



石油高等院校特色教材

# 海洋石油平台设计

陈建民 娄敏 王天霖 编著



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

## 内 容 提 要

本书详细讲述了各类海洋石油平台的应用范围及优缺点,以及风、浪、流、冰、地震等荷载及使用荷载的概念和相关计算;重点讲述了导管架平台和移动式平台,包括坐底式平台、自升式平台、半潜式平台的设计、结构特点及有关技术参数选择与计算。

本书可作为高等院校船舶与海洋工程专业及相关专业的教材或参考书,并可供从事海洋石油平台设计、制造领域的科技人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海洋石油平台设计/陈建民, 娄敏, 王天霖编著.

北京: 石油工业出版社, 2012. 5

(石油高等院校特色教材)

ISBN 978-7-5021-8971-6

I. 海…

II. ①陈…②娄…③王…

III. 海上油气田-海上平台-结构设计-高等学校-教材

IV. TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 042756 号

---

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: [www.petropub.com.cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523612 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京华正印刷有限公司

---

2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 22.75

字数: 562 千字

---

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

# 前 言

石油关系到一个国家的综合国力、经济发展和人民生活水平，是世界主要的一次性能源和最重要的化工原料之一。因此，石油已成为当今世界各国激烈争夺的对象。随着陆上石油和天然气的不断开发，油气资源的不断减少，我国油气勘探和开发的重点已由陆地转向海洋。开发我国的海洋石油需要大批从事海洋石油开发的高级专门人才。为满足国家的这种需要，以中国石油大学为代表的多家高校新建了以海洋石油开发为特色的船舶与海洋工程本科专业，也有的开设了海洋油气工程本科专业。

海洋石油平台设计是以海洋石油开发为特色的船舶与海洋工程类专业的必修课。到目前为止，还没有一本系统的讲授海洋石油平台设计知识的教材。为了满足教学需要，也为了满足从事海洋石油平台设计、制造领域的科技人员学习的需要，中国石油大学海洋石油平台设计编写组融合多年的教学和科研经验，经过近 4 年的努力，今天终于很欣慰地将本书奉献给读者。

本书内容分三部分，共 16 章。

第一章和第二章为第一部分，是第二和第三部分都用到的基本知识。第一章介绍了各类海洋石油平台的应用范围及优缺点，目的是让读者对海洋石油平台有一个总体的认识。第二章讲述了设计荷载，包括风、浪、流、冰、地震等荷载及使用荷载。

从第三章到第九章为第二部分，主要讲述导管架平台的设计。第三章讲述了导管架平台总体设计，包括设计参数、平台结构型式及主要尺寸设计、平台上的主要设备的布置。第四章讲述了平台甲板结构及附属设施设计，包括甲板结构的计算模型、甲板结构的设计和附属设施设计。第五章讲述了桩基设计，包括桩基分类、单桩轴向承载力计算、单桩横向承载力计算、群桩效应与荷载分布和桩体设计。第六章讲述了导管架设计，包括设计依据、设计计算模型、设计计算刚度矩阵、杆件端点变位与受力、导管架构件强度校核。第七章讲述了桩基平台的动力分析，包括桩基平台的运动分析，平台对规则波、不规则波及地震的响应分析。第八章讲述了圆管构件的强度与稳定计算，包括圆管构件的强度计算和稳定性计算。第九章讲述了管节点的设计与疲劳分析，包括管节点的设计、管节点应力分析、管节点的强度分析和管节点的疲劳分析。在这七章中，首先从宏观上介绍了导管架平台总体设计；然后按空间位置的顺序，分别讲述了平台甲板结构及附属设施设计、桩基设计和导管架设计；考虑到平台所承受荷载随时间变化的特征，安排了桩基平台动力分析的内容；最后讲述的是设计中的细节问题和疲劳问题，即圆管构件的强度与稳定计算，以及管节点的设计与疲劳分析。

从第十章到第十六章为第三部分，主要讨论移动式平台设计。第十章讲述了移动式平台结构形式与主尺度，包括平台结构组成与结构形式选择、平台排水量的确定和平台主尺度的

确定。第十一章讲述了移动式平台船体结构的设计，包括船体基本构件设计、船体的结构组成、船体的局部强度校核和船体总强度校核。第十二章讲述了移动式平台的重量与重心，包括空平台重量的估算、平台的排水量和重心估算，以及半潜式平台重量的估算。第十三章讲述了底撑式平台的着底稳性，包括平台着底稳性设计标准、抗倾稳性、抗滑稳性和平台的桩基稳性。第十四章讲述了浮式钻井平台的漂浮稳性，包括完整稳性、破舱稳性和沉浮稳性。第十五章讲述了锚泊系统，包括锚链布置、锚系设计和锚泊定位系统分析。第十六章讲述了坐底式平台设计、自升式平台设计和半潜式平台设计。

本书由中国石油大学（华东）陈建民、娄敏和大连海事大学王天霖共同编著。陈建民担任主编，并编写了第一章、第二章和第十章至第十六章。娄敏编写了第三章至第九章，以及各章的习题。王天霖对各章的公式进行了校核。全书由陈建民统稿。张萍、张萌、郝晓东、郭鹏增、高曰兵等同志承担了本书的录入、校对和绘图工作，在此特向他们表示诚挚的感谢。

限于编著者水平，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

**编著者**

**2011年12月**

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 海洋石油平台的类型.....	1
第二节 世界海洋石油平台发展概况.....	7
第三节 我国海洋石油平台发展概况 .....	12
第四节 海洋石油平台的发展趋势 .....	15
思考题 .....	16
<b>第二章 设计荷载</b> .....	17
第一节 设计荷载分类 .....	17
第二节 使用荷载 .....	19
第三节 风荷载 .....	26
第四节 波浪荷载 .....	28
第五节 海流荷载 .....	35
第六节 冰荷载 .....	37
第七节 地震荷载 .....	41
第八节 荷载组合 .....	44
思考题 .....	45
<b>第三章 导管架平台总体设计</b> .....	47
第一节 设计参数 .....	47
第二节 导管架平台的构成及分类 .....	48
第三节 平台的方位、结构型式及主要尺寸设计 .....	51
第四节 平台上的主要设备 .....	57
第五节 平台上设备的布置 .....	63
思考题 .....	67
<b>第四章 平台甲板结构及附属设施设计</b> .....	68
第一节 甲板结构的计算模型 .....	68
第二节 甲板结构的设计 .....	75
第三节 附属设施设计 .....	85
思考题 .....	91
<b>第五章 桩基设计</b> .....	92
第一节 桩基分类 .....	92
第二节 单桩轴向承载力计算 .....	93
第三节 单桩横向承载力计算.....	104
第四节 群桩效应与荷载分布.....	116
第五节 桩体设计.....	119
思考题.....	125

<b>第六章 导管架设计</b> .....	126
第一节 设计依据及设计内容.....	126
第二节 设计计算模型.....	127
第三节 设计计算刚度矩阵.....	129
第四节 杆件端点变位与受力.....	140
第五节 导管架构件强度校核.....	144
思考题.....	146
<b>第七章 桩基平台的动力分析</b> .....	147
第一节 结构动力学概述.....	147
第二节 单自由度体系振动.....	150
第三节 多自由度体系振动.....	155
第四节 桩基平台的运动分析.....	161
第五节 平台对规则波的响应分析.....	169
第六节 平台对不规则波的响应分析.....	172
第七节 平台对地震响应的分析.....	175
思考题.....	180
<b>第八章 圆管构件的强度与稳定计算</b> .....	181
第一节 概 述.....	181
第二节 圆管构件的强度计算.....	186
第三节 圆管构件的稳定性计算.....	190
第四节 圆管构件强度与稳定校核算例.....	199
思考题.....	204
<b>第九章 管节点的设计与疲劳分析</b> .....	205
第一节 管节点的型式与术语.....	205
第二节 管节点的应力分析.....	208
第三节 管节点的强度分析.....	209
第四节 管节点的设计.....	213
第五节 管节点疲劳分析.....	215
思考题.....	224
<b>第十章 移动式平台结构型式与主尺度</b> .....	226
第一节 平台设计方法和要求.....	226
第二节 平台结构组成与结构型式选择.....	227
第三节 平台排水量的确定.....	231
第四节 平台主尺度.....	232
思考题.....	236
<b>第十一章 移动式平台船体结构的设计</b> .....	237
第一节 船体的受力状态.....	237
第二节 船体的结构组成及型式.....	239
第三节 船体基本构件设计.....	242
第四节 船体总强度校核.....	249

第五节	船体局部强度校核	257
思考题		261
<b>第十二章</b>	<b>移动式平台的重量与重心</b>	262
第一节	空平台重量的估算	262
第二节	平台的排水量和重心估算	265
第三节	自升式平台的重量分类与组合	268
第四节	半潜式平台重量的估算	269
思考题		271
<b>第十三章</b>	<b>底撑式平台的着底稳性</b>	272
第一节	平台着底稳性设计标准	272
第二节	平台的抗倾与抗滑稳性	274
第三节	平台的桩基稳性	276
第四节	影响平台着底稳性的因素	279
思考题		282
<b>第十四章</b>	<b>浮动式钻井平台的漂浮稳性</b>	283
第一节	平台的运动	283
第二节	平台的完整稳性	285
第三节	平台的破舱稳性	292
第四节	平台的沉浮稳性	297
思考题		298
<b>第十五章</b>	<b>锚泊系统</b>	299
第一节	锚和锚链	299
第二节	锚泊系统的种类与布置型式	300
第三节	锚泊设备计算与要求	303
第四节	锚系设计	305
第五节	锚泊定位系统分析	308
思考题		312
<b>第十六章</b>	<b>移动式平台设计</b>	314
第一节	坐底式平台设计	314
第二节	自升式平台设计	319
第三节	半潜式平台设计	341
思考题		351
<b>参考文献</b>		352

# 第一章 绪 论

世界经济的高速发展带来能源的大量消耗，石油天然气仍是当前的主要能源。而当今世界油气储量迅速递减，陆上石油资源紧缺问题日渐突出。据预测，全球陆上的油气可采年限约为 30~80 年。进入 21 世纪以来，随着对石油需求的快速增加，世界已步入石油匮乏时代，也就是所谓的“后石油时代”。据统计，全球海洋石油储量约 1000 多亿吨，其中已探明储量约为 380 亿吨。因此，我们必须向海洋进军，大力开发海洋油气资源。

勘探开发海洋油气需要的关键装备之一是海洋石油平台，本章对海洋石油平台的类型及当前的发展状况进行简要介绍。

## 第一节 海洋石油平台的类型

### 一、桩基式导管架平台

桩基式导管架平台整体稳定性好，刚度大，受季节和气候的影响较小，抗风暴的能力强。桩基式导管架平台工作水深一般在十余米到 200m 的范围内，但也有超过 300m 的。目前世界上大于 300m 水深的导管架平台有 7 座，最深的导管架平台位于美国墨西哥湾的 Bullwinkle 油田，该油田水深 412m。导管架平台是目前世界上使用最多的一种平台，不论从设计理论还是从建造技术来看，它都是一种最成熟和最通用的平台形式。

导管架平台是在软土地基上应用较多的一种桩基平台，由上部结构（即平台甲板）和基础结构组成，如图 1-1 所示。上部结构一般由上下层平台甲板和层间桁架或立柱构成，甲板上布置成套钻采装置及辅助工具，动力装置，泥浆循环净化设备，人员的工作、生活设施和直升飞机升降台等。平台甲板的尺寸由使用工艺确定。基础结构（包括导管架和桩）支承全部荷载并固定平台位置，桩数、桩长和桩径由海底地质条件及荷载决定，导管架立柱的直径取决于桩径，其水平支撑的层数根据立柱长细比的要求而定。

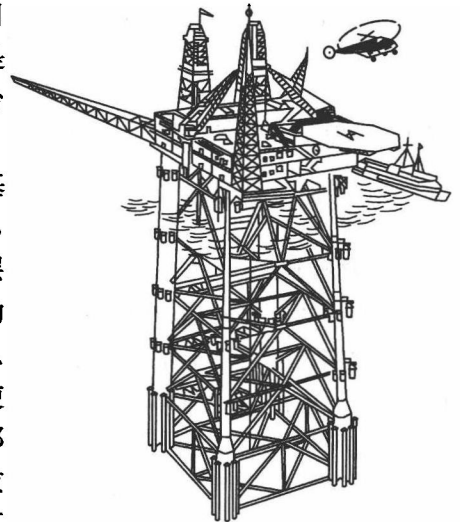


图 1-1 导管架平台结构图



在冰块漂流的海区，应尽量在水线区域（潮差段）减少或不设支撑，以免冰块堆积。对于深海平台，还需进行结构动力分析，结构应有足够的刚度以防止振幅过大。

## 二、固定重力式平台

固定重力式平台一般分为下述三种。

(1) 钢筋混凝土重力式平台。钢筋混凝土重力式平台是 20 世纪 70 年代初开始发展起来的一种新型平台结构，目前主要用于欧洲的北海油田。这种平台具有钻井、采油、储油等多种功能，水深在 200m 以内均可采用，最佳水深为 100~150m。该平台是依靠自身重量维持稳定的固定式海洋平台，主要由上部结构、腿柱和基础 3 部分组成，如图 1-2 所示。基础分整体式和分离式两种：整体式基础一般是由若干圆筒形的舱室组成的大沉垫；分离式基础用若干个分离的舱室作基础，它对地基适应性强，受力状况好，抗动力性能好，腿柱间距大，在拖航及下沉作业时较安全。

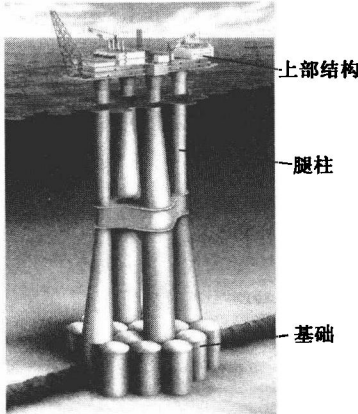


图 1-2 重力式平台

(2) 钢结构重力式平台。这种平台也属于分离式基础型，由钢塔和钢浮筒组成，浮筒也兼作储油罐。

(3) 钢和钢筋混凝土重力式平台。这种平台上部结构和腿柱用钢材建造，沉箱底座用钢筋混凝土建造，可充分发挥两种材料的特性。

以上三种重力式平台适用于较浅海域。整体式基础多建造在密实的砂土上，避免建在松散砂土或较厚的软土地基上。分离式基础的面积视地质条件而定，立柱的间距随水深而变，对地基和水深的适应性很强，可用于地质条件较差的场合。

重力式平台的施工分两个阶段，前阶段在干坞中进行，后阶段在近岸可避风浪的深水区进行。施工程序是：在干坞中建造基础下部，到预定高度后向干坞中灌水，把已建成的基础下部连同起重设备一起浮运至能避风浪的深水区，系泊后继续建造基础的上部及立柱，建成后将平台拖航至设定海域，再向基础内部灌水，使平台下沉就位。

重力式平台设计时应防止基础舱壁失稳或压坏，当基础兼作储油罐时，应考虑由于内外温差所产生的温度应力。平台要有足够的整体稳定性，基础下边可设插入地基的裙板，防止基础底座沿海底滑动。此外，结构的倾斜度、总沉降量及动力效应都要求不超过限定值。

## 三、顺应式平台

### 1. 顺应塔式平台

顺应塔式平台与固定平台相似，两者均具有支撑水面设施的导管架钢制结构。图 1-3 所示是美国墨西哥湾 Baldpate 油田使用的顺应塔式平台。与固定平台不同的是，顺应塔式平台会随水流或风载荷移动，与浮式结构类似。顺应塔式平台通过桩固定于海底，其导管架小于固定平台导管架。上部的导管架内还可设有浮体部分，下部的导管架固接于海底，作为顺应塔上部导管架与水上设施的基础。顺应塔式平台应用水深可达 900~1000m，它的最佳应用范围在 200~650m。

塔式部分为水上设施，包括钻井、生产以及生活楼模块。顺应塔尺寸由生产处理、钻井

操作以及全体工作人员的住宿状况决定。顺应塔式平台由于导管架尺寸的减小，其水上设施部分一般小于固定式平台。顺应塔式平台的支撑结构由下部与上部两部分组成。一般情况下，顺应塔导管架由4条管腿构成，管腿直径1~2m不等，与管柱焊接在一起形成框架结构。下部导管架借助重量，通过2~6个插入泥面以下数百英尺的桩固定于海底。

导管架上部设有一组浮箱（最多12个），浮箱可以提供张力，以降低结构基础的负荷。浮箱直径一般为6.5m，长度最大可达40m。浮力大小由电脑控制，以保持在与风与波浪作用下结构具有合适的张力。浮力系统也可以与其他设计相结合，以使尺寸最小，并使浮箱的布置最合理。

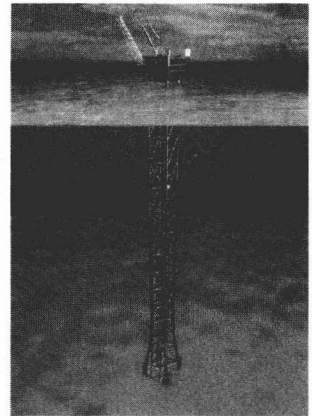


图 1-3 顺应塔式平台

## 2. 拉索塔式平台

拉索塔式平台是一种新型的海洋平台结构，其支承塔架下端着地，上端一般用多根锚缆张紧固定。图 1-4 所示是 1983 年建于墨西哥湾 305m 水深海域的拉索塔式平台，塔架高 329m，重 19000t，用钢桩打入海底。但该塔架又瘦又高，柔性较大，在波浪作用下可以允许轻微摇摆。整个塔架靠 20 根直径 227mm 的钢缆作为绷绳向四面八方的海底拉紧，并固定于海底。由于该平台的固有频率远远大于波浪的频率，所以平台的摇摆不会对人员健康和生产作业有明显的影 响。这种平台用料少，工作水深大，适用于大深度水域。

## 四、坐底式钻井平台

最早的移动平台采用钻井驳船，后来随着海洋石油钻探水深的不断增加，钻井驳船进一步发展成坐底式平台，它由沉垫、立柱和平台甲板三部分组成，如图 1-5 所示。该平台适用于水深为 5~30m，而且海底比较平坦的场合。沉垫可以是整体式，也可以是分离式，向沉垫内灌水，平台即下沉就位；把水排出，平台就浮起。因此，这种平台又称为沉浮式平台。中国建成的胜利一号平台即属浅海坐底式平台。

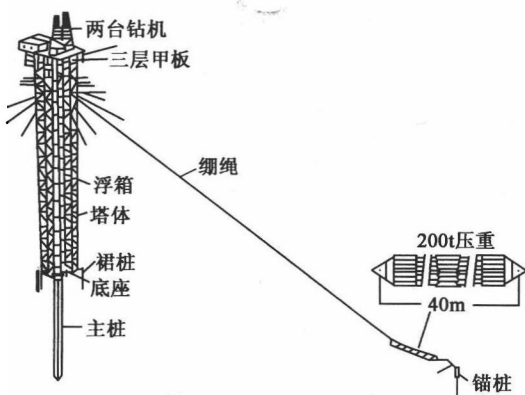


图 1-4 拉索塔式平台

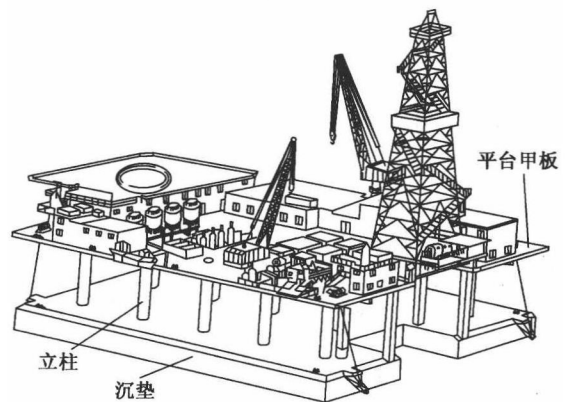


图 1-5 坐底式平台

## 五、自升式钻井平台

自升式钻井平台属于海上移动式平台，由于其定位能力强和作业稳定性好，在大陆架海域的油气勘探开发中居主力军地位。

自升式钻井平台主要由平台结构、桩腿、升降机构、钻井装置（包括动力设备和起重设备）以及生活楼（包括直升飞机平台）等组成。图 1-6 所示为渤海 8 号自升式钻井平台。平台在工作时用升降机构将平台举升到海面以上，免受海浪冲击，依靠桩腿的支撑站立在海底进行钻井作业。完成作业后，降下平台到海面，拔起桩腿，并将其升至拖航位置，即可拖航到下一个井位作业。桩腿长度是自升式钻井平台的关键参数。当作业水深加大时，桩腿的长度、尺寸和重量迅速增加，作业和拖航状态的稳性也变差。所以，自升式钻井平台最大的作业水深受到制约，作业范围一般限于大陆架 200m 以内水深。桩腿结构形式有柱体式和桁架式两大类。柱体式桩腿由钢板焊接成封闭式结构，其断面有圆柱形和方箱形两种，一般用于作业水深 60m 以下的自升式平台。水深加大，波浪载荷增大，结构重量增大，宜采用桁架式桩腿。桁架由弦杆、水平撑杆和斜撑杆组成，在弦杆上装有齿条。桩腿可按地质条件需要设置桩靴，桩靴的平面形状有圆形、方形和多边形。

就桩腿数量而言，目前主要采用的是 3 根桩腿或 4 根桩腿，3 根桩腿是自升式平台取得稳定支撑最少的数量。当作业水深很大时，考虑到桩腿的尺寸和重量，宜采用 3 根桩腿，同时可以减少升降机构的数量。其缺点是若 1 根桩腿失效，平台就无法工作，甚至发生险情。3 根桩腿在预压时不能像 4 根桩腿那样采用对角线交叉方式，而需要用压载水，比较麻烦。中小型的自升式钻井平台，作业水深较小，多采用 4 根柱体式桩腿，平台主体平面呈矩形。大中型平台，作业水深较大，多采用 3 根桁架式桩腿，平台主体平面呈三角形。

## 六、半潜式钻井平台

半潜式钻井平台，又称立柱稳定式钻井平台，如图 1-7 所示。该平台是大部分浮体在水面以下的小水线面的移动式钻井平台，是由坐底式钻井平台演变而来的。该平台由平台本体、立柱和下浮体或浮箱组成。此外，在下浮体与下浮体、立柱与立柱、立柱与平台本体之间还有一些支撑与斜撑连接。在下浮体间的连接支撑，一般都设在下浮体的上方。这样，当平台移位时，可使它位于水线之上，以减小阻力。平台上设有钻井机械设备、器材和生活舱室等，供钻井工作用。平台本体高出水面一定高度，避开波浪的冲击。下浮体或浮箱沉没在水下以提供主要浮力，并减小波浪的作用力。平台本体与下浮体之间连接的立柱具有小水线面的剖面，立柱与立柱之间相隔适当距离，可以保证平台的稳性，因此又有稳定式立柱之称。半潜式钻井平台的类型有多种，其主要差别在于水下浮体的形状与数目。

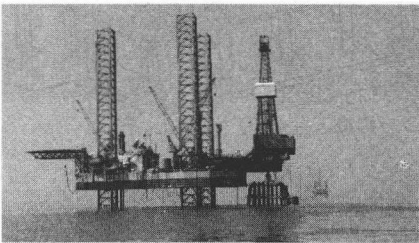


图 1-6 渤海 8 号自升式钻井平台

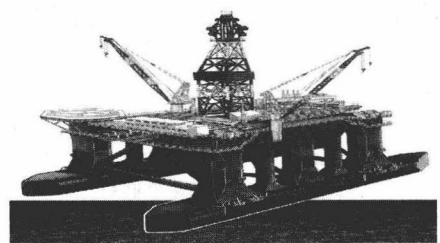


图 1-7 半潜式钻井平台

## 七、钻井船

钻井船从结构上说很简单，外形就是一条船，所有的钻井设备、工具、材料以及作业人员的工作间和生活区，直升飞机平台等都在船上。除了船体外，没有任何其他浮体和立柱。

把钻井设备安装在船体上，靠锚系或动力定位，在漂浮的状态下钻井。钻井船一般都有自航能力，可在几百米或上千米水深的海域工作，但对风浪极为敏感，当风力超过 7~8 级，波高超过 3~4m 时就要停止作业。图 1-8 所示为 Transocean 超深水钻井船（最大可达 12000ft<sup>①</sup> 水深）。



图 1-8 Transocean 超深水钻井船

早期的钻井浮船，把井架及钻井设备布置在船体一侧的舷外，需要在这一侧建立一个伸出舷外的桁架，再加上钻井设备及钻柱的重量，使整个船体受力很不平衡。于是在另一侧增大压载水量，而且在钻进过程中，随着钻井负荷的变化，还要不断调整压载水量，给使用带来极大的不便。后来的钻井浮船，都将井架放置在船体的纵轴线上。该钻井船要求在船体上有一个允许钻柱通过并且可以安装井口装置的贯通上下的开口，称为钻井井口。

钻井船在海上只能进行浮式钻井作业。作业期间，船体受到风浪流的作用，会产生各种运动。这些运动有时是非常剧烈的。例如，严重的摇摆、升沉和横向漂移，给钻井作业带来很大的影响，甚至使钻井作业无法进行。因此，钻井浮船需要使用锚泊系统定位，或者使用自动动力定位系统定位。定位系统不仅设备庞大，而且技术相当复杂。

为了增大钻井船抵抗风浪流的能力，提高稳定性，钻井船不断有新的发展。首先是吨位增大，用于深水钻井的浮船都在 15000t 以上，吨位大，抗风能力强。例如，1981 年建成的“POLLYBRESTOL”钻井船排水量为 18360t，荷兰建造的“Neddrill I”排水量达到 24000t。另一种方法是把吨位小的钻井船做成双体船，至今全世界共建造过 3 条双体船。美国建造的“贝克号”双体船，是将 2 个各长 78m，宽 13.7m 的单体船，前部和后部用巨大的桁架连接起来，形成一个完整双体船。前部桁架兼作直升飞机平台，后部桁架兼作钻台的一部分。整个双体船的宽度达到 38m，大大提高了船体的稳定性。井架安放在尾部的纵轴线上，钻台面积达到 24m×24m，井架底面积 12m×12m。宽敞的直升飞机平台可同时停 2 架直升飞机。该船的主要缺点是没有自航能力，移位时需要拖航，而且在工作时需要 1 条货船、1 条客船和 1 条日用船配合作业。该船的另一个缺点是即使在墨西哥湾这样海况不是非常糟糕的海域，由于天气原因的停工时间仍达到 10% 左右。该船后来在钻井时因发生井喷失火而倾翻。

我国 1974 年自己设计建造的“勘探一号”双体钻井船，是由 2 条各长 99.23m，宽 14.3m 的 3000t 的货轮改装而成。改装步骤是先将 2 条船用巨大的桁架连接起来，成为一个整体，然后在上部铺设钻井甲板。改装后排水量达到 8000t，并可利用原船的动力自航，钻井作业期间用扩展锚系定位，该船在我国黄海水深 28~68m 海域共打井 7 口后退役。

① 1ft=0.3048m。

## 八、张力腿式平台

张力腿式平台（Tension Leg Platform，简称 TLP）是在平台本体上设置多组有预张力的绷紧的钢质缆索，即张力腿系统将其固定于海底锚固基础上，从而保证了平台本体与海底井口的相对位置在允许的工作范围内，其结构如图 1-9 所示。从结构上一般可将其划分为五部分，即平台上体、立柱（含横撑、斜撑）、下体（含沉箱）、张力腿和锚固基础。

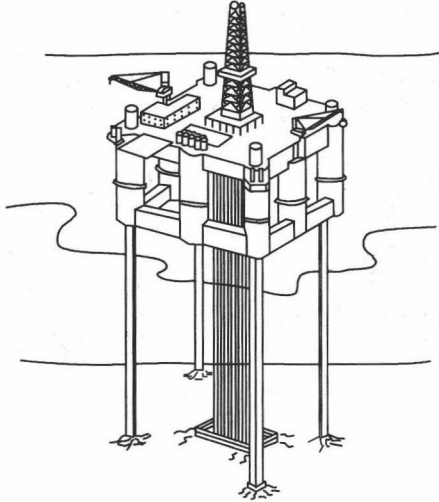


图 1-9 典型的张力腿式平台结构示意图

平台的上体、立柱和下体都是浮体，通过收紧锚固在海底的缆索，使浮体的吃水深度比静平衡状态大一些，浮力大于浮体重力，剩余浮力由缆索的张力来平衡。当平台受到扰动力时，缆索因张力改变而产生弹性变形。因此，平台只产生微量位移。缆索可竖向或斜向布置。在深水海域，如果采用固定平台，则造价随水深增大而剧增，海上安装工程也趋于困难，相应配备的工程船舶均需大型化。而张力腿式平台仅需加长缆索，对造价影响不大，这种平台在工作完成后可浮运到其他地点。整座平台可在工厂建造，工作地点定位，适用于开采周期较短的深水小型油田。

TLP 结构上的特点使其与同类平台，如半潜式平台相比较，具有运动性能好、抗恶劣环境作用能力强等优点。与固定式平台相比，除了造价低以外，其抗震能力显著优于前者，且便于移位，可以重复利用，大大提高了其通用性和经济性。

## 九、Spar 平台

Spar 平台（深水浮筒式平台）属于顺应式平台的范畴，是一种新型的浮式平台，如图 1-10 所示。尽管其雏形可以追溯到 20 世纪 70 年代的海洋观测站、通信中继站、油品转运站和军事用途的 Spar 平台，但其发展还是近 10 年来以深水油气资源开发为标志。

Spar 平台的适用水深为 600~3000m，直径为 30~40m，吃水为 200m 左右。由于吃水深、水线面积小，Spar 平台的垂荡运动比半潜式平台小，与张力腿平台相当。在系泊系统和主体浮力控制下，具有良好的动力稳定性。因此，可以采用干采油树和刚性立管。同时，较大的储油能力又使得 Spar 平台可与 FPSO 媲美。

Spar 平台的另一个特点是经济性好，其投资成本远低于张力腿式平台。例如，用于

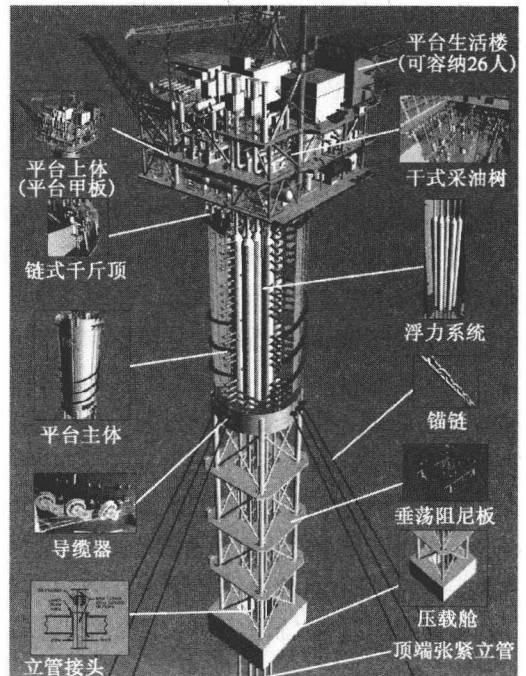


图 1-10 Spar 平台结构示意图

1372m 水深的 Spar 平台 HornMountain 总投资（包括平台及海底管线的建造和安装、钻探和完井）仅为 3.35 亿美元，而 910m 水深的张力腿式平台 Brutus 总投资高达 7.5 亿美元。正是由于这些突出优点，到 2005 年，Spar 平台已经发展到了第 3 代，已有 11 座 Spar 平台投入使用。

现代 Spar 平台的主体是单圆柱结构，垂直悬浮于水中，特别适宜于深水作业，在深水环境中运动稳定性、安全性良好。Spar 平台主体可分为几个部分，有的部分为全封闭式结构，有的部分为开放式结构，但各部分的横截面都具有相同的直径。由于主体吃水很深，平台的垂荡和纵荡运动幅度很小，使得 Spar 平台能够安装刚性的垂直立管系统，承担钻探、采油和油气输出工作。

## 第二节 世界海洋石油平台发展概况

海洋油气的产量和储量一直保持快速增长，也带动了海洋平台市场的发展。20 世纪 40 年代驳船首次用于近海勘探钻井，1956 年出现了钻井船，1961 年半潜式钻井平台问世。全球钻井的中心已逐渐向海洋转移。根据 BakerHughes 公司统计，全球陆地商用钻井平台在 1982 年 1 月达到 6150 座的高峰，到 2009 年 9 月大约只剩 3550 座。除加拿大有所增加外，其他地区的陆地钻井平台都有不同幅度的下降，其中美国在这一期间减少了 90%。而在同一时期，参与市场竞争的商用移动式海洋钻井平台，即自升式钻井平台、半潜式钻井平台和钻井船从 499 座增加到 627 座。

随着海上油气开发的不断发展，海洋石油工程技术发生着日新月异的变化，在深水油气田开发中，传统的导管架平台和重力式平台正逐步被深水浮式平台和水下生产系统所代替，各种类型的深水浮式平台的设计、建造技术不断完善。

### 一、深水浮式平台概况

据 2006 年 7 月的不完全统计，全球有 165 座半潜式钻井平台和 38 艘钻井船。其中额定作业水深超过 500m 的半潜式钻井平台有 103 座，钻井船有 33 艘，分别占其总数的 62% 和 87%。2006 年以后又新建了 24 座半潜式钻井平台和 7 艘钻井船。其中新建钻井船的钻井水深为 3000m，2007 年建成 1 艘，2008 年和 2009 年各建成 3 艘。在役的深水半潜式钻井平台有 89 座，分布在 18 个国家，其中美国最多，有 24 座（占总数的 27%），巴西有 17 座，挪威有 10 座，英国有 6 座，澳大利亚、墨西哥和尼日利亚各有 5 座，其余国家各有 1~3 座。在役的深水钻井船有 26 艘，它们分布在 8 个国家，其中巴西最多，有 8 艘；其次是美国，有 6 艘；安哥拉、印度和尼日利亚分别有 4 艘、3 艘和 2 艘；中国、马来西亚和挪威各 1 艘。从它们的工作范围来看，深水半潜式钻井平台主要活跃在墨西哥湾、巴西、北海、西非、澳大利亚和墨西哥外海域。深水钻井船主要活跃在墨西哥湾、巴西海域和西非海域。

目前，全世界已有 2300 多套水下生产设施、204 座深水平台活跃在全世界各大海域。就最大工作水深而言，张力腿式平台（TLP）已达到 1434m，Spar 平台为 2073m，浮式生产储油装置（FPSO）为 1900m，多功能半潜式平台达到 1920m 以上，水下作业机器人（ROV）超过 3000m。采用水下生产技术开发油气田最大水深为 2192m，最大钻探水深为 3095m。与此同时，深水钻井装备和铺管作业技术也得到迅速发展。

## 二、半潜式平台概况

世界上半潜式平台的发展已有 40 多年的历程，目前应用总量在 168 座以上，成为继 FPSO 后深水作业的第二大平台（船体）类型。当前，深水半潜式平台的设计和建造已呈现前期统筹规划、配置现代化装备以提高海上作业效率、满足在最具挑战性的海域作业、多功能化以及模块化分段建造、集成合拢、小批量系列化开发等趋势。

### 1. 半潜式钻井平台的设计商

半潜式钻井平台的设计技术含量极高。目前国际上设计半潜式钻井平台的公司主要有：美国的 Friede & Goldman 公司、挪威的 Aker Kvaerner 公司、新加坡的 Harald Frigstad 工程设计公司、挪威的 Global Maritime 公司、瑞典的 GAV 咨询公司、荷兰的海洋结构咨询公司、美国的 J. Ray McDermott 公司和新加坡的吉宝公司（Keppel FELS）等。

### 2. 半潜式钻井平台的建造商

半潜式钻井平台的建造工程非常庞大，周期长，世界上只有少数几家公司有能力承建。目前承建半潜式钻井平台的公司主要有新加坡的吉宝公司和 Semb Corp 海洋公司、韩国的三星重工公司和大宇造船海洋工程公司、美国的 Friede Goldman 近海公司、挪威的 Aker 集团。近年来，随着国外造船任务的日益增长，部分平台建造也转移到中国，如烟台莱佛士船业有限公司、大连新船重工公司和上海外高桥造船厂等。特别是大连船厂，2000 年至今，已为挪威先后建造了 Bingo 9000 系列共 4 艘半潜式钻井平台，该系列平台工作水深 2500m，钻深能力 9144m。

### 3. 半潜式钻井平台建造周期

从近几年的建造情况看，半潜式钻井平台和钻井船的建造周期为 2~4 年，预计新的平台建造周期将会缩短。我国的 FPSO 建造速度和建造质量已达到国际先进水平，平均建造周期为 22 个月/艘，远远低于发达国家 36 个月/艘的平均建造周期。

### 4. 半潜式钻井平台的造价

随着技术含量的增加、可靠性的提高以及市场需求的增加，海上钻井装置的造价不断攀升。半潜式钻井平台的造价从 20 世纪 70 年代的平均 2400 万美元已上涨至 2006 年的 3.5~6.3 亿美元。2006 年底钻井船的造价一般为 4.5~6.5 亿美元。中国海洋石油总公司委托上海外高桥建造的最新的第六代半潜式深水平台造价约为 45 亿元人民币。1992—2009 年海洋钻井平台建造成本变化情况见表 1-1。

### 5. 半潜式钻井平台的作业水深

现有的深水半潜式钻井平台的额定作业水深从 1640ft（500m）至 10000ft（3095m）不等，其中大约 45% 的平台能够从事超深水钻井。现有的深水钻井船的额定作业水深从 900~3048m 不等。其中，额定作业水深为 10000ft（3048m）的钻井船最多，有 14 艘，有 70% 的深水钻井船能够从事超深水钻井。在建的钻井船的额定作业水深都在 3000m 以上。

### 6. 半潜式钻井平台的技术水平划分

半潜式钻井平台的技术水平习惯以代划分。在 20 世纪 60 年代中后期建成的半潜式钻井平台属于第一代，早已退役了。第一代和第二代半潜式钻井平台适用于浅水，采用锚泊定位。第三代可用于 450~1500m 的深水钻井，仍采用锚泊定位。第四代主要适用于 1000~

2000m 的深水，以锚泊定位为主。第五代适用于超深水，以动力定位为主。近几年建成的半潜式属第六代，适用于水深为 2550~3600m 的极恶劣海洋环境，采用动力定位，其主要特点见表 1-2。

表 1-1 1992—2009 年海洋钻井平台建造成本变化情况

亿美元

时 间		1993. 12	2003. 12	2004. 12	2005. 12	2006. 12	2007. 12	2008. 12	2009. 12
自升式 钻井平台	150ft	0.06	0.1	0.19	0.35	0.35	0.4	0.4	0.14
	200ft	0.08	0.22	0.25	0.5	0.5	0.55	0.55	0.22
	250ft	0.18	0.32	0.47	0.75	0.75	1.0	0.95	0.55
	300ft	0.2	0.5	0.6~0.65	1.0	1.0	1.5	1.45	1.1
	>350ft	—	1.05~1.45	1.15~1.45	1.5	1.5	2.1	2.05	1.6
半潜式 钻井平台	第三代	0.4	0.65	0.6	1.4	1.4	2.5	3.25	2.6
	第四代	0.9	1.6~1.75	1.4	2.5	2.5	3.2	4.0	3.35
	第五代 (>8000ft)	—	2.8~3.0	2.7	4.0	4.0	5.0	6.5	6.0
	第六代 (>10000ft)	—	—	—	—	—	6.75	7.0	6.35
钻井船	>4000ft	0.08~0.1	0.7	0.5~0.6	1.5	1.5	2.85	3.0	2.3
	第五代 (>8000ft)	—	2.8~3.0	2.5~2.7	4.0	4.0	5.0	6.5	6.05
	第六代 (>10000ft)	—	—	—	5.0	5.0	6.75	7.25	6.45

表 1-2 不同技术水平的半潜式钻井平台的主要特点

技术 水平	主要建成时间	主要额定作业 水深范围, m	钻井能力, ft	定位方式	备 注
第一代	20 世纪 60 年代中后期	90~180	—	锚泊定位	—
第二代	20 世纪 70 年代	180~600	以 25000、 20000 为主	锚泊定位	—
第三代	1980—1985 年	450~1500	以 25000 为主	锚泊定位	—
第四代	1985—1990 年 1998—2001 年	1000~2000	以 25000、 30000 为主	以锚泊定位为主	—
第五代	2000—2005 年	1800~3600	主要范围 25000~37500	以动力定位为主	能适应极其恶劣的海洋环境
第六代	2007 年及以后	2550~3600, 以 3048m 为主	≥30000	动力定位	能适应更加恶劣的海洋环境

## 7. 半潜式钻井平台设计的关键技术

当前半潜式钻井平台设计的关键技术主要有以下几个方面：

(1) 高效钻井作业系统。如何配置多井口作业系统、钻杆处理系统、动力锚道等，以提高工作效率，是研制半潜式钻井平台设计的关键。

(2) 升沉补偿系统。在深海钻井作业过程中为了保持钻头接触井底，必须设法补偿平台



由于风浪作用而产生的升沉落差。早期的方法是使用伸缩钻杆，目前主要采用天车补偿、游车补偿以及绞车补偿等方法。

(3) 定位系统。半潜式钻井平台在海中处于飘浮状态，受风、浪、流的影响要发生纵摇、横摇运动，因此必须采用可靠的定位方法对其进行定位。半潜式钻井平台的定位方式主要有锚泊定位和动力定位两种，当水深大于 1500m 时，多采用动力定位。

(4) 水下设备。水下设备主要包括水下井口系统、水下井控系统、隔水管系统、水下设备控制系统等。

(5) 平台设备集成控制。平台设备集成控制技术研究是为航行、定位、钻井、完井作业创建一个数字化、智能化的控制平台。

### 三、深水 Spar 平台发展概况

#### 1. Spar 平台发展历程

1996 年 Oryx 能源公司在墨西哥湾水深 590m 的 Viosco knoll 826 区块安装了第一座 Spar 油气开发平台 Neptune，标志着第一代 Classic Spar 平台的诞生。Neptune 壳体呈圆柱形，长 215m，直径 23m，重 12895t，设计吃水 198m，由 6 条系泊索定位。

2002 年 Ker McGee 油气公司在水深 1122m 的 East Bresks602 区块建成投产了 1 座 Truss Spar 平台 Nansen，标志着第二代 Spar 平台的诞生。该平台主体长 165.5m，直径 27m；硬舱长 73m，软舱长 5m，干舷高度 15m，桁架部分长 88m，被 3 个垂荡板分为 4 层，Nansen 采用 9 条系泊索定位。

Truss Spar 平台的经济性和动力稳定性比 ClassicSpar 有了进一步提高，其卓越的性能使 Spar 平台的发展势头更加迅猛。仅 2002 年就先后有 3 座 Truss Spar 平台建成投产，水深达到了 1645m。2003—2005 年的墨西哥湾又有 4 座 Truss Spar 平台下水，远远超过了其他浮式平台的发展速度。

2004 年 Kerr McGee 油气公司在墨西哥湾 Garden Banks Block 877 区块建成投产了 1 座 Cell Spar 平台 Red Hawk，水深 1524m，这是第三代 Spar 平台。Red-Hawk 壳体长 171m，有效直径则只有 20m，由 6 个圆筒围绕中央圆筒组成，圆筒的直径均为 6m，其中 3 个圆筒的长度为 171m，与其他 3 个长度为 85m 的圆筒相间布置在中央圆筒周围。Red Hawk 采用 6 条尼龙缆定位，该平台仅用钢 7200t，而同样尺寸的其他类型 Spar 平台需用钢 12000t，这使 Spar 平台在深水和极深水开发中更具竞争力。

#### 2. Spar 平台设计的关键技术

##### 1) 波浪荷载及平台运动响应

Spar 平台的运动周期长，墨西哥湾典型的 Spar 平台固有周期为纵荡 160s、纵摇 60s、垂荡 28s，因此，对一阶波浪荷载的响应较小。其较大的纵荡运动主要是二阶波浪荷载和涌浪引起的长周期慢漂运动，最大二阶慢漂运动幅度可达水深的 6%~10%。

在不规则波的作用下，对于具有非张紧式系泊系统的 Spar 平台，其低频纵荡和纵摇响应一般大于波频响应。浪流组合作用时，慢漂响应明显小于没有流的海况。研究认为，仅用线性波浪结构相互作用理论不能很好地预测平台响应，必须采用二阶波浪结构相互作用理论并考虑粘滞和阻尼才能可靠地预测 Spar 平台的运动。而且波流联合作用和波能的多向散布对 Spar 平台的响应预测有较大的影响。如果能够精确地预测波浪水质点的运动，则用