



石油高等院校特色规划教材

# 海洋平台与结构工程

高云 熊友明 编著



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

石油高等院校特色规划教材

# 海洋平台与结构工程

高 云 熊友明 编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了各类海洋结构物(包括海洋平台、定位系统、海底管道及立管)的结构特性和适用范围,阐述了风、浪、流、冰、地震等载荷的相关计算方法,重点介绍了与结构工程相关的力学基础知识以及使用这些知识对海洋结构物进行静力学分析和动力学分析的各种方法。

本书可作为高等院校海洋油气工程类专业及相关专业的教材或参考书,也可供从事海洋平台工程相关领域的科技人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海洋平台与结构工程 / 高云,熊友明编著. —北京:  
石油工业出版社,2017.7

石油高等院校特色规划教材

ISBN 978 -7 -5183 -1974 -9

I. ①海… II. ①高… ②熊… III. ①海上平台—结  
构工程—高等学校—教材 IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 160295 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)64523694

图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东股份有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:12

字数:280 千字

---

定价:29.00 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

“海洋平台与结构工程”是海洋油气工程专业的核心课程,而目前关于这一方面的教材不多,且普遍存在的问题是教材内容起点较高,本科生学习起来有一定难度。为此,我们编写了这本起点较低、由浅入深、循序渐进的教材,旨在使广大海洋油气工程类专业本科生通过学习本教材后能够对这门课程有一个全面和深入的理解,并为以后从事我国海洋油气工程领域相关工作打下坚实的基础。

本书注重基本概念和方法的介绍,各章节内容逻辑性和连贯性较强,其主要内容如下:

第一章主要介绍了海洋平台的基本知识。由于本书所涉及的海洋平台是一个完整的海洋平台系统,包括海洋平台、海洋平台定位系统、海底管道以及立管系统等,因此本书中将海洋平台系统统称为海洋结构物。

第二章主要介绍了海洋环境载荷。这部分内容是后续内容的基础,也是海洋平台知识与结构工程知识的过渡。对于前期开设了“海洋环境与载荷”这门课程的学校,这部分内容可以不讲或者少讲;而对于前期没有开设该课程的学校,这部分内容可以作为后续知识的铺垫。

第三章~第七章主要介绍了结构工程。这部分内容包括结构工程的一些基础知识以及如何利用这些知识对海洋结构物进行力学分析。海洋结构物力学分析包括静力学分析和动力学分析。静力学分析又可细分为强度分析和稳定性分析。由于强度分析在本科生所学的材料力学教材中介绍较多,本书不再涉及,而侧重于介绍海洋结构物的稳定性分析。动力学分析按海洋结构物的自身特性又可细分为单自由度系统、多自由度系统以及连续系统的动力学分析。鉴于疲劳分析通常作为动力学分析的最终目标,本书将其单独列为一章。

本书由西南石油大学海洋油气工程研究所高云、熊友明编著。杨家栋、王盟浩、郑文龙、王小梅、谭暖、彭庚、刘黎明等承担了部分绘图工作以及文档校对工作,在此向他们表示真诚的感谢。本书的出版得到国家自然科学基金(编号:51609206)以及中央财政资金的资助,特此致谢。

由于编著者水平有限,加上编写时间仓促,书中错误和不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正,以便今后修订完善。

编著者

2017年3月

# 目 录

第一章 海洋结构物概述	1
第一节 海洋结构物的发展历史	1
第二节 海洋平台	4
第三节 浮式结构定位系统	32
第四节 海底管道以及立管系统	36
思考题	49
第二章 海洋结构物环境载荷	50
第一节 流体力学基础知识	50
第二节 风载荷以及流载荷	52
第三节 地震载荷、冰载荷和波浪抨击载荷	54
第四节 波浪的确定性描述	57
第五节 波浪的统计性描述	65
第六节 波浪载荷	72
思考题	83
第三章 海洋结构物静力学分析	84
第一节 静止流体的基本特性	84
第二节 浮力以及稳定性	85
第三节 压力积分法	91
思考题	95
第四章 海洋结构物单自由度系统动力学分析	97
第一节 单自由度系统振动基础知识	97
第二节 单自由度线性系统固有频率	105
第三节 单自由度非线性系统固有频率	113
第四节 单自由度系统响应函数	116
思考题	117
第五章 海洋结构物多自由度系统动力学分析	120
第一节 多自由度系统振动基础知识	120
第二节 多自由度系统运动方程求解	132
第三节 海洋结构物多自由度系统应用举例分析	140
思考题	148

第六章 海洋结构物连续系统动力学分析	149
第一节 梁模型和索模型运动方程	150
第二节 索模型动力响应	160
第三节 梁模型动力响应	163
思考题	166
第七章 海洋结构物疲劳分析	168
第一节 疲劳分析基础知识	168
第二节 应力疲劳	173
第三节 变幅载荷谱作用下的疲劳寿命	178
第四节 随机载荷谱作用下的疲劳寿命	180
第五节 海洋结构物疲劳寿命估算	182
思考题	184
参考文献	186

# 第一章

## 海洋结构物概述

随着人类对能源需求的日益增加,逐渐枯竭的陆地资源已不能满足人类活动需求。因此,对海洋资源的开发以及利用是人类共同面临的问题。据统计,世界石油资源储量大约为  $10000 \times 10^8 \text{t}$ ,可开采量约  $3000 \times 10^8 \text{t}$ ,其中海底储量为  $1300 \times 10^8 \text{t}$ ;世界天然气储量约为  $(255 \sim 280) \times 10^{12} \text{m}^3$ ,其中海洋储量达  $140 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。因此,我们必须加大对海洋油气资源的开发。

海洋结构物是勘探与开发海洋油气过程中必不可少的设备,它包括各式各样的海洋平台、海洋平台定位系统、海底管道以及立管系统。本章对不同类型海洋结构物的特性以及发展状况进行简要介绍。

### 第一节 海洋结构物的发展历史

最早用于海洋油气开采的结构物可以追溯到 19 世纪。1887 年,一个木制的结构物出现在太平洋南加州的萨默兰港湾(Southern California, Summerlands),随后出现了越来越多的木制海洋结构物被用于海洋油气的开采,如 1911 年出现在美国路易斯安那州的喀多湖(Caddo Lake, Louisiana)以及 1927 年出现在委内瑞拉的马拉开波湾(Maracaibo Lake, Venezuela)的结构物。由于木制材料本身的局限性,在海洋生物的作用下其使用寿命大幅下降。因此,人们逐渐使用混凝土结构以及钢结构来替代木制海洋结构物。

通常认为世界上最早的海洋平台于 1947 年出现在墨西哥湾(Gulf of Mexico),当时的工作水深约为 6m。自从第一个海洋平台成功安装后,越来越多的海洋平台(固定式海洋平台、顺应式海洋平台以及浮式平台)出现在浅海、深海以及极深海区域。截至 1975 年,海洋平台的工作水深可达到 144m。仅 20 世纪 90 年代就有 5 艘固定式平台出现在水深超过 300m 的海域,最深的固定式海洋平台为 1991 年安装在美国墨西哥湾的 Bullwinkle 油田,工作水深达 412m。固定式海洋平台可工作水深的发展历史如图 1-1 所示。

尽管大多数固定平台都是钢结构导管架平台,但是在某些海域由于其海洋环境非常恶劣,出现了另一种新型平台,即混凝土平台。20 世纪 80 年代到 90 年代,在北海区域、巴西、加拿大以及菲律宾沿海区域出现了很多混凝土平台。其中,1996 年安装在北海区域的 Troll 采气平台是目前世界上最高的混凝土平台。平台全高 369m,建造花费了  $245000 \text{m}^3$  混凝土。混凝土平台不同于其他固定式平台,它可通过自身的重量非常稳定地坐在海床上,如 Troll 平台在自身的重力作用下可嵌入海床深度达 36m。

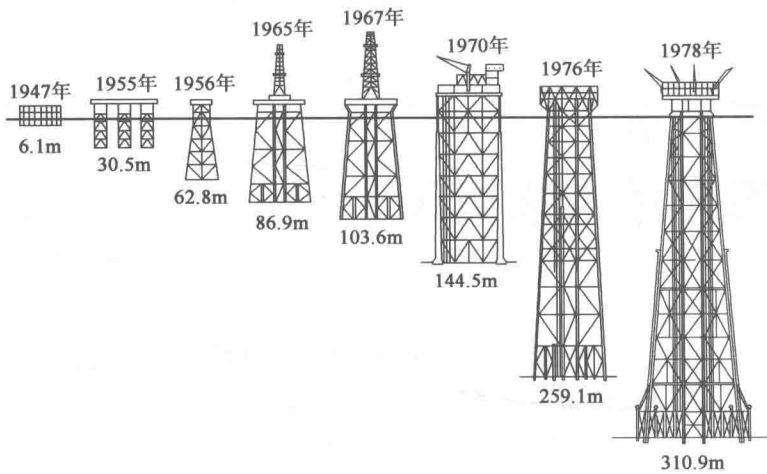


图 1-1 固定式海洋平台发展历史

随着人类对海洋油气的开采,浅水海域的油气资源逐渐变少,人们不得不把油气开发投向工作水深更深、环境更为恶劣的深海水域。但无论是导管架平台还是混凝土重力式平台,平台自身的重量均随着水深的增加而上升。图 1-2 表示北海以及墨西哥湾海域导管架平台的重量与水深的关系。从图中可以看出,导管架平台的重量随着工作水深的增加而呈急剧上升趋势。平台越重,所需消耗的材料(钢材或混凝土)则越多,造价成本越高。平台工作水深每增加 100~200m,平台的成本则要增加到原成本的 3~6 倍。

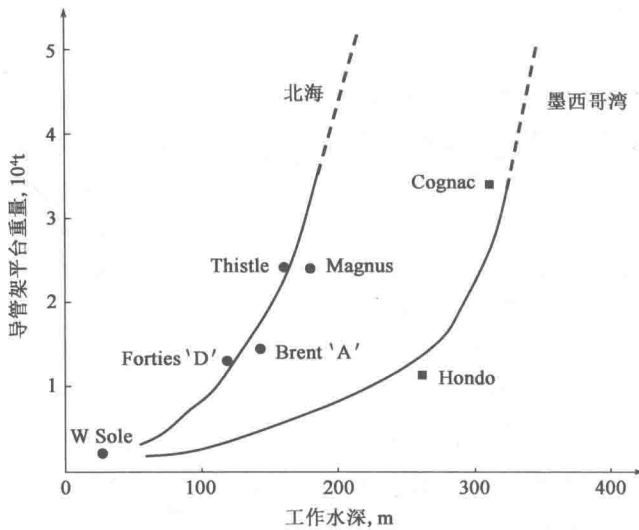


图 1-2 导管架平台的重量与水深的关系

为了满足越来越深的深水油气开发需求,人类逐渐尝试采用新的海洋平台。为此,出现了另一种新式平台——顺应塔式平台(compliant platform)。塔式平台的上部结构可以随着风和波浪的作用而发生一定程度的运动,四周通过锚链系统固定。如 1998 年安装在墨西哥湾区域的 2 个顺应式平台,分别处于 502m 以及 535m 水深的 Balapate 平台以及 Petronius 平台。

截至 1995 年,全世界约 30% 的原油来源于海洋,其中 3% 的原油来自于超过 300m 的深水区域,未来石油开采的发展趋势将逐步向大于 300m 的深海以及大于 1500m 的极深海发展。



图 1-3 是近些年墨西哥湾区域极深海水域油气井数量分布情况,可以看出深海油气田开发正在迅速发展。随着石油开采逐步向极深海水域发展,塔式平台同样不能满足油气开采的需求,因此出现了各式各样的浮式平台,如张力腿平台、半潜式平台、钻井船以及浮式生产和储运系统等。世界上第一艘浮式平台是 1975 年安装在英国北海区域的半潜式平台;世界上第一艘“船形”浮式生产和储存系统出现在西班牙 Castellon 海域,是由壳牌石油公司在 1977 年安装使用的。截至 2002 年,世界上存在 40 艘半潜式浮式生产系统 (semi-submersible floating production system, FPSs) 以及 91 艘“船形”浮式生产和储存系统 (floating production and storage systems, FPSOs)。

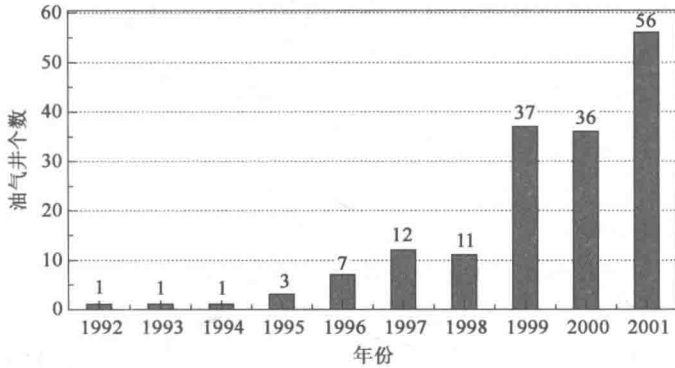


图 1-3 墨西哥湾极深海水域油气井数量分布情况

图 1-4 表示了各种海洋平台的造价与工作水深之间的关系。从图中可以看出,随着水深的增加,固定式平台的造价上升趋势非常快。与固定式平台相比,浮式平台中的张力腿式平台造价上升要缓慢很多;而浮式平台中的半潜式平台以及油轮的造价随着工作水深的增加则基本保持不变。因此,在深水区域,从成本角度来说,更应选取浮式平台用于油气开采。

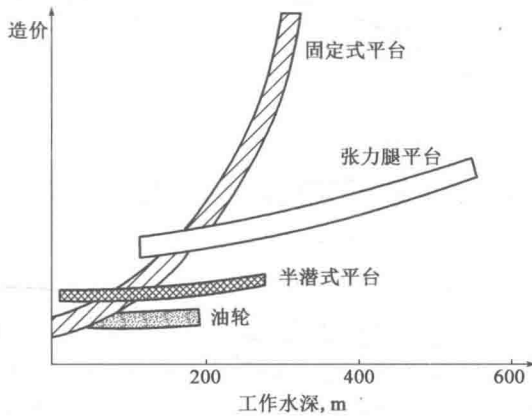


图 1-4 各种海洋平台的造价与工作水深的关系

锚链系统是固定深水浮式平台必不可少的设备,锚链系统的作用是保证浮式平台在工作过程中处在一个相对稳定的位置。海洋管线系统同样是海洋油气开发中的必需装备,它主要用来运输油气。海洋管线可分为两大类:铺设在海床上的海底管线和海洋立管。截至 2014 年,世界上大约已存在 80000km 的海底管线。自从 1986 年以来,每年出现的海底管线长达 1000km。世界上最长的海底管线是 1992 年挪威完成的从 Troll 海域到 Belgium 海域的管线,

该管线长度达到 1000km;最粗的海底管线的最大口径达到 152cm。一般来说,细的管线用来将油气从井口运输到上端平台,粗的管线用来卸载和装载油轮和陆地终端之间的油气。

## 第二节 海洋平台

海洋平台是一种在海洋上进行作业的工作场所,是进行海上钻井以及采油等工作的一种海洋工程结构。海洋平台按照其功能可以分为钻井平台、生产平台、生活平台、储油平台等。钻井平台的目的是了解海底地质构造(遗迹)、矿物储藏情况;生产平台又叫采油平台,是专门从事海上油气的开采、处理、储藏、监控和测量等的生产性平台;生活平台是为工作人员提供起居以及生活设施的平台;储油平台是为生产平台所生产的原油提供短期储存、具有一定储量的平台。

海洋平台按照其运动方式可分为两大类:一是固定式平台,一种借助于桩腿扩展基础或用其他方法支撑于海底且上部露出水面、为了预定目的能在较长时间内保持不动的平台;二是移动式平台,一种可根据需要从一个作业地点转移到另一个作业地点的海上平台,它是海洋油气勘探和开发的主要手段。

常见的固定式平台有导管架平台(jacket platform)和重力混凝土式平台(gravity concrete platform)。移动式平台可分为坐底式平台、顺应式平台和浮式平台。坐底式平台可细分为沉垫式平台和自升式平台(jack-up platform);顺应式平台可细分为拉索塔式平台(guyed tower platform)、顺应塔式平台(compliant tower platform)和张力腿平台(tension leg platform);浮式平台包括半潜式平台(semi-submersible platform)、钻井船、浮式生产储卸油装置(floating production storage & offloading, FPSO)以及各式各样的立柱式平台(Spar platform)。本章按照平台运动方式依次对每个平台的结构和功能作详细介绍。

### 一、固定式平台

#### 1. 导管架平台

最常见的固定式平台是导管架平台,其工作水深一般为 10 余米到 300m。导管架平台由上部结构和底部结构组成,如图 1-5 所示。

上部结构包括平台甲板、甲板支柱和空间桁架结构。甲板的主要作用是在海上为石油勘探开发提供足够的场地,甲板上主要有钻井架、火炬塔、直升机甲板、平台生活楼、旋转式起重机、钻井和生产设备等结构。所有甲板原则上都是由三维钢构件组成的,主要承载构件可为板桁材、箱型桁材和桁架。板桁材和箱型桁材由板架组成,组成桁架的桁材是管状的或型材(工字钢、槽钢等)。甲板类型可分为整体结构和模块结构两类。在整体结构中,设备是在结构建造后安装的;模块结构则是先建造甲板基础结构,然后将设备模块起吊并固定在基础结构之内或之上的。进行上部结构设计时,首先要确定上部结构的主要轮廓尺度,主要指甲板面积和甲板高程。这是平台总体规划中的两个重要尺度,它对支承结构轮廓尺度具有重要影响。

下部结构主要由导管套、导管架、导管筒、桩、钻井和生产立管以及外输管线等组成。下面分别对导管架、桩等基础结构进行详细介绍。

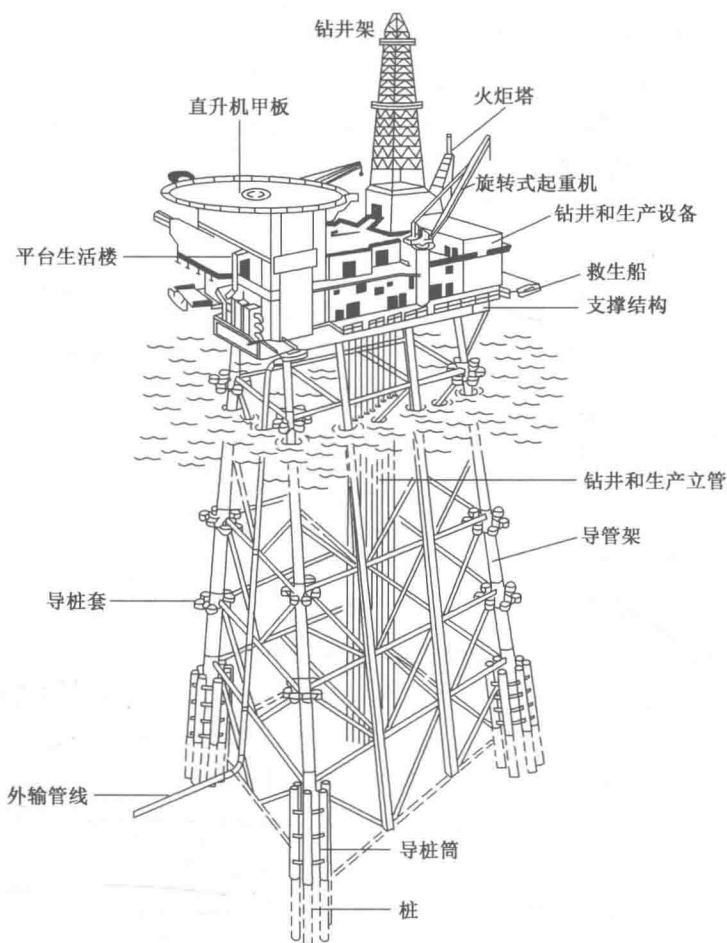


图 1-5 典型导管架平台结构示意图

### 1) 导管架

导管架是钢桁架的主柱(也称大腿或腿柱),是海洋平台的固定基础,也是打桩时的导向管。它是由大直径、壁厚的低合金钢管焊接而成的。导管架支撑、保护了油井导管、泵、油槽、立管等,是平台的基本结构部分,为登船台、腐蚀防护系统、锚泊系缆桩、驳船喷垫、导航设备及其他许多平台构建提供支撑。

导管架具有以下作用:(1)为平台的海上安装提供条件——在导管架的竖向圆管(导管或桩套筒)内打桩大大减少了在海上施工时单桩定位等操作上的困难;(2)把各独立单位连成一个整体——打桩完毕后,桩和圆管之间的环用水泥浆固结,在这基础上再通过导管架的空间结构将各单桩连接到一起以加强平台的稳定性,使平台的各种荷载能均匀地传递到各个桩上;(3)可安装泊船设备——供交通联络和船舶的临时停靠;(4)可安装电缆——用于提供通信和动力;(5)可安装梯子、走道和登陆桥等——为工作、维护提供通道;(6)可在导管架上架设临时性的工作平台——以加快施工进度和保证施工过程中的安全。

导管架主管有三根的塔式导管架布置方式,也有四柱式、六柱式、八柱式等,视平台上部结构尺寸大小和工作水深而定。各管状构件相交处形成了管状节点结构。管节点采用弦杆(即

管节点中直径较大的管构件)管壁加厚或其他更有效的措施进行加强。管节点的破坏有如下几种形式:(1)弦管壁在剪力作用下的破坏;(2)初始裂纹在张力作用下使撑杆从弦管处分离;(3)压力载荷导致撑杆附近弦管壁的局部屈曲;(4)弦管整个横断面的剪力破坏;(5)张力作用下撑杆附近弦管壁的层状撕裂。综上,在合理设计管节点时应使节点具有足够的变形和转动能力,以保证节点内部的作用载荷越来越大时应力的再分配。节点刚度过大,同样会在某些部位产生应力集中现象。

## 2) 桩

导管架依靠桩固定于海底,桩结构有主桩式,即所有的桩均由主腿内打入;也有裙桩式,即在导管架底部四周布置桩,裙桩一般是水下桩。

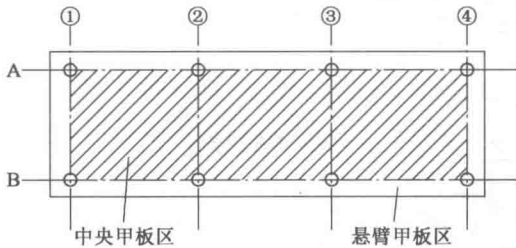


图 1-6 桩腿分布

桩的作用是把平台固定于海底并承受上部结构的重力以及风、浪、流载荷。如图 1-6 所示,一般布置两排桩腿,较短的横向排列用①、②、③、④表示,较长的纵向排列用字母 A、B 表示。

桩结构设计内容包括:(1)根据平台总体规划设计所选定的尺度,分析在最不利荷载组合作用下桩结构构件出现的内力;(2)根据桩所承受的最大轴向力和弯矩,校核桩身强度;

(3)由桩所承受的最大轴向力和横向力确定桩的入土深度;(4)根据导管架在施工和使用阶段中各构件出现的内力(轴力、弯矩和剪力),校核各构件的强度、刚度和稳定性。

海上导管架平台的承载能力主要取决于打入海床中的钢管桩基础。海洋恶劣环境引起的荷载及平台上部设施和设备荷载通过海床上的钢管桩传递到海床上更硬、更密实的土层中。对于受压桩,其承载能力主要来自桩身表面所产生的摩擦阻力和桩端阻力。大多数情况下,桩承载能力主要由桩身摩擦阻力提供,且随着桩身表面积的增加而增大,因此,海上导管架平台通常采用桩基础。桩的尺寸主要取决于桩的数量、上部设施与设备荷载、海底土质特性及沉桩方法。

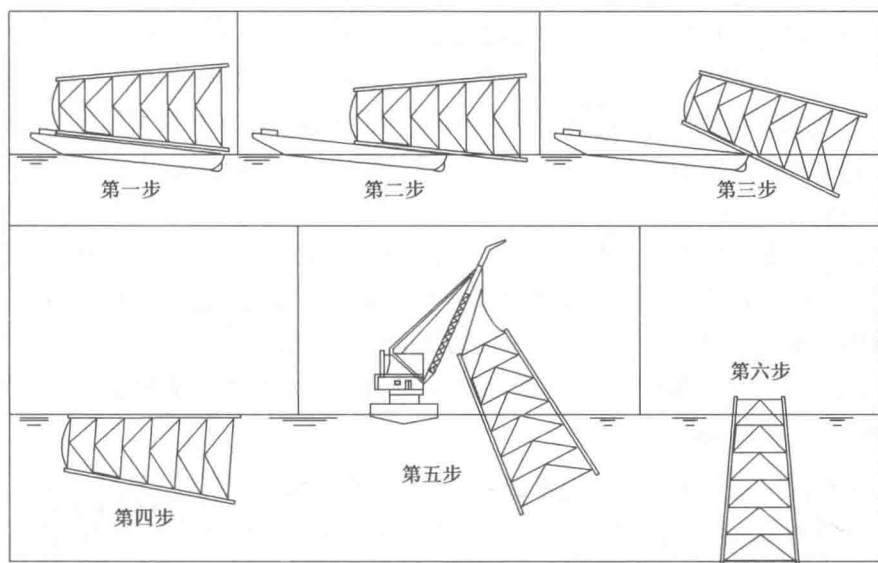
导管架平台桩基础的各单桩之间的间距一般都比较,通常是桩径的 5~10 倍,往往可忽略桩端(尖)压力的某些作用重叠的影响,桩基的承载能力可简单地用各单桩承载能力之和表示。由于桩打得比较深,作用于桩上的荷载主要是通过桩身侧摩擦阻力传递到桩周土壤中,且在整个使用寿命期中作用于桩基础的荷载小于极限荷载,故一般情况下桩基的沉降可忽略不计。

在导管架平台中,桩基础按其施工方法可分为三类:打入桩基础、钻孔灌注桩基础、钟型桩基础。上述三种桩基础型式中,打入桩施工最简单,费用最低,是海洋工程中首先选用的一种桩基础型式;钻孔灌注桩和钟型桩一般是在不得已的情况下采用的。在实际工程中到底采用何种桩基础主要考虑土质条件、桩的用途、桩的承载能力、地基类型及施工条件等因素。

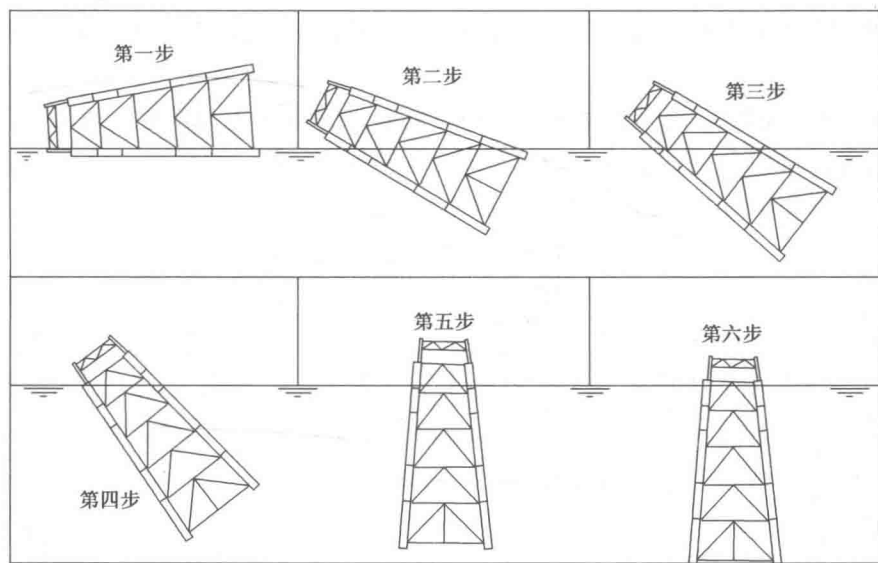
导管架平台在正式用于油气开发之前,存在平台设计、建造、运输、下水、安装、打桩等多个环节。其中,导管架的下水以及安装环节是导管架平台使用过程中的一个关键问题。如图 1-7 所示,导管架根据下水以及安装方式不同可分为驳船下水安装(barge launched)和自浮式安装(self-floating)。

图 1-7(a)表示了导管架通过驳船进行下水安装过程,具体步骤是:将建造好的导管架通过驳船托运到指定的海域位置(第一步到第四步),然后通过旋转式起重机(吊机)将平台吊起

放在指定的位置,最后进行打桩固定。图 1-7(b)表示了导管架通过自浮式进行下水安装过程,此时导管架具有足够的浮力来支撑自重。其具体步骤是:将建造好的导管架漂浮到指定海域位置,然后通过压载扶正,最后进行打桩固定。过去大多导管架下水安装均采用的是驳船下水安装,只有少数导管架采用的是自浮式安装。



(a) 驳船下水安装



(b) 自浮式安装

图 1-7 导管架的安装方法

世界上第一座海洋平台(即木制的导管架平台)建于 1887 年,在随后的 60 年中,海洋的油气开发均应用这种木制的导管架平台。第二次世界大战结束后,战争中许多先进技术被应用到海洋油气开发中。1947 年在美国墨西哥湾 6m 深处安装了世界上第一艘设备齐全的钢制自持式导管架平台,该平台甲板由 6 根导管架、267 根直径为 200~250mm 的钢桩支撑。这种

钢制导管架平台在随后的 30 年中被扩展到更深、更恶劣的海域进行油气开发。钢质导管架近海平台有多种类型,主要可以根据经济性选择不同的平台类型。在深水区,一般采用所有功能齐全的整体式多层自给式平台;在较浅的水域,则采用多个分离的不同功能的平台,例如供应平台、钻井平台、生产平台、辅助平台等。

导管架平台的受力包括环境载荷、使用载荷和施工载荷。其中使用载荷又分为固定载荷和活载荷。固定载荷是指作用在平台上的不变载荷,当水位一定时,固定载荷为一定值,它包括平台结构在空气中的重量(导管架、桩、灌浆等)、永久安装在平台上的设备和附属结构重量(机械设备、管线、防腐阳极块等)、水线下作用在结构上的静水力(外压力与浮力)。活载荷为平台使用期间加在平台上的载荷,它随平台作业类型的不同而变化,按其时间变化与作用可分为静载荷和动载荷。

截至 1999 年,全世界大约存在 6500 个导管架平台。导管架平台具有刚度大、整体稳定性好、建造方便等优点,作为一种近海水域的海洋平台在海洋油气勘探开发中得到了广泛应用。导管架平台的主要缺点是:(1)随着水深的增加费用显著增加;(2)海上安装工作量大;(3)制造和安装周期长;(4)当油田预测产量发生变化时,对油田开发方案进行调整的适应性受到限制。

## 2. 混凝土重力式平台

固定式平台除了最常见的导管架平台外,还存在另一种平台形式,即混凝土重力式平台,主要应用于近海海域石油钻探、生产、储存,尤其在近海边际油田开发中,应用较为广泛。这种平台的底部通常是一个巨大的混凝土基础,用三个或四个空心混凝土支柱支撑着上面结构,在平面底部的巨大基础中分隔着很多圆筒形的储油舱和压载舱。该平台依靠自身的重力来维持稳定,不需要依靠插入海底的桩腿承担垂直荷载和水平荷载,主要由上部结构、立柱以及基础这三部分组成。

已建成和正在研究、设计的混凝土平台种类繁多,有把平台基础做成六角形、正方形、圆形等各种形式,也有把立柱做成独腿、三腿、四腿等各种形式。第一艘混凝土重力式平台出现在 1973 年,截至 1982 年,共出现了 17 艘重力式平台,见表 1-1。

表 1-1 混凝土重力式平台汇总表

平台类型	安装年份	设计波高, m	工作水深, m	盘底直径, m	主要功能
Doris Ekofisk1	1973	24.0	70	92	储存
Condeep Berry1 A	1975	29.5	120	100	钻探、生产、储存
Condeep Brent B	1975	30.5	142	100	钻探、生产、储存
Doris Frigg CDPI	1975	29.0	96	101	钻探、生产、储存
Sea Tank Frigg TP1	1976	29.0	104	72	生产
Sea Tank Frigg TP1	1978	30.5	142	100	钻探、生产、储存
Sea Tank Cormorant A	1978	30.5	152	100	钻探、生产、储存
Condeep Brent D	1976	30.5	142	100	钻探、生产、储存
Andoc Dunlin A	1977	30.5	152	104	钻探、生产、储存
Condeep Statfjord A	1977	30.5	149	110	钻探、生产、储存
Condeep Frigg TCP2	1977	29.0	104	100	压缩、生产
Doris Frigg MP2	1976	29.0	94	101	压缩
Doris Ninian	1978	31.2	139	140	钻探、生产

平台类型	安装年份	设计波高,m	工作水深,m	盘底直径,m	主要功能
Pub 3 Petrobras	1977	11.0	15	52	钻探、生产、储存
Pub 2 Petrobras	1978	11.0	15	52	钻探、生产、储存
Pag 3 Petrobras	1978	11.0	15	52	钻探、生产、储存
Condeep Statfjord B	1981	30.5	149	169	钻探、生产、储存

由表 1-1 可以看出,混凝土重力式平台的工作水深一般在几十米到 150m,平台可抗百年一遇的极限波浪,最大设计波高可达到 30m。因此,此类平台可在非常恶劣的海域进行油气开采,如欧洲的北海区域。图 1-8 是 1975 年安装在北海区域的 Condeep 混凝土平台结构示意图,平台底部的直径达到了 100m,平台底部由很多个筒形混凝土罐组成,可用来储存油气。

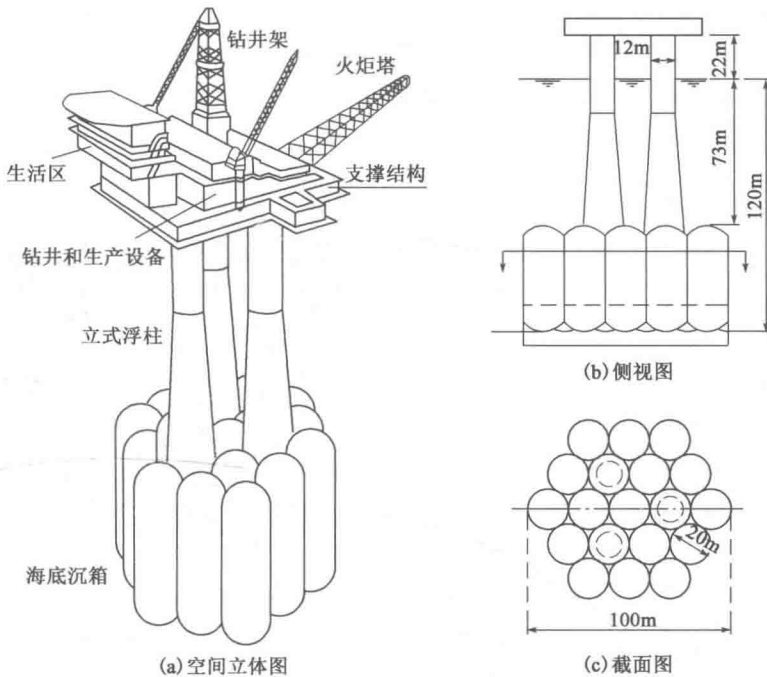


图 1-8 Condeep 混凝土平台结构示意图

为了抵抗巨大的风浪推力,要求平台有很大的基础结构,而较大的基础结构又正好可以用来储存原油,这就使得混凝土平台具备了兼顾钻、采、储三者的优点。上部结构由工作场所和各种生产处理设施组成;立柱连接在基础结构和上部结构之间,用于支撑上部结构。

混凝土重力式平台的安装通常分两个阶段:第一阶段在干坞中完成,在干坞内建造底座的下半部分;第二阶段在近岸的深水区完成。首先在干坞中建造平台的下部,到一定高度后在干坞中灌水,接着建造平台的立柱以及上部。建造完成后,将平台拖航到指定海域的指定位置,向平台内部灌水,使得平台下沉在指定位置并可以进行工作。

自从世界上第一座混凝土重力式储油平台于 1977 年在北海投入使用后,此类平台在设计、建造和使用上都有较大发展。混凝土重力式浅海采油平台也是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种新型的浅海油气生产设施。通过混凝土重力式平台的生产分离器分离得到的天然气,可根据需要压缩,然后脱水、计量并送入管线。从分离器分离出来的原油和水要送入游离

水分离装置进行油与游离水的分离,分离出来的原油再被送入一个电化处理器以分解油水乳化物,最后当达到外输标准时将原油送入储油舱。

混凝土重力式采油平台具有较大的储油空间和甲板面积。它不需要打桩固定,因此可节省海上安装时间与费用,用钢量也较少。从平台建造到平台作业的总工期来看,混凝土重力式平台所用周期并不比钢平台长,甚至还要短几个月,另外,两种平台的维修、操作及搬移所需费用也相差很大。根据国外经验,钢导管架平台、海底管线等每年需要大量的水下潜水维修工作,维修费用一般为其造价的5%~7%,而混凝土重力式平台维修费用很少,只占其造价的0.05%~1%。采用混凝土重力式平台方案开发一个小油田只需要建造一个或几个多功能平台即可完成钻、采、储等全部作业,与传统的开发方案相比,它具有不需铺设海底管线、节省钢材、维修费用小、冰冻情况下能坚持常年安全生产等优点。

总体来说,混凝土重力式平台具有与海底连接程度好、很少或不需要维修、维修费用低、使用寿命长、不需要桩基工程、养护可承受恶劣波浪及海流等优点。其缺点是对地基要求较高、结构分析比较复杂、拖航阻力变大、冰区性能变差。

## 二、移动式平台

### 1. 坐底式平台

坐底式平台适合比较平坦的海床。钻井前向沉垫中灌水,平台即可下沉就位,此时甲板需高出水面,免受波浪冲击。当作业完成时,可以将沉垫中的水排出,平台即可上浮,将平台通过自航或拖航到下一个作业位置,再向沉垫灌水,进行新的作业。由于坐底式平台高度一旦确定,平台只能在低于其平台高度以下的水域作业,平台作业范围便受到限制。坐底式平台按照接地形式、沉浮稳性和立柱功能等方面可以分为以下类型:

(1) 驳船坐底式平台。驳船本身起着上部平台和下部浮体的作用,只用于极浅的水域,以后的坐底式钻井平台都是从它演变而成的,早期钻井驳船多采取该种类型,工作水深一般在5m以内。

(2) 沉垫式坐底式平台。按照立柱的粗细和作用可分为两种:一是稳定立柱沉垫坐底式,也就是粗立柱坐底式钻井平台,立柱除支承上部平台外,在沉、浮过程中可保持平台稳性,适用于较大工作水深,一般在10m以上;二是细立柱沉垫坐底式钻井平台,立柱只起支撑上部分平台并连接下部沉垫的作用,当平台下沉时,一旦水深超过沉垫型深时,水线面突变,平台的下沉稳性不能保证,适用于较小工作水深,只有在沉垫型深的水深范围内,平台才可平稳沉浮。

坐底式平台具有吃水浅、接地面积大、稳定性好、移运方便等优点,特别适用于滩海区域勘探开发,然而会受到地基制约。

坐底式平台在极浅海水域作业时,海底表层液化、淘空和滑移将使得海底地基下降、采油平台倾斜、钻井定位困难、结构振动加剧,造成现场作业受阻、操作难度增加、平台结失效或倾覆等严重后果,从而提高了生产成本和作业风险,增加了经济损失,危害了人身安全。为了解决这一难题,结合生产实际,可采取以下措施:一是减小平台抗风面,使平台长轴方向与常风向平行,使风浪对平台的有效水平推力或冲刷淘空面积最小;二是地基处理,通过铺垫一层便利材料(如贝壳渣、碎石子等)来覆盖淤泥,增加摩阻,提高地基表面承载力,从而起到防止淘空、滑移的作用;三是抛投砂袋,在平台座底后的沉垫四周抛投砂袋,依靠砂墙保护下部泥沙不受海浪直接作用并增大阻力以避免淘空、滑移<sup>[1]</sup>。



我国从 20 世纪 60 年代初就开始了海洋石油勘探工作,为了满足海上石油勘探平台需求,首先开展了石油平台方面的研制工作,在 1972 年建成了“海五”坐底式平台,工作水深从 14m 到 18m,主体结构尺寸为长 28m、宽 26m、高 38.3m;为了开发潮间带石油和天然气,1979 年建造了浅海坐底式钻井平台“胜利一号”,工作水深从 1.5m 到 5m,主体结构尺寸为长 56.6m、宽 24m、高 53m(包括井架高);为了加强浅海潮间带的勘探工作,1988 年建成浅海步行坐底式平台“胜利二号”,工作水深从 0m 到 6.8m,紧接着又建造了“胜利三号”钻井平台。2008 年中国海洋石油总公司与中国船舶工业集团公司第 708 研究所联合研制了“中海油 3 号”坐底式钻井平台,该钻井平台长 78.4m、宽 41m、上甲板高 20.9m,空船总质量 5888t,平台最大作业水深 10m,最大钻井深度可达 7000m,主要用于石油钻井作业和试油修井作业,该平台的投入使用大大加快了我国滩海地区的石油勘探开发工作。

### 1) 沉垫式平台

最早的坐底式平台为沉垫式平台,是在浅水区域作业的一种平台,工作水深很小(一般为 5~30m),具有构造简单,投资少,建造周期短等优点。

如图 1-9 所示,沉垫式平台由沉垫、立柱和甲板组成。沉垫为浮体结构,为拖航和起浮提供浮力,同时可以有效地传递并分配立柱传下来的载荷给地基;立柱将上部平台和下部结构连接成一个空间架构,能够传递载荷,并且受波浪力、海流力和冰力作用;甲板上有关井设备、工作场所和生活设施等,甲板有单层和双层之分,主要由生产工艺和生活设施确定。单层甲板适用于作业水深极浅的坐底式平台,双层甲板的上部平台被设计成箱体形结构,适用于作业水深较深的坐底式平台。

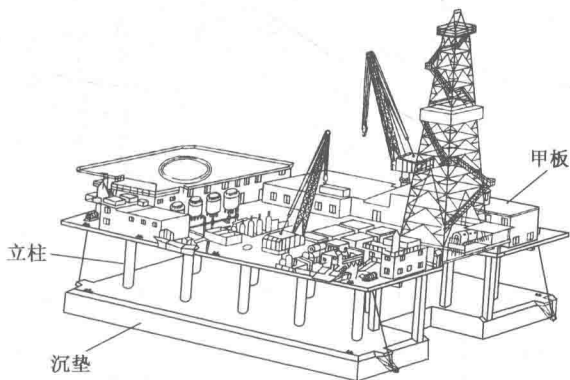


图 1-9 沉垫式平台

### 2) 自升式平台

自升式平台是由一个上层平台和若干个(3 根或 4 根)能够升降的桩腿所组成的海上平台(图 1-10)。平台在工作时,这些可升降的桩腿可将平台上升到海面以上一定的高度,从而保证平台免受波浪以及海流的作用,此时平台依靠桩腿的支撑站立在海床上进行作业。当作业完成时,可拔起平台的桩腿,此时上层平台处于漂浮状态,将平台拖航到下一个作业位置,下降桩腿固定平台进行新的作业。

第一座自升式平台出现在 1951 年,能够移位的灵活性以及对不同土壤的适应性等特点使它在油气勘探开发中得到了广泛的应用。截至 20 世纪 70 年代末,自升式海洋平台数量已经占据钻井装置总量的一半。据 2007 年统计资料,当时全世界在建以及完成建造的自升式平台一共有 117 座,其中 69% 的平台工作水深为 106~121m。自升式平台既要满足拖航移位时的浮性和稳定性要求,又要满足作业时着底稳定性和强度的要求,同时还需满足升降平台和升降桩腿的要求。桩腿的稳定性直接决定了平台是否能安全工作,随着工作水深的增加,桩腿无论在材料重量还是结构尺寸上均会快速增长。与此同时,平台自身的稳定性以及结构强度均会下降。因此,自升式钻井平台的最大作业水深是受到制约的,最适宜的作业水深一般在 200m 以内。