

海底管道

铺设技术

© 李志刚 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

深水海底管道铺设技术

李志刚 主编



机械工业出版社

本书是根据国家“十一五”863计划“深水海底管道铺设技术”课题研究成果编撰的专著。对当今世界上深水海底管道铺设技术和课题最新研究成果进行了详尽的阐述。

本书主要涉及铺管工艺、铺管计算分析方法、立管安装工艺和计算、铺管主要装备设计和试验方法,并结合深水海底管道铺设技术当前发展状况、相关标准规范和理论原理以及对相关技术未来发展的预测和分析,全方位地完成深水海底管道铺设前沿技术和主要装备的论述。

本书主要面向海洋工程技术人员和相关专业在校研究生,同时也希望能对其他专业和方向人员起到一定的借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

深水海底管道铺设技术/李志刚主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-111-38261-4

I. ①深… II. ①李… III. ①水下管道—海底铺管—工程技术—研究 IV. ①P756. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 088713 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:何文军 责任编辑:何文军 肖耀祖

责任校对:常天培 封面设计:张 静

责任印制:乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.75 印张·3 插页·484 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38261-4

定价:128.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

销售一部:(010)68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

《深水海底管道铺设技术》

编写组

顾 问：曾恒一

主 编：李志刚

副主编：赵冬岩 房晓明

编写者：（按姓氏笔画为序）

丁庆新	马保家	马洪文	马厦飞	王 茁	王 辉
王 懿	王立权	王晓波	白 宁	任 平	刘 军
何 宁	张 宏	张 岚	张仕民	李 欣	陈东良
陈景浩	陈瑞燕	周灿丰	岳前进	罗 超	金伟良
段梦兰	钟朝廷	曹 军	梁凌云	龚顺风	喻开安
焦向东	谢 鹏	燕 晖			

序

我国是海洋大国,准备建设海洋强国,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》和《“十二五”科学技术发展规划纲要》都将开发海洋油气、发展大型海洋工程技术与装备作为国家战略,要求将深海作业技术作为优先主题和提高核心竞争力的、具有高附加值的现代产业体系,予以重点支持与优先发展。海底管道是海底油气输送的通道,深水海洋管道铺设作业目前在上世界上仅有少数几个国家拥有相关技术,是制约我国深海油气资源开发的主要瓶颈之一。为了加快推进海洋深水油气田的勘探开发进程,国家科技部和发改委非常重视,并将该领域关键技术的研究列入国家863计划与重大专项的研究课题,加大了科技投入开展有关技术研发工作。

国内对于深水海洋工程的前期研究主要集中于海洋结构物及海洋环境载荷方面,对于深水铺管技术和装备方面的研究于“十一五”期间才正式开展,尚未有相关此专业技术方向的著作出版发行,这在一定程度上影响了我国深水油气田的开发和深水技术人才的培养。《深水海底管道铺设技术》著作的完成将弥补我国在深水海洋工程技术书籍方面的欠缺,为海洋工程技术人员和相关专业在校研究生提供参考,同时也能对深水工程其他专业的研究思路起到一定的借鉴作用。

本书作者团队拥有几十年的海上施工作业经验和深水铺管技术及装备研究成果的基础,从第一线的角度阐述了技术的细节,使本书具有了更接近实际工程的指导性。

本书内容主要基于“十一五”863计划重点研究课题“深水海底管道铺设技术”的研究成果。通过对深水海底管道铺设技术所涉及的铺管工艺、铺管计算分析方法、立管安装工艺和计算分析方法、深水海底管道铺设试验技术和铺管主要装备的阐述,并结合当前世界深水工程开发模式、深水海底管道铺设技术发展状况、相关标准规范和理论体系的研究和分析,比较系统地论述了深水海底管道铺设前沿技术和主要装备。本书还就我国第一条深水铺管起重船“海洋石油201”的基本情况进行了介绍。

本书的出版为我国深水海洋工程技术领域的发展和深水工程作业进行了前期的技术储备和准备,将对我国实现由海洋浅水向深水的跨越起到积极的促进作用。

曾恒一

前言

深海是当今世界油气勘探开发的热点,也是我国具有前景的勘探开发领域。我国海洋深水区蕴藏着丰富的石油和天然气资源,我国目前的海洋油气开发工程技术和装备能力已远远不能适应深海油气勘探和开发的需要。

目前世界各国普遍采用海底管道作为海洋油气资源的主要输送方式。海底管道输送具有运输量大、效率高、密闭安全、能耗少、运费低等特点,已被越来越多的国家和油气开发公司所采用。随着海洋油气勘探开发步伐由浅水迈向深水,深水海底管道及相关水下设施的铺设和安装技术在深水工程开发中显得越发重要,已成为影响我国深水油气田开发的关键问题。本书针对深水海底管道铺设中的关键技术、分析方法和主要装备,进行深入阐述。

本书作者团队主要从事海洋工程设计、海底管道铺设设计和计算分析、海管铺设系统及设备分析、海洋工程试验研究等工作,具备二三十年的海上施工和研究经验,承担多个国家863项目、重大专项项目和省部级科研课题。本书是在作者团队多年工程实践和研究成果的基础上编写而成的。

全书共分7章。第1章介绍了国内外现有的深水工程开发模式和相关的开发设施,提出了影响深水开发工程模式选择的关键因素;第2章总结了海底管道的发展及施工方案和相关标准规范,总结了深水海底管道的S形铺设技术、方法以及对应的监测技术,针对深水钢悬链线立管(SCR),论述了其发展历程、安装方法、安装监测技术和适用规范;第3章介绍了海底管道回接技术和相应的回接位置精确测量方法;第4章在前述几部分施工技术和方法基础上,比较系统地介绍了适用于进行深水铺管计算分析的理论和数值方法,并针对深水铺管过程和立管安装过程给出了相应的计算分析方法和算例,给出了深水海底管道弹塑性屈曲分析方法;第5章系统介绍了适用于深水海底管道铺设系统的模型试验方法、深水立管安装模型试验方法、深水托管架模型试验方法和深水管道路回接试验方法;第6章总结了当前世界采用的深水海底管道铺设系统及其主要设备,同时对作者团队所研究的管道自动焊接设备、AUT检验设备、管道输送系统、张紧器、深水铺管托管架、收放绞车、深水海底管道回接机具和深水海底管道回接位置精确测量设备进行了介绍;第7章对我国第一条深水铺管起重船“海洋石油201”的基本情况进行了介绍。

“十一五”期间,本书作者团队在深水海底管道铺设技术方面的研究得到了国家高新技术研究发展计划(863计划)项目——深水海底管道铺设技术(项目编号:2006AA09A105)的支持。本书的出版也得到了上述项目的资助,在此表示衷心的感谢!

参加本书相关内容编写的除了编写组成员外,还有曹为、付剑波、王琮、周雷、刘维、李丽娜、吴灿刚等为书中部分章节内容提供了帮助,对他们为本书内容所作出的贡献表示感谢!本书部分内容参阅了同行专家的资料和科研成果,特向这些研究成果的作者表示感谢!

本书作者团队在研究过程中一直得到了中国海洋石油总公司科技发展部、海洋技术总体专家组和海洋石油工程股份有限公司各级领导的帮助和指导,在编写过程中,又得到了作者

团队所在单位的支持和帮助，编者特表示由衷的感谢！

限于我国的研究基础和本书所涉及技术的复杂性，也限于编者的水平，本书不可避免地存在诸多缺陷和错误，请读者们给予批评指正。

编 者

2012 年 5 月 15 日

目 录

序

前言

第1章 深水工程开发模式	1
1.1 国内外深水工程开发模式	1
1.1.1 国外深水工程开发模式	1
1.1.2 国内开发模式推荐	2
1.2 开发设施简介	3
1.2.1 深水平台	3
1.2.2 水下设施	10
1.2.3 深水立管	11
1.2.4 深水工程开发模式的影响因素	13
1.3 参考文献	15
第2章 深水海底管道铺设	16
2.1 概述	16
2.1.1 海底管道及立管的发展现状	16
2.1.2 海底管道施工方法综述	17
2.1.3 深水海底管道铺设相关标准规范	21
2.1.4 深水铺管主要装备及机具	23
2.2 深水海底管道铺设方法	24
2.2.1 确定项目总体情况	24
2.2.2 工程船舶及机具	24
2.2.3 铺设前期准备	26
2.2.4 起始铺设	27
2.2.5 正常铺设	29
2.2.6 终止铺设	30
2.2.7 弃管和回收	30
2.3 SCR 立管安装方法	31
2.3.1 SCR 立管首端安装方法	31
2.3.2 SCR 立管末端安装方法	32
2.3.3 SCR 立管安装工程实例	37
2.4 深水海底管道 S 形铺设监测技术	40
2.4.1 海底管道铺设基本过程检测	40
2.4.2 深海铺管水下勘测和定位技术	44
2.5 深水立管安装监测技术	56

2.5.1 立管失效	56
2.5.2 监测原理	57
2.5.3 监测对象及监测方法	58
2.5.4 监测设备	60
2.6 参考文献	62
第3章 深水海底管道回接技术	66
3.1 概述	66
3.2 深水海底管道回接位置精确测量方法	66
3.2.1 拉绳智能测量方法	66
3.2.2 水声测量方法	67
3.3 深水海底管道回接方法	69
3.3.1 跨接管回接	72
3.3.2 拉入式回接	75
3.3.3 垂直定位和水平回接	76
3.3.4 回接工艺比较	77
3.4 参考文献	78
第4章 深水铺管计算分析方法	79
4.1 概述	79
4.1.1 线性梁法	79
4.1.2 差分法	81
4.1.3 悬链线法	84
4.1.4 非线性有限元法	98
4.2 深水海底管道铺设计算	102
4.2.1 深水铺管荷载	102
4.2.2 起始铺设计算	108
4.2.3 正常铺设计算	110
4.2.4 弃管和回收计算	111
4.2.5 立管安装计算	113
4.2.6 深水铺管计算实例	117
4.3 深水海底管道弹塑性屈曲分析	124
4.3.1 海底管道的屈曲问题	124
4.3.2 管道材料与荷载	125
4.3.3 薄壁管道弹性应力分析	127
4.3.4 厚壁管道弹性应力分析	133
4.3.5 管道防止屈曲的极限条件	141
4.3.6 管道弹塑性应力分析	156
4.4 参考文献	169
第5章 深水海底管道铺设试验技术	173
5.1 概述	173

5.2 深水海底管道铺设系统模型试验方法	173
5.2.1 离散模型试验方法的提出	174
5.2.2 离散管道力学模型动态应力分析与计算	174
5.2.3 试验方案	180
5.2.4 2000m 管道模型试验结果和分析	181
5.2.5 3000m 离散管道模型试验结果和分析	183
5.2.6 结论	183
5.3 立管提升设备模型试验	183
5.3.1 试验目的	185
5.3.2 试验理论基础	185
5.3.3 边界条件推导	187
5.3.4 试验设备及组装	189
5.3.5 模拟立管安装过程	191
5.3.6 试验测量参数	193
5.3.7 试验工况	193
5.3.8 试验步骤	194
5.3.9 数据结果分析	194
5.4 深水托管架模型试验方法	198
5.4.1 试验目的	198
5.4.2 试验原理	198
5.4.3 模型制作	200
5.4.4 环境荷载模拟	200
5.4.5 试验测量	201
5.4.6 试验类型	202
5.4.7 结论	203
5.5 深水管道回接试验方法	205
5.5.1 管道法兰连接机具简介	205
5.5.2 试验系统组成及试验设备	206
5.5.3 试验步骤	207
5.5.4 试验过程	208
5.5.5 试验结果	210
5.5.6 结论	210
5.6 参考文献	211
第6章 深水海底管道铺设主要设备	213
6.1 当前世界深水海底管道铺设装备	213
6.1.1 管道自动焊接设备	214
6.1.2 AUT 检验设备	214
6.1.3 管道输送系统	215
6.1.4 张紧器	215

6.1.5 深水托管架	216
6.1.6 A&R 绞车	216
6.1.7 深水海底管道回接机具	217
6.1.8 海底管道回接位置精确测量设备	217
6.2 管道自动焊接设备	217
6.2.1 海底管线铺设焊接技术概述	217
6.2.2 海底管线 S 形铺设焊接工艺与设备	218
6.2.3 海底管线 J 形铺设焊接工艺与设备	221
6.2.4 钛合金海洋立管焊接工艺与设备	223
6.3 AUT 检验设备	224
6.3.1 相控阵 AUT 检验原理	225
6.3.2 管道环焊缝 AUT 设备	230
6.4 管道输送系统	235
6.4.1 概述	235
6.4.2 国外铺管船管道输送系统集成技术的现状	235
6.4.3 国内铺管船管道输送系统集成技术	237
6.5 海洋铺管船用张紧器	242
6.5.1 张紧器国内外发展现状和技术水平	242
6.5.2 张紧器系统组成和工作原理	243
6.5.3 张紧器总体设计方案	244
6.6 深水铺管托管架	254
6.6.1 概述	254
6.6.2 托管架功能及类型	254
6.6.3 托管架主要部件及功能	255
6.6.4 托管架操作注意事项	257
6.7 A&R 绞车	258
6.7.1 A&R 绞车的国内外现状和技术水平	258
6.7.2 A&R 绞车的系统组成与工作原理	259
6.7.3 双滚筒绞车和储缆绞车的结构设计	260
6.7.4 A&R 绞车的维护、操作与应急	263
6.8 深水海底管道回接机具	264
6.8.1 管道对接机具	264
6.8.2 螺栓连接机具	268
6.8.3 液压卡爪式连接机具	273
6.8.4 软管连接机具	276
6.8.5 水下机械手	278
6.9 深水海底管道回接位置精确测量设备	282
6.9.1 系统组成	282
6.9.2 作业流程	283

6.9.3 设备结构组成	284
6.9.4 控制系统	286
6.9.5 海底管道位姿监测界面	287
6.10 参考文献	289
第7章 深水铺管起重船“海洋石油 201”简介	292
7.1 概述	292
7.2 铺管作业线系统	293
7.2.1 主作业线	293
7.2.2 双节点预制线	294
7.3 重型海洋起重机	294
7.4 DP 系统	295
附录 专业词汇英汉对照表	296

第 1 章 深水工程开发模式

深海蕴藏了大量的油气资源，不断出现的新技术推动着深水以及超深水石油开发工程的发展。世界范围的深海石油勘探开发热潮兴起于 20 世纪 70 年代末，虽然至今仅有 20 多年的历史，但技术创新层出不穷，促使深海油气产量迅速增长，尤其在深水油气勘探开发的“金三角”——美洲的墨西哥湾、南美洲的巴西海域及西非海域，深水石油作业更是取得了令世人瞩目的发展。海洋石油开发工程中一般包含平台、水下设施、连接管线等部分。其中立管连接海上平台系统与水下井口，并通过油轮输送油气或者由管线直接输送上岸。

1.1 国内外深水工程开发模式

1.1.1 国外深水工程开发模式

美国、巴西和西非通过实施持续的深水技术研发计划，其深水油气田开发规模和深水技术水平居于世界领先，并已在生产实践中逐步形成了适合本国海域特点的较为成熟的深水油气开发工程模式。

(1) 美国的深水工程开发模式

由于美国对浮式生产储油装置的限制，采出的海上油气只能通过海底管道输送上岸，所以墨西哥湾建立了发达的海底管道/管网，干线和支线纵横交错，为平台外输管线的接入和油气外输创造了便利条件，从而形成了“浮式钻采平台 + 水下井口/水下生产系统 + 海底管网”的油气田开发工程模式，简称“美国模式”（图 1-1-1）。

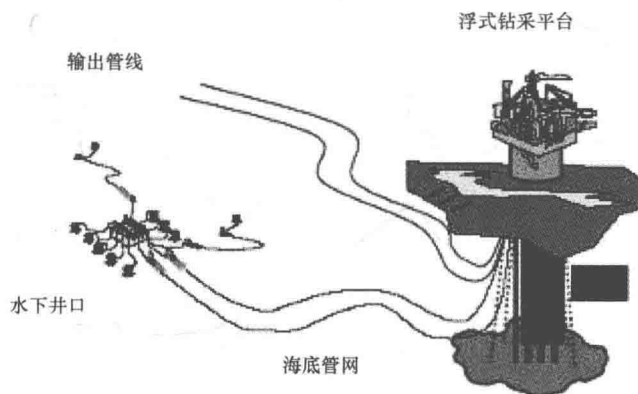


图 1-1-1 “浮式钻采平台 + 水下井口/水下生产系统 + 海底管网”的工程模式

(2) 巴西的深水工程开发模式

巴西石油公司针对其海域大陆架的特点，通过技术研究和生产实践，形成了“半潜式平台 + 水下井口/水下生产系统 + FPSO/FSO”的油气田开发工程模式，简称“巴西模式”。

这种模式充分利用了三种设施的特点，将钻采、生产、贮存和外输等多种功能组合起来，基本成为巴西深海石油开发的标准模式，如图 1-1-2 所示。

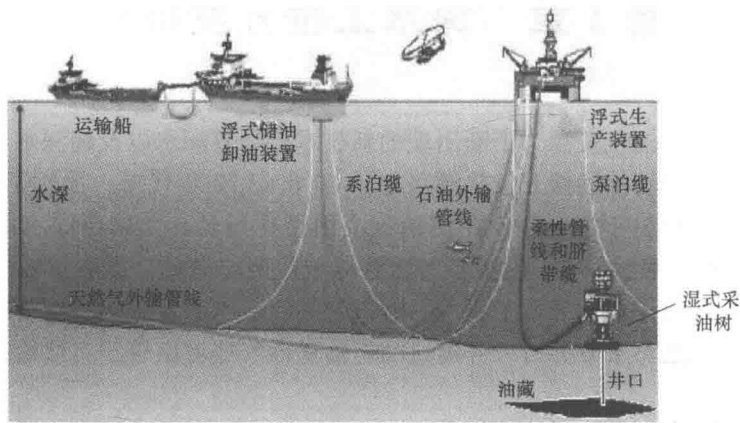


图 1-1-2 “半潜式平台 + 水下井口/水下生产系统 + FPSO/FSO” 的工程模式

(3) 西非的深水工程开发模式

西非的海洋环境条件相对于墨西哥湾而言比较有利。西非油公司 ExxonMobil 已经成功地将浮式生产系统用于安哥拉、赤道几内亚及尼日利亚油田的开发，并形成了“FPSO/FSO + 水下生产系统”的油气田开发工程模式。这种模式充分利用了小型 FPSO 的特点，为西非的深水开发做出了重大贡献，如图 1-1-3。

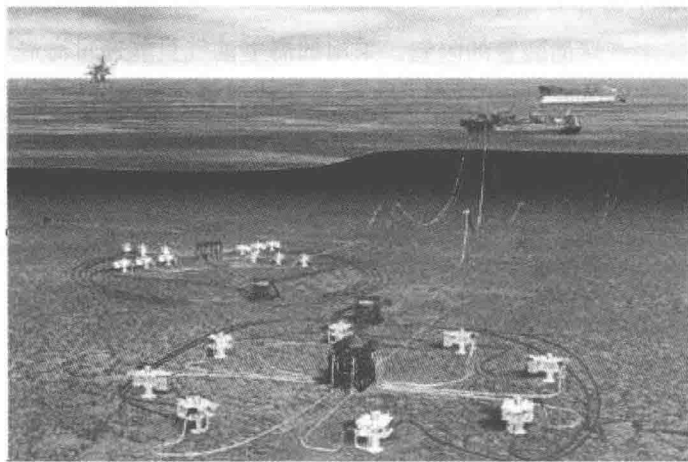


图 1-1-3 “FPSO/FSO + 水下生产系统” 的工程模式

1.1.2 国内开发模式推荐

目前南海深水油气田开发模式如图 1-1-4 所示。

“南海模式”体现出以下特点：

- 1) 适应国内海底管网缺乏的现状。
- 2) 部分借鉴“巴西模式”成功的经验。

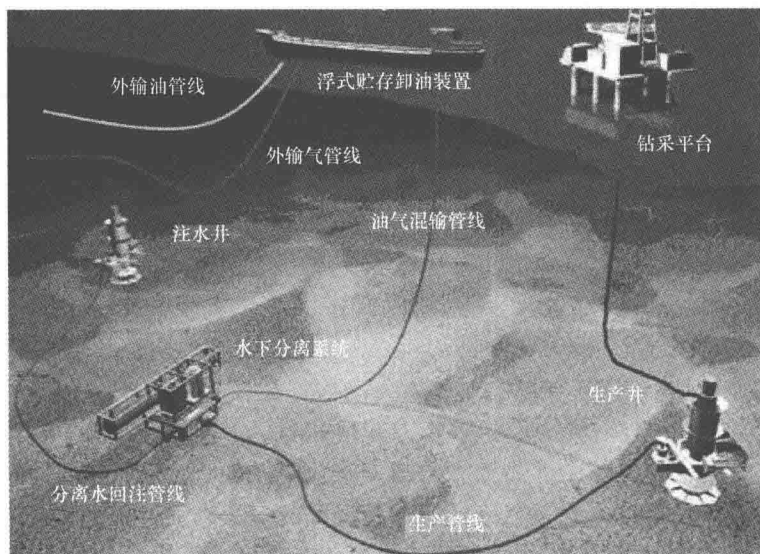


图 1-1-4 南海深水油气田开发模式

3) 部分借鉴墨西哥湾的经验，浮式平台形式选择可灵活多样。

4) 充分发挥国内 FPSO 的资源优势。浮式钻采平台有多种类型，应根据工程实际充分论证，合理选择。

1.2 开发设施简介

1.2.1 深水平台

适用于深水工程的新型平台不断涌现，这些技术概括起来可分为四大类：张力腿式平台、柱筒式平台、半潜式平台和浮（船）式生产平台。在每一大类中，又有很多不同的技术概念。图 1-2-1 给出了各种不同平台结构的示意图。本章就不同形式平台的使用和特点分别进行介绍。

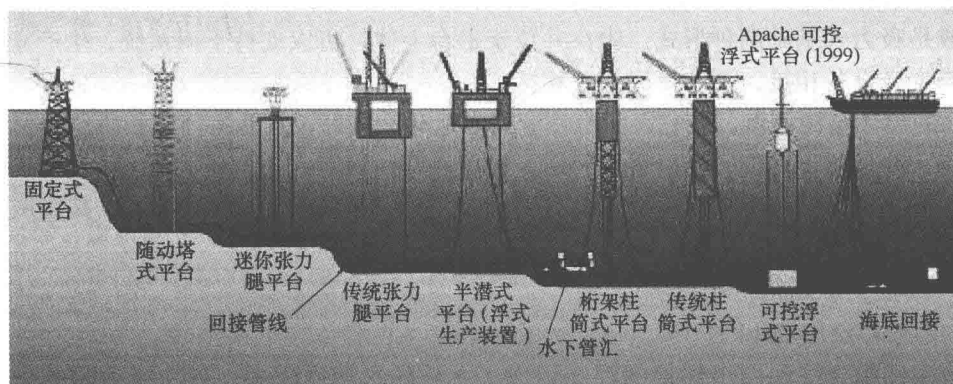


图 1-2-1 平台类型

1.2.1.1 张力腿平台——TLP

1954年美国的P. D. Marsh提出采用倾斜系泊方式的索群固定的海洋平台方案。1960年,世界上诞生了张力腿平台的概念。1984年,CONOCO公司在英国北海Hutton油田建立起世界上第一座TLP。张力腿平台经过近50年的发展,已经形成了比较成熟的理论体系。

进入20世纪90年代之后,TLP的发展进一步加速,在生产区域方面,TLP的应用已经从北海和墨西哥湾扩展到了西非沿海;在平台种类方面,TLP已经在原有的传统类型TLP基础上,发展出了迷你TLP、海之星TLP、扩展式TLP等多种新概念张力腿平台,加之不断采用新的科学技术,TLP在降低成本、提高适应性、稳定性和安全性道路上取得了长足的进步。下面简要介绍TLP的总体结构。

(1) TLP总体结构

TLP由上部组块、浮体、张力腿、顶张力井口立管、悬链式立管(外输/输入)和桩基础构成。浮体的作用是保持足够的浮力使张力腿一直处于伸张状态,并能支撑上部组块和立管的重量。张力腿的作用是把浮式平台拉紧固定在海底的桩基础上,使平台在环境力作用下的运动处于允许的范围内。张力腿平台有四种类型,如图1-2-2所示,除传统式张力腿平台外,其他三种都有专利保护。

TLP是一种典型的顺应式平台,通过数条张力腿与海底相连。TLP的张力筋腱中具有很大的预张力,这种预张力是由平台本体的剩余浮力提供的。在这种以预张力形式出现的剩余浮力作用下,张力腿时刻处于受预拉的绷紧状态,从而使得平台本体在平面外的运动(横摇、纵摇、垂荡)近于刚性,而平面内的运动(横荡、纵荡、首摇)则显示出柔性,环境荷载可以通过平面内运动的惯性力而不是结构内力来平衡。TLP在各个自由度上的运动固有周期都远离常见的海洋能量集中频带,一座典型的TLP,其垂荡运动的固有周期为2~4s,而纵横荡运动的固有周期为100~200s,这就避免了调和共振的发生,显示出良好的稳定性。

一座典型的TLP的总体结构,一般都是矩形或三角形,平台上体位于水面以上,通过4根或是3根立柱连接下体,立柱为圆柱形结构,主要作用是提供给平台本体必要的结构刚度。平台的浮力由位于水面之下的沉体浮箱提供,浮箱首尾与各立柱相接,形成环状结构。张力腿与立柱呈一一对应,每条张力腿由1~4根张力筋腱组成,上端固定在平台本体上,下端与海底基座模板相连,或是直接连接在桩基顶端。有时候为了增加平台系统的侧向刚度,还会安装斜线系泊索系统,作为垂直张力腿系统的辅助。海底基础将平台固定入位主要有桩基或是吸力式基础两种形式。中央井位于平台上体,可以支持干树系统,生产立管通过中井上与生产设备相接,下与海底油井相接。

TLP的总体结构特点,使它在深海作业具有运动性能好、抗恶劣环境作用能力强、造价低等优点,并且便于移位,可以重复利用,通用性好。因此,张力腿平台作为优秀的深海平台,受到世界多国的高度重视,我国也将TLP技术列入第二个“863”计划,其发展一直备受关注。

(2) 典型TLP结构

1) 传统式TLP(CTLTP)

平台由四根立柱和四个连接的浮箱组成。立柱的水切面较大,自由浮动时的稳定性较好。一般采用上部结构安装好后,拖到场地连接到张力腿上。

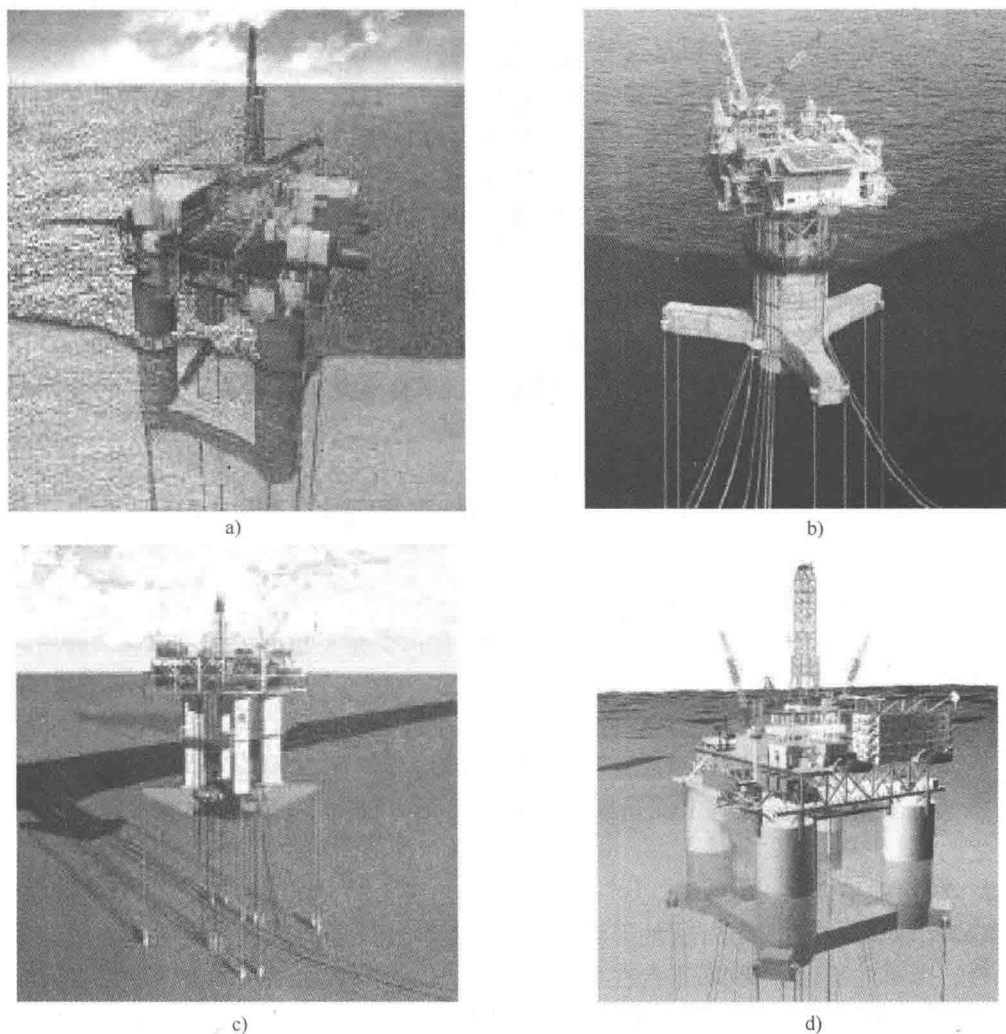


图 1-2-2 张力式腿平台

a) 传统式张力腿平台 b) 海之星张力腿平台 c) 迷你张力腿平台 d) 扩展式张力腿平台

2) 海之星 TLP(STLP)

由一根柱子和三个连接的张力浮体组成, 由于自由浮动时的稳定性极差, 主体和上部结构的安装都需要吊体辅助。这种结构对上部结构限制较大。通常只需要 6 根张力腿。

3) 迷你 TLP(MOSES)

迷你 TLP 是“最小化深海水面设备结构”(Minimum Offshore Surface Equipment Structure)的简称, 由底部一个很大的基座和四根柱子组成, 张力腿连接到基座上, 浮力主要由基座提供。主要特点是动力反应性能好。由于柱子的水切面较小, 自由浮动时的稳定性受到一定限制。

4) 扩展式 TLP(ETLP)

扩展式 TLP 是在传统式张力腿平台上延长张力腿支撑结构, 使结构的动力性能有很大的提高。