全球对于油气的需求正在强劲增长。1981年的油气消费量各为29.9亿吨和1.47万亿立方米,而到2001年已分别达到35.7亿吨、2.45万亿立方米,2008年则达到了39.3亿吨、3.02万亿立方米。根据国际能源署(IEA)发布的世界能源展望预测,从2000年至2030年,世界石油需求预计年均增长1.6%,到2030年将达到57.69亿吨;天然气的需求量年均增长2.4%,到2030年将达到42.03亿吨油当量;未来油气仍将在世界一次能源需求中居主导地位,到2030年油气需求占世界一次能源总需求的65%,而且在2015年天然气将超过煤炭成为一次能源中第二大能源种类。

2030年99.72亿吨油当量的油气需求要得以满足,再加上陆上石油资源危机问题日渐突出,因此急需寻找储量的接替区域。而未来石油界的希望应该在海上,而且对于石油公司来说,海上油气的基础设施不易遭到恐怖袭击的破坏,这点使海上油气的勘探开发更有吸引力。研究世界海洋石油工业的现状特别是发展趋势,无论对于整个世界石油工业,还是对于未来世界经济的发展,都有非常重要的意义。

1.1.2 海洋油气分布与开采前景

由于目前陆地石油的勘探与开发已经开展得比较充分,海洋油气,特别是深海油气的勘探

与开发在未来的油气开发中必将占有十分重要的地位。根据《BP 世界能源统计》资料,在 20 世纪 90 年代全世界新发现的 76 个巨型油气田中(可采储量超过 5 亿桶油当量,约 6 820 万吨。其中 17 个为可采储量大于 10 亿桶油当量的超巨型油气田,约 1.36 亿吨),陆上占 36%,海上占 64%。而海上小于 500 m 的浅水区占 44%,大于 500 m 的深水区占 20%。深海地区储量约占海洋油气总储量的 12%。由于浅水油气产量的下降、勘探开发技术的进步及深水油气田平均储量规模巨大,吸引着许多石油公司都竞相涉足深海,展示了世界海洋石油工业良好的发展前景。图 1.1 描述了世界油气的分布情况。

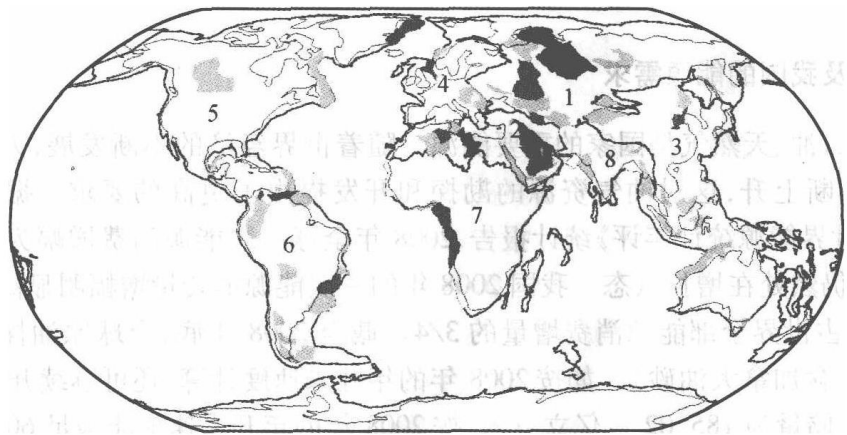


图 1.1 世界油气资源分布图

1—前苏联;2—中东和北非;3—亚太;4—欧洲;5—北美洲;6—中南美洲;7—非洲;8—南亚

注:深色表示大储量油田。

世界海洋蕴藏着极其丰富的油气资源,石油蕴藏量约 1 000 多亿吨,其中已探明的储量约为 380 亿吨,石油资源量约占全球石油资源总量的 34%。目前全球已有 100 多个国家在进行海上石油勘探,其中对深海进行勘探的有 50 多个国家。世界海洋油气与陆上油气资源一样,分布极不均衡。在四大洋及数十处近海海域中,石油、天然气含量最丰富的要数波斯湾海域,约占总储量的一半左右;第二位是委内瑞拉的马拉开波湖海域;第三位是北海海域;第四位是墨西哥湾海域;其次是亚太、西非等海域。

目前,在世界海洋中已找到了 581 处油田。其中,欧洲和地中海 25 个,北海 110 个,意大利、北亚得里海 20 个,黑海和里海 17 个,南美洲 43 个,非洲近海 27 个,西非近海 85 个,波斯湾 60 个,印度次大陆沿岸海域 2 个,远东近海 23 个,印度和马来西亚近海 15 个,澳大利亚东部和新西兰近海 3 个,澳大利亚西北大陆架 12 个,南部吉普斯兰德海盆 19 个,北海近海 44 个,美国墨西哥湾 16 个。

近年来,海洋石油开采发展迅猛。据 Mackay 咨询公司统计,1992 年世界海洋石油生产量所占份额为 26.5%,2002 年提高到 34%;1992 年世界海洋天然气生产量所占份额为 18.9%,2002 年提高到近 25.4%。2003 年世界海洋石油生产量达 12.57 亿吨,约占世界石油总生产量的 34.1%;2003 年世界海洋天然气生产量达 6 856 亿立方米,约占世界天然气总生产量的 25.8%。2003 年,世界海洋石油生产量比上年增长 3.7%,稍高于世界石油生产量 3.5% 的增长率。1992 年至 2002 年世界石油生产量年均增长率为 1.1%。在 3.7% 的增长速度下,世界海洋石油产量的增长速度是世界石油生产总量增速的 3 倍多,预计今后几年海洋石油生产仍

将以更高的速率增长。

毫无疑问,能源(尤其是石油)是一个国家国民经济发展的直接动力。随着陆地有限能源不断地减少,世界各国越来越多地转向关注海上油气的开发和生产。特别是最近十几年,随着石油价格的不断攀升,海上油气开发起步较早的一些石油公司开始把海上油气开采的范围从浅海海域逐步扩展到了深水海域。在墨西哥湾、巴西、西非、东南亚及北海等海域,深水油气的开采已经成为海上油气开发的重点。

1.1.3 海洋油气开发的主要难点

深海石油的勘探开发是石油工业的一个重要的前沿阵地,是风险极高的产业。虽然国际上诸如北海、墨西哥湾、巴西以及西非等地深海石油开发已经有了极大的发展,但代价是极高的。与大陆架和陆上勘探钻井作业相比,深水作业的施工风险高、技术要求高、成本非常昂贵,因而资金风险也极高。

深海油气资源勘探最直接的风险是极大的施工风险。海洋平台结构复杂、体积庞大、造价昂贵、技术含量高,特别是与陆地结构相比,它所处的海洋环境十分复杂和恶劣。风、海浪、洋流、海冰和潮汐等时时作用于平台结构,同时还受到地震、海啸的威胁。在此条件下,环境腐蚀、海生物附着、地基泥层冲刷和基础动力软化结构材料老化、构件缺陷、机械损伤以及疲劳和损伤累积等不利因素都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,影响结构的服役安全度和耐久性。

虽然深水油气勘探开发的风险很大,但所获得的回报也很大。道格拉斯·威斯特伍德公司和 Infield Systems 工业数据公司联合出版的《世界深水报告》指出,世界成熟浅水区域油气新发现的规模正大幅下降,例如,近五年欧洲近海投产油气田的平均规模约为 9 000 万桶油当量,而今后其规模将减少 50% 以上。浅水油气田的总储量虽然仍占主导地位,但主要是与中东一些巨型油田所占的比重有关。然而,深水油气田的平均储量规模和平均日产量都明显高于浅水油气田。因此,尽管深水油田勘探开发费用显著高于浅水,但由于其储量和产量高,使得单位储量的成本并不很高,深海采油前景广阔。

1.1.4 目前海洋油气开发情况

海洋勘探开发始于 20 世纪初。从那以后,随着技术的进步,深水的定义在不断地扩大。在 1998 年以前,只要离开大陆架即水深大于 200 m,就认为是深海。1998 年以后水深扩大到 300 m,而现在普遍认为水深大于 500 m 为深水。

技术的进步使得钻井越钻越深。始于 20 世纪 40 年代的海上石油工业用了近 30 年的时间实现了在 100 m 深水区生产油气,又用了 20 多年达到近 2 000 m 深的海域,而最近 10 年油气生产已接触 3 000 m 深的水域。尤其在钻井、浮式生产系统和海底技术方面的改进和创新,大大降低了深水油气勘探开发的资本支出和作业支出。1998 年以来,深水油气勘探开发的平均资本费用呈下降趋势,每桶石油的资本支出已从 10 年前的 6 美元/桶下降到现在的不到 4 美元/桶。深水油气勘探开发项目的综合成本与浅水项目越来越接近。深水油气项目的开发周期(从发现到油气投产)越来越短,20 世纪 90 年代后期发现的油气田一般在 5~6 年内投入生产,而在 10 年前至少需要 8 年时间。随着深水基础设施的不断完善,开发周期还可能进一步缩短。

世界海洋平均深度值约为 3 730 m,水深 500 m 以内的浅海海域仅占海洋总面积的很少一部分,水深在 6 000 m 以上的深海海域也仅占海洋总面积的 1.38%,而在海洋总面积中占绝大部分的水深在 500 ~ 6 000 m 之间的大量深海海域尚未勘探,等待人们去开发。因此,深水海洋经济的发展是人类可持续发展的重要组成部分,辽阔的海洋深水区域及其丰富的资源,也为海洋深水工程科学研究提供了用武之地。

随着国际深水油气田的不断发现和开发,传统的导管架平台和重力式平台由于其自重和工程造价随水深大幅度地增加,已经不适应深水油气开发。国际海洋工程界为此不断地进行开发研究和技术创新,取得了巨大的成就。目前,世界深水区域已探明储量达 440 亿桶油当量,未发现的潜在资源量大约有 1 000 亿桶油当量。据资料统计,在 2000 年至 2004 年间,世界新建 114 个深水生产设施、深水钻完井 1 400 口、水下采油装置 1 000 套、铺设深水海底管线及立管 12 000 km,预计总投资达 565.7 亿美元。

当前,世界上深水油田的开发主要集中在西非海域、巴西海域、东南亚海域、墨西哥湾和北海等几个热点地区。基本开发情况简要介绍如下:

(1) 西非海域 在安哥拉深水区,法国的 TOTAL 公司在 17 区块发现了 8 个油气田,美国的 Chevron 公司在 14 区块发现了 7 个油气田,美国的 Esso 等公司在 15 区块共发现了 6 个油气田,Exxon Mobil 公司在该区块已发现 12 个油气田,英国的 BP 公司在 18 区块发现了 3 个油气田;在尼日尔三角洲深水区,自 1995 年以来发现了 Bonga, Ngolod, Erha, AKPO, Dalia 等数个大型油气田;在赤道几内亚和加蓬等地区,深水勘探和开发都在积极进行之中。近几年,西非的勘探开发活动很频繁。西非地区已成为世界上最有活力和最有前景的勘探开发区域之一。西非进行深海油气开发的主要国家是尼日利亚和安哥拉。尼日利亚的深水开发占据了西非海上油气开发主要的支出增长,据 PFC 能源咨询公司预测,尼日利亚和安哥拉的深海油气开发支出将一直保持在 20 亿美元/年。

(2) 巴西海域 巴西作为海洋石油勘探开采技术的领先国家,占据了 2003 年海洋采油的主要份额,约为 120 万桶/日,到 2008 年,这一数字上升到将近 220 万桶/日。自从 1998 年中期巴西勘探开发市场开放以来,Campus, Sergipe - Algoas, Santos 和 Espirito Santo 这四大盆地的新发现增加了 39.85 亿桶石油储量和 4 144 亿立方米天然气储量。而且巴西一直在深海勘探开发技术中处于领先地位。1997 年,巴西创造了在 1 709 m 水深作业的世界纪录。在 2003 年,巴西的探井和开发井都达到了 3 000 m 水深以上。巴西大多数的深水 and 超深水油田都处在 Campus 盆地,其中三个超深水巨型油田 Marlim, Albacora 和 Roncador,预计可采储量将超过 80 亿桶。因此,由于巴西具有先进的深海勘探开发技术和经验,在将来巴西仍将是一个非常重要的深海油气产区。

(3) 墨西哥湾 美国墨西哥湾的海洋油气工业诞生于 20 世纪 40 年代的路易斯安那海岸。从此之后,海洋油气开发稳步发展,开发领域已遍布全球。到 1974 年,海上石油产量占世界石油供应量的 14%,目前,这个比例已达到 1/3。至 20 世纪 90 年代中期,海上天然气的产量占天然气总产量(6 384 亿立方米/日)的 25%。20 世纪后期,海洋油气产业已占据了举足轻重的地位。

据美国 Minerals Management Services(MMS)估计墨西哥湾有油气 1 360 亿桶油当量,可能有 40% 来自深水(超过 300 m 水深)。从 1985 年到 2004 年,美国墨西哥湾外部大陆架深水(大于 300 m)油气的产量占美国墨西哥湾外部大陆架总产量的比重在不断加大。1985 年,美

国墨西哥湾外部大陆架深水油气的产量分别占总产量的 6.01% 和 0.83%。而到 2004 年深水石油年产量为 3.48 亿桶,占美国墨西哥湾外部大陆架石油总产量的 65.13%;深水天然气产量为 389.2 亿立方米,占总产量的 35.21%。尽管深水油气勘探投入大、风险高,但其平均储量和产量很大,因此对石油公司仍有很大的吸引力。

(4) 东南亚地区 东南亚地区是世界上重要的深海油气储藏地区之一,约有 100 多个深海沉积盆地。这些盆地多属于被动大陆边缘盆地或与被动大陆边缘相关的弧后盆地或裂谷盆地,且往往是浅水区及陆上勘探的延伸,与世界上其他深水盆地构造相似,但地层构造相对复杂。该地区的深水区域也相对较浅。油气储层常为白垩系或第三系,且多为第三系深海浊积砂岩。2003 年之后,东南亚进入深海勘探的活跃期,大部分深海油气田都是在这—时期发现的,深海储量和产量都增长迅速。2003 年至 2008 年,在东南亚发现的新增探明油气可采储量近 96 亿桶油当量(包括陆地和浅海),其中油和气各占一半。在目前大于 200 m 水深的海域中,新增探明储量最多的国家为马来西亚(17.8 亿桶),其次为印度尼西亚(5.54 亿桶)。近五年,仅这两个国家共发现深海油气可采储量 23.35 亿桶油当量(包括 16.139 亿桶油,1 080.24 亿立方米天然气),占东南亚地区这一时期总的新增探明可采储量的 24.3%。除这两个国家外,其他深海沉积盆地主要位于中国南海、越南、缅甸、泰国、菲律宾和文莱有争议的海域。

(5) 北海地区 北海的石油开发起步于 20 世纪 60 年代早期。1971 年第一口油井完成,1975 年管网铺设到英国提兹塞德。但这个油田直到 20 世纪 80 年代油价上涨,真正具有开发经济价值以后才大规模开发。由于北海恶劣的海洋环境,钻井的费用和危险性很大。到 20 世纪 80 年代用于开发有效并安全的新技术和新方法的费用,远远超过 NASA 发射火箭把一个人送上太空的费用。实际上,北海周边的海床早就发现了石油渗漏现象,但是仅有有限的几个小的岸上的开发区块。1938 年进行了第一口试验井钻探。二战后的 1959 年进行了少量的岸上油田开发,最终在 Netherlands 的 Groningen 附近的 Ten Boer 试验井有重大的天然气发现。经过随后几年的评估,1963 年证实 Groningen 油田具有巨大的开发潜力。由此,北海石油开发逐渐扩大。1969 年,北海石油开发成功,并相继有新的油田发现。随后北海石油的开发成为世界上投资最大的项目之一。

从以上背景数据中可以看到,在世界海洋石油的快速发展中,为寻找新的油气资源,各国纷纷进入深水及超深水领域,使得深水油田开发成为世界工业史上科技进步的热点之一。与浅水油气开发相比,深水油气的开发具有高技术、高风险、高投资、高回报率和多模式等特点。正是由于深水油气开发的特点及其特有的挑战性,带动了一系列科学技术的进步和发展,尤其是在深海工程的关键技术领域取得了举世瞩目的成就。

1.1.5 海上油气发展趋势

20 世纪 70 年代前,世界海洋油气开采平台仅建在低于 100 m 水深的海域;20 世纪 70 年代后期,钻井技术的发展使得深水石油开采超过 300 m 水深。最早的深水石油开发技术采用水下生产系统及浮生生产系统(如 FPSO 或 FPU)相结合的形式,此时的生产系统还比较简单,而巴西是当时最早发展深水技术的国家。20 世纪 80 年代,墨西哥湾开始发展深水技术,开始使用较为复杂的具有更强控制及监测能力的生产系统。20 世纪 90 年代,墨西哥湾首次采用成本较低的“干树”装置,并应用到没有储油及卸货能力的平台类型如张力腿平台及深吃水单筒式平台。

Douglas-westwood 咨询公司发布于 2005 年的《世界海洋油气预测》认为,世界海洋油气产量将从 2004 年的 3 900 万桶油当量每日增加到 2015 年的 5 500 万桶油当量每日。2004 年海洋油气产量分别占全球总产量的 34% 和 28%,到 2015 年将分别达到 39% 和 34%。而且该报告指出,世界海上石油产量从 1960 年开始,一直在稳步上升,大约在 2010 年左右将达到一个峰值。从各大区域来看,北美海上石油产量仍将有小幅度的增加,而西欧海上石油产量自 2000 年达到峰值后,将一直保持下降的势头。到 2015 年,非洲、中东和拉丁美洲将占世界海洋石油产量的 50% 以上。

天然气特别是海上天然气将越来越重要,这是 Douglas-westwood 咨询公司的观点之一。天然气占海洋油气产量的比例将从 2004 年的 24% 上升到 2015 年的 40%。这将引起在天然气基础设施上的投资增加。这些基础设施包括管线、液化天然气厂、天然气合成油加工厂、油轮运输、装油和卸油终端等。并且,从 1960 年至 2015 年,海洋天然气产量会一直在快速增长,而且在 2015 年还未达到峰值。而到 2010 年左右,世界海洋石油产量将出现稳产。但是由于海上天然气产量的大幅度增加,因此海上油气总量仍在不断增长,且天然气在其中的比重将越来越大。从地区来看,除了西欧海上天然气产量在 2010 年以后开始下降外,其他地区都将保持增长的势头。到 2015 年北美、西欧、亚洲和中东地区的海上天然气产量将占全世界的 70% 左右。

Douglas-westwood 咨询公司认为,海上油气的勘探、开发、经营总成本目前大约是 1 110 亿美元/年。接下来的十年总成本共计 1.44 万亿美元,十年间将共产油气 2 000 亿桶油当量。

由于浅水油气勘探比较成熟且未来产量有所下降,因而资本支出基本不变。然而,深海油气由于储量巨大,单位储量的成本不高,投资的内部收益率高,因而,那些因为高油价而有大量现金且又缺乏好的投资机会的石油公司,都愿意在深海“豪赌一把”,使得 2005 年至 2015 年间全世界海上支出增长主要在深海地区。

1.2 中国海洋工程现状和发展趋势

1.2.1 中国海洋油气资源概况

我国沿海和海域面积辽阔,大陆海岸线长达 18 000 km,大陆架面积近 110 万平方千米,管辖海域有 300 万平方千米。海洋油气资源十分丰富。我国渤海、黄海、东海和南中国海都有大面积的沉积盆地,石油资源达 400 亿吨以上,天然气达 15 万亿立方米之多。根据 1994 年至 2000 年的统计,在中国油气增量中,海上石油占 78.71%,海上天然气占 40.48%。在“十五”计划中,我国石油的增量全部靠海上;在我国渤海、南海、东海还在不断探明新的油气田。因此,我国油气生产的增量主要来自海洋,海洋油气已成为我国能源生产重要的组成部分以及国民经济的一个新的增长点。我国南海被称为“第二个波斯湾”,自 20 世纪 60 年代以来,南海的油气价值逐渐被人们认识到。经初步估计,整个南海的石油地质储量大约在 230 亿 ~ 300 亿吨之间,约占中国总资源量的 1/3,属于世界四大海洋油气聚集中心之一。据海南省政协提案提供的数据,截至 2009 年,南海勘探的海域面积仅有 16 万平方千米,而发现的石油储量有 55.2 亿吨,天然气储量有 12 万亿立方米,南海油气资源可开发价值超过 20 万亿元人民币,在未来 20 年内只要开发 30%,每年可为中国 GDP 增长贡献 1 ~ 2 个百分点。然而,油气资

业新的主战场,正实现着高速高效的发展。因此,加大海洋石油开发力度和减少对石油进口的依赖程度是我国国家能源发展的战略需要。

据统计,目前在断续线内的中国南海海域,约有 10 多个国家的 100 多家公司从事油气的开采,每年开采的天然气和油气约有 3 000 多万吨。与周边国家在南沙大量开采形成鲜明对照的是,中国在南沙还没有实现油气开采。相反,中国每年都要从上述各国进口大量的石油。中国海洋石油总公司已经意识到深水油田勘探开发的重要性和紧迫性,在南海 1.9 万平方千米的深水海域进行了大量的勘探作业。可以预见,深水油气资源开发必将成为未来我国海洋石油开发的主战场,对保证我国经济的可持续发展具有重要的战略意义。

国家已经意识到深水油田勘探开发的重要性和紧迫性。2002 年 10 月,中国海洋石油总公司颁布了《中国海洋石油总公司发布在中国南海北部陆架深水区对外合作开采海洋石油资源的招商通告》,宣布中国海洋石油将从此走向深海。辽河、大港、胜利等油田也逐渐向近海海域发展。在中国的南海,国家将 12 个海上深水区块(水深从 500 m 到 2 500 m)对外招标开放。目前已经同加拿大、美国等石油公司签署了开发协议。

中国近几年来在南海的勘探工作取得了显著的成果,3 000 m 作业水深的第六代半潜式钻井平台海油 981 号也于 2011 年 8 月建成。这一切都说明我国的深海油气田开发已经提到议事日程当中。作为油田开发的最关键一步的平台结构选型,既需要丰富的工程经验,又需要很多的准备研究工作。这一工作不仅直接影响到工程项目的顺利进展、工程的造价,更直接关系到整个项目的成败。

1.2.3 中国海洋发展的广阔前景

国内浅海的海洋油气开发已经有四十余年的历史,尤其是对外开放的二十余年,国内的海洋油气工业获得了快速发展,积累了丰富的经验。现有国内海洋油田开发模式主要包括:全海式、半海半陆式和混合式。值得一提的是,中国特色的海洋油气工业和工程模式,带动和形成了中国自主的 FPSO 产业,使国内 FPSO 的综合能力(包括研究、设计、建造、安装、操作和管理)居于国际先进水平,海洋工程的综合能力达到国际同类水平,为我国海洋油气工业向深水拓展奠定了基础。

近两年来,由中国国家海洋石油公司(CNOOC Ltd,简称中海油)同加拿大赫斯基能源公司(Husky Energy Inc)合作,相继在南中国海东部海域发现了三个深海气田:荔湾 3-1、流花 34-2 和流花 29-1。这三个深海油气田都具有很高的商业开采价值,其中荔湾 3-1 气田的前期开采工作已于 2009 年正式开始。珠江口盆地 29/26 区块是 2010 年钻获的一个重大油气发现,具体位置在流花 29-1 区块。这是赫斯基能源公司在该海域附近钻获的第三个,也是最新的深水天然气发现。这个重要发现将加快该公司对亚洲业务的拓展。流花 29-1 是一个商业开采价值极高的优质区块,蕴藏的都是优质天然气。

流花 29-1 距荔湾 3-1 气田东北方向 43 km,距流花 34-2 东北方向 20 km,距离香港大约 300 km。流花 29-1 区块 1 号井的钻探深度达 3 331 m,该处海域水深约 720 m。在钻杆测试中,该井可日产天然气 159.6 万立方米,预计投产后每天可产天然气 252 万立方米。赫斯基能源公司在声明中说:“发现的这三处油气田证实了我们当初对南海油气资源的预测,估计整个区块可能蕴藏天然气 1 120 亿~1 680 亿立方米。”目前赫斯基能源公司已经对荔湾油气田展开商业开采,该公司已经向中国有关部门提交了开发流花 34-2 区块的申请,预计到 2013

年可以投入开采。作为合作伙伴,根据协议,中海油将享有新油气发现 51% 的权益。

伴随着国家对能源需求的日益增长,我国近年来启动了各种能源工程,加大了对能源的投资。把能源提高到了国家的战略角度,成立了国家能源委员会。针对南中国海将来的发展和走向深海的方向,技术储备和设备储备都已启动,国家在一些和深海领域有关的重大专项,业已取得了初步成绩。可以预见,随着第一个深海项目荔湾 3-1 的全面展开,中国的海洋工程在未来的五到十年间,将全面展开,为我国未来的能源发展多样化作出应有的贡献。

1.3 浮式结构发展状况简述

1.3.1 浮式结构的历史

海上油田的开发从海岸到 500 m 的水深花了很长时间,而从 500 m 水深到 2 000 m 水深只用了十几年的时间。这样的发展速度得益于深海平台技术的不断更新和发展,特别是近年来张力腿式平台和立柱式平台技术的出现和更新。这些新技术的出现使得深海开采工具具有了更加丰富的功能。包括部分生产能力或全生产能力,钻井支持功能,“干井”井上直接操作支持功能,以及很多其他的组合。

这些使油田开发不断挑战深海的新技术概括起来主要体现在以下几个方面:第一,新的平台主体结构形式。这些新形式的出现使得结构的总体性能进一步提高,最有代表性的是伸张式张力腿平台和 MOSES 桁架式立柱平台;第二,轻型的上部结构。深海平台排水量对上部荷载的比率通常都在 2 以上,上部荷载的减少对平台的造价有很大的影响;第三,不断改进的锚固系统。

深水工程技术的不断发展为深海油气田开发提供了多种工程模式的可选择性。确定深海油气田开发工程模式要依据油藏模型分析、油藏开采方式、采油设施选择、安全评估和经济评价等分析的结果。在各种技术方案安全可行的情况下,起决定因素的是经济评价的结果。随着技术方面的逐渐成熟,深海油气田开发工程成本在逐渐降低。确定采油设施方案的主要因素有井的模式(分布或丛式)、原油输出方式、油田寿命、地域差别、油气比、上部质量、井数、水深、钻/修井方式、干/湿采油树、立管方案、浮体改造或新造等。地域差别主要是指环境条件、工程的习惯做法和以往经验,如巴西在深海采用半潜式平台(SEMI)和浮(船)式生产储油平台(FPSO)比较多,美国墨西哥湾用的张力腿式平台(TLP)和筒式平台(SPAR)比较多。

如果说深水工程技术的发展是一场技术革新,那么引领这场深海采油技术革新的便是各种新型浮式平台的不断涌现。最初的浮式生产平台大都是由钻井半潜或船体改建而成。由于受到初始设计的限制,这些平台的生产能力受到很多制约,水深也受到很大限制。第一个张力腿平台(Hutton TLP)于 1984 年在欧洲北海投入使用,标志着深海浮式生产系统进入了一个新的阶段。此后张力腿平台、单筒式平台,以及新建的半潜式平台以各种不同的形式,将深海油气田的开发不断推向新的阶段。

世界上第一个浮式生产系统位于英国北海的 Argyll 油田。由 Hamilton Brothers 油气公司在 1975 年 6 月投入生产(Hammett, et al, 1977)。这个生产平台由钻井半潜平台 Transworld 58 改建而成。最初该油田由四个海底油井组成,这些油井由海底管线连接到位于平台下方的油井控制系统(Manifold)上。这个油区是在 1972 上半年发现的,使用浮式平台的决定是在

1973 年 2 月份作出的,油区的建设是在 1974 年 6 月正式开始的。Argyll 是北海油田大开发早期,第一个英国北海原油直接穿过海滩送达英国的工程。这个项目取得了以下两个重要成就:其一是项目的开发费用仅等同于以固定式平台为主开发的 1/3;其二是项目生产出第一桶油所需要的开发时间约为传统式开发方式的一半。

第二个浮式生产系统于 1977 年 8 月投入生产。这个项目是壳牌公司在西班牙的 CASTELLON 油区开发的,它使用了一个由船体改建的生产系统,从一个单一的海底油井生产原油(图 1.3)。

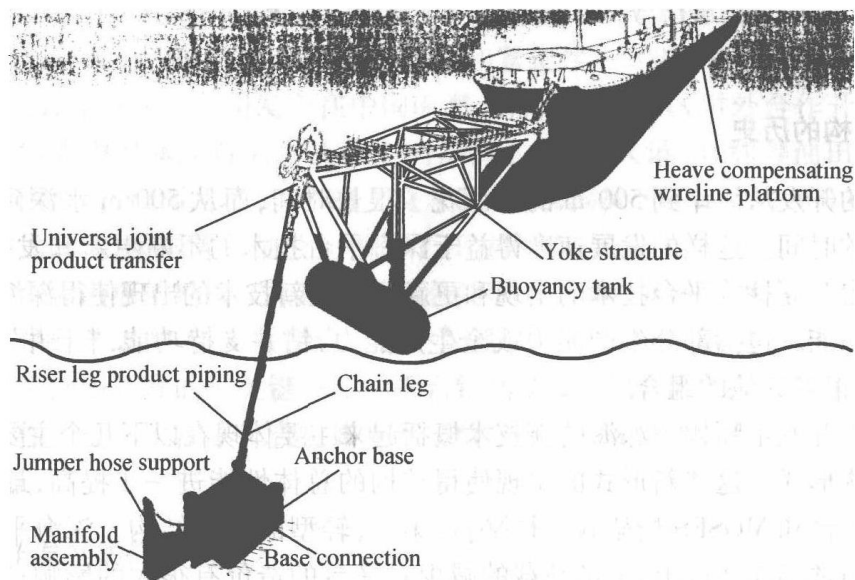


图 1.3 CASTELLON 船体改建的浮式生产系统,西班牙海岸,1977

世界上第一个张力腿平台具有完全钻井和生产功能,于 1984 年在欧洲北海投入生产(图 1.4)。平台位于水深 150 m 的油区。张力腿采用内镶式、分段无自浮力和分离式导架基础。总共有 12 根张力腿,分 4 组布置在平台的 4 根角部柱子的侧面,每组由 3 根张力腿组成。平台的主体由 6 个竖向筒体和 4 个水平向环体组成。这是至今唯一一个有六个竖向筒的张力腿平台。其他的张力腿平台都是由 4 个或 3 个竖向筒组成。

张力腿平台的投入使用开辟了深海干树采油的新纪元。由于张力腿竖向位移很小,使得竖向张拉立管的使用成为可能,也因此能够满足干树的使用要求。此后出现的单筒式平台,由于使用了分离的立管浮筒,也同样满足了竖向张拉立管的使用要求。近十几年来,深海工程中先后出现的各种各样的干树钻井采油平台都可以归于这两种不同的深海平台概念。

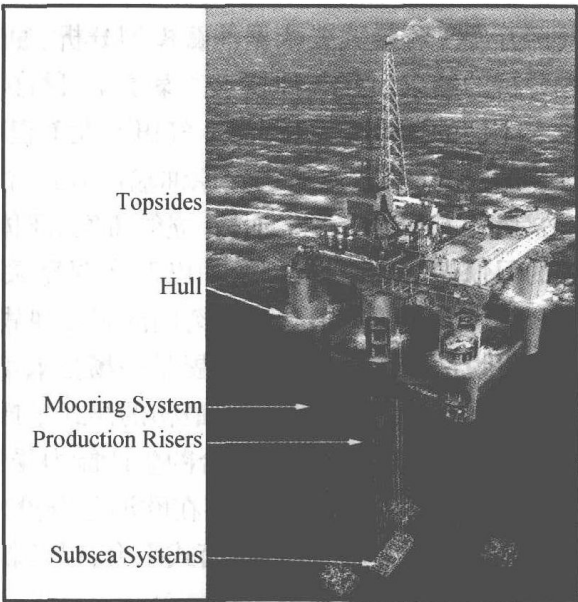


图 1.4 北海 HUTTON 张力腿平台

1.3.2 浮式结构在深海能源开采中的作用

海上采油平台分为坐地平台和浮式平台两大类。坐地式平台包括固定式和柔顺式两种，主要靠导管架直接支撑于海底。浮式平台有各种形式,包括船式和半潜式。下面所列的是海上采油平台的各种类型,大部分在图 1.5 中都有所示。

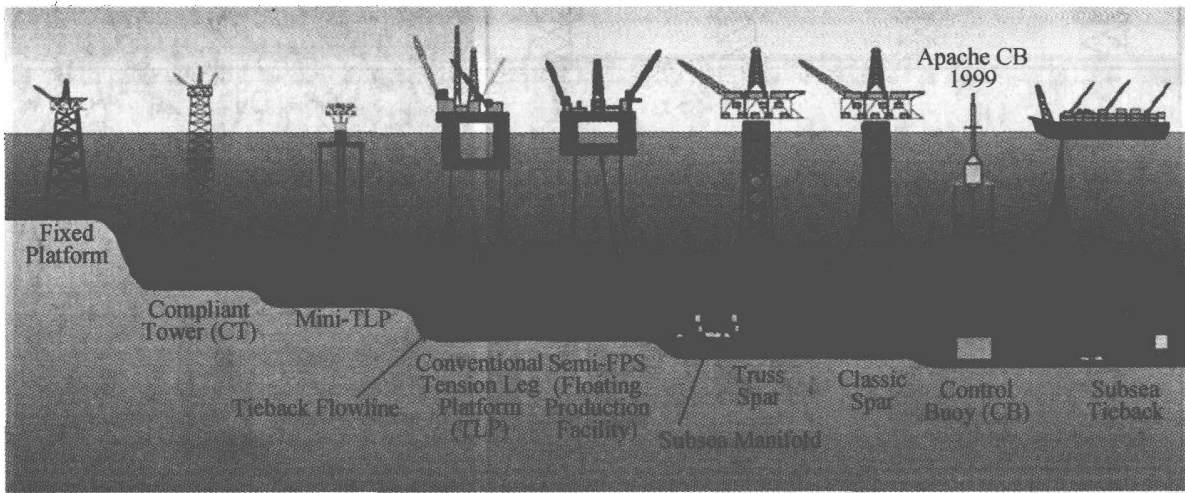


图 1.5 深水采油平台分类图

- (1) 固定式平台；
- (2) 柔顺塔平台；
- (3) 半潜式生产平台；
- (4) 自升式平台；
- (5) 钻井船；
- (6) 浮式生产系统(FPSO,FPU,FPO 等)；
- (7) 张力腿平台；
- (8) 单柱式平台；
- (9) 正常无人平台结构。

海上油气工程中,随着水深的增加,传统的导管架平台质量增加很快。为了抵抗弯矩的增长,下部截面会增长很快,当水深超过 300 m 时,导管架结构已变得很不经济。作为向深水平台的过渡,柔顺塔结构在水深 300 m 到 550 m 的范围得到了应用。柔顺塔结构以结构的顺应变形来减少作用于结构上的极限荷载,节省了造价。图 1.6 所示是现在已建成的柔顺塔,右图是最近刚建成投产的 Chevron 在西非的 Benguela Belize Compliant Tower。此柔顺塔平台水深 390 m,设计寿命 25 年。

对于水深超过 500 m 的油气田的开采,通常采用浮式结构(图 1.7)。浮式结构由锚固系统通过张力锚固于海底,所需的浮力由主体结构提供。由于浮式结构处于不停的运动中,其工程设计要比导管架结构复杂得多。浮式结构的使用,使得深海油气田的开发成为可能,也带来了近几十年来海上油气开发的黄金时代。

深海采油平台主要分两大类:干树采油平台和湿树采油平台。干树采油平台有张力腿式平台和单柱式平台;湿树采油平台有半潜式生产平台和各种船式生产储油平台。