

前 言

近年来，随着海洋强国战略的持续推进与国家在海洋资源开发、清洁能源获取以及深远海基础设施建设等方面的加速布局，我国海洋工程进入了快速发展阶段。无论是传统的海上油气平台，还是新兴的海上风电、深水养殖及多功能海洋空间利用系统，海洋浮式结构物都正在扮演着关键的角色。而这些浮式结构能否安全可靠地长期服役，其根本保障之一便是锚固基础系统的设计与施工质量。作为连接浮式平台与海床之间的重要枢纽，锚固基础不仅承受复杂多变的环境荷载，还决定了平台在风浪流作用下的稳定性与持久性，其安全性直接影响整个工程系统的成败。

然而，与传统陆地基础结构相比，海洋锚固基础在设计与施工方面面临着更加复杂的挑战，其工程环境具有高度不确定性，包括水深变化大、地质条件复杂、环境荷载剧烈波动等；而基础形式也从传统的重力式逐渐演进为拖曳锚、吸力锚、动力锚及组合型结构，呈现出多样化发展趋势。与此同时，如何在满足安全性与可行性的前提下，实现结构的轻量化、安装的高效化以及运营阶段的可靠性保障，对相关设计理论与工程方法提出了更高要求。因此，亟须一本能够系统总结锚固基础设计理论、分析方法与工程实践经验的专业著作，为研究人员提供理论支撑与工程指导。

在此背景下，本书立足于作者团队近二十年来在海洋岩土工程领域的研究积累与工程实践，全面梳理并系统总结了作者团队及国内外研究者在海洋锚固基础方面的研究成果与工程经验。书中围绕海洋浮式结构锚固基础的设计与应用，深入探讨了不同类型基础的构型特征、力学行为、适用场景与设计方法，兼顾理论推导与工程实践，力图在实用性与系统性之间找到平衡点。本书内容涵盖锚固基础类型选择、荷载传递机制、锚泊线动力响应、锚固系统安装控制、数值模拟与试验研究方法以及极端工况下的安全评估等多个方面，不仅总结了当前国际前沿的研究成果与标准规范(包括 DNV、API、ISO 等)，也结合国内外典型工程案例进行了深入剖析，具有较强的参考价值与实操意义。

值得强调的是，本书特别关注以下几个方面：①针对拖曳锚、吸力锚、锚桩等不同类型的安装控制与承载力评估方法，给出了一系列可实施的技术路径；②对动力环境与循环荷载作用下锚固系统稳定性问题的系统建模与分析，帮助读者理解多时空尺度下的工程响应；③对台风、地震等极端海洋环境下的锚固系统性能开展应力-变形评估与安全冗余分析，推动结构设计的科学化与精细化；④引

入新型基础形式(如芯桶重力锚)及其承载机制研究, 回应未来深远海清洁能源结构发展趋势。

本书面向具有一定基础的海洋工程专业人士、科研人员与高年级学生, 既可作为工程设计与项目实施的参考资料, 也可作为研究生课程教学的辅助读物。作者希望通过本书为广大研究者提供一个较为完整的知识体系, 提升锚固基础设计与应用的系统性、规范性与创新性。

本书的撰写得益于众多同行的支持与帮助。在撰写过程中, 席晨、国铭元、路海强、徐航、赵越、张士泓、徐孟涛、张雅茹、张皓杰、余骏远、陈泽等在资料整理、书稿校对、图表绘制等方面给予了极大的帮助和鼓励, 在此表示衷心感谢。与此同时, 本书也参考了大量国内外文献和工程资料, 对未能一一列出的原作者深表歉意。

尽管本书力求内容严谨、表达准确, 但由于锚固基础领域的持续发展和作者自身认识的局限, 难免存在不足与疏漏之处, 诚挚欢迎广大读者批评指正, 共同推动海洋锚固基础技术的发展与进步。

作 者

著于 2025 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 历史与现状	1
1.2 锚泊定位系统	3
1.2.1 海洋浮式结构物	3
1.2.2 锚泊线	9
1.2.3 锚固基础	11
1.3 海洋工程环境	13
1.3.1 设计环境	13
1.3.2 浮体荷载	14
1.3.3 浮体动力学方程	21
1.3.4 海床土体	23
1.3.5 其他	24
1.4 设计准则	25
1.4.1 设计标准	25
1.4.2 设计流程	27
1.4.3 疲劳分析	27
1.4.4 安全系数	30
1.5 本书简介	33
1.5.1 本书内容	33
1.5.2 本书定位	33
参考文献	34
第 2 章 锚固基础选型	36
2.1 概述	36
2.2 重力锚	37
2.2.1 基本特点	37
2.2.2 适用条件	38
2.2.3 工程应用	40
2.3 拖曳锚	40
2.3.1 基本特点	40

2.3.2 适用条件	42
2.3.3 工程应用	45
2.4 锚桩	46
2.4.1 基本特点	46
2.4.2 适用条件	47
2.4.3 工程应用	51
2.5 吸力锚	52
2.5.1 基本特点	52
2.5.2 适用条件	54
2.5.3 工程应用	56
2.6 吸力式贯入板锚	57
2.6.1 基本特点	57
2.6.2 适用条件	58
2.6.3 工程应用	59
2.7 动力锚	60
2.7.1 基本特点	60
2.7.2 适用条件	62
2.7.3 工程应用	63
2.8 其他锚	64
2.8.1 螺旋锚	64
2.8.2 芯桶重力锚	64
参考文献	65
第3章 锚泊线静动力特性	68
3.1 概述	68
3.2 锚泊线方程	68
3.2.1 锚泊线静力控制方程	69
3.2.2 锚泊线静力控制方程的数值求解	71
3.2.3 锚泊线动力控制方程	73
3.2.4 锚泊线动力控制方程的数值求解	74
3.3 海床土体抗力	75
3.3.1 黏土海床中土体抗力的发挥机制	76
3.3.2 砂土海床中土体抗力的发挥机制	77
3.4 锚泊线-海床静力相互作用	85
3.4.1 锚泊线的服役状态	85
3.4.2 切入海床段的影响	88
3.5 锚泊线-海床动力相互作用	91

3.5.1 二维锚泊线动力学	91
3.5.2 三维锚泊线动力学	92
3.5.3 单向运动工况	95
3.5.4 循环运动工况	98
参考文献	104
第4章 锚泊线触底开槽效应	106
4.1 海床开槽特征	106
4.1.1 现场沟槽特征	106
4.1.2 沟槽形成过程	108
4.2 锚泊线二维开槽形态	109
4.2.1 沟槽二维轮廓计算模型	109
4.2.2 沟槽二维模型结果和验证	112
4.3 沟槽对锚泊线荷载传递的影响	116
4.3.1 工况设计介绍	116
4.3.2 导缆孔和锚眼处张力变化	116
4.3.3 导缆孔和锚眼处倾角变化	117
4.4 锚泊线三维开槽形态	117
4.4.1 沟槽三维特征与描述	117
4.4.2 沟槽三维形态计算模型	121
4.4.3 沟槽三维形态计算结果	125
4.5 砂土海床中锚泊线开槽评价	127
4.5.1 计算模型介绍	127
4.5.2 沟槽轮廓计算结果	129
参考文献	130
第5章 拖曳锚安装控制	132
5.1 概述	132
5.2 控制方程	133
5.2.1 引言	133
5.2.2 锚体运动方程	133
5.2.3 锚泊线控制方程	135
5.3 拖曳安装数值模型	135
5.3.1 数值框架	136
5.3.2 锚体模块	137
5.3.3 拖曳线模块	138
5.4 安装方式	140
5.4.1 船动安装分析	140

5.4.2 收链安装分析	144
5.4.3 对比分析	147
5.5 影响因素评价	152
5.5.1 锚泊线类型	152
5.5.2 锚板-锚脰夹角	153
5.5.3 土体灵敏度	155
参考文献	155
第6章 锚桩抗拔承载力	157
6.1 概述	157
6.2 锚桩-土体界面特征	157
6.2.1 锚桩-土体界面特征研究方法	157
6.2.2 考虑大位移剪切过程的锚桩-土体界面特征	158
6.2.3 考虑桩基贯入路径的锚桩-土体界面特征	163
6.3 锚桩-土体界面模型	167
6.3.1 理论模型	167
6.3.2 参数说明	169
6.4 锚桩循环拉拔-时域分析模型	172
6.4.1 数值模型	172
6.4.2 模型验证	173
6.4.3 时域响应分析	175
6.5 锚桩循环拉拔-简化分析模型	177
6.5.1 大次数界面循环剪切试验	177
6.5.2 数值模型	180
6.5.3 模型验证	183
参考文献	185
第7章 吸力锚安装与承载	186
7.1 概述	186
7.2 吸力锚安装土塞效应	187
7.2.1 试验内容	187
7.2.2 常规沉贯试验	189
7.2.3 间歇式沉贯试验	192
7.3 吸力锚安装控制	194
7.3.1 反滤层设计试验	195
7.3.2 吸力锚吸力及沉贯阻力	196
7.3.3 实际工程应用建议	198

7.4	抗拔承载力特征	199
7.4.1	竖向承载力试验	199
7.4.2	斜向承载力计算	200
7.5	吸力锚快速拉拔	203
7.5.1	数值模型定义	203
7.5.2	方程推导	205
7.5.3	模型验证	208
7.5.4	承载力特征	210
7.6	吸力锚循环拉拔	211
7.6.1	循环 $t-z$ 模型	211
7.6.2	模型验证	213
7.6.3	循环加载幅值影响	215
	参考文献	217
第 8 章	动力锚安装控制	219
8.1	概述	219
8.2	动力锚安装过程及受力特征分析	220
8.2.1	水中自由下落	221
8.2.2	土中冲击贯入	222
8.3	尾缆拖曳效应	223
8.3.1	垂直锚泊线配置下的动力响应分析	223
8.3.2	非垂直锚泊线作用下的姿态干扰机理	226
8.3.3	工程建议与控制对策	232
8.4	动力锚倾斜的现场试验研究	233
8.4.1	试验场地与海床地质条件	233
8.4.2	动力锚及测试系统配置	234
8.4.3	试验结果与贯入性能分析	236
8.4.4	倾斜安装对贯入深度的影响	237
8.4.5	倾斜安装影响因素探讨	239
8.5	动力锚倾斜贯入机理分析	240
8.5.1	动力锚安装过程中的倾角演化特征	240
8.5.2	空气中倾斜自由下落阶段的分析	242
8.5.3	海床中倾斜贯入阶段的分析	243
8.6	考虑倾斜效应的贯入深度预测方法	244
8.6.1	基于抗力的贯入深度预测方法	244
8.6.2	基于能量的贯入深度预测方法	245
8.6.3	两种方法的比较与适用性分析	249

参考文献	250
第 9 章 新型复合锚设计	252
9.1 概述	252
9.2 承载力特征	253
9.2.1 离心模型试验介绍	253
9.2.2 三维有限元模型介绍	256
9.2.3 承载失效模式	256
9.2.4 板-桶耦合效应	266
9.2.5 承载力计算公式	268
9.3 锚型设计	273
9.3.1 设计原则	273
9.3.2 设计流程	273
9.4 工程应用	275
9.4.1 引言	275
9.4.2 砂土海床浅埋芯桶重力锚设计分析	277
9.4.3 黏土海床浅埋芯桶重力锚设计分析	279
参考文献	281
第 10 章 台风海况锚固基础安全评价	282
10.1 概述	282
10.2 相关模型	285
10.2.1 浮体水动力模型	285
10.2.2 系泊线-土作用模型	286
10.2.3 锚固基础数值模型	289
10.2.4 浮体-系泊线-基础耦合模型	290
10.3 案例计算参数	293
10.3.1 浮式平台	293
10.3.2 系泊线参数	294
10.3.3 锚固基础参数	294
10.3.4 环境定义	295
10.3.5 水动力模型验证	296
10.4 计算结果	297
10.4.1 系泊线断裂后的平台运动	297
10.4.2 导缆孔和锚点处张力变化	299
10.4.3 考虑面外荷载的锚固能力	304
10.4.4 考虑耦合效应的基础安全系数演化	305
参考文献	306

第1章 绪 论

1.1 历史与现状

人类开发利用海洋资源的活动已有数千年的历史，从最初依赖海洋资源生存，发展到如今海洋已成为全球经济与战略布局中的重要组成部分。在过去的几十年里，海洋工程经历了从萌芽到成熟、从专业化到多元化的不同阶段，随着技术的不断创新，已经形成了如今涉及深海石油、天然气、海洋风能、海底矿产等多个领域的庞大体系，极大推动了全球能源生产方式和经济发展模式的转型。

海洋工程始于 19 世纪末 20 世纪初，此时为萌芽期，海洋工程的主要目标集中在港口、航道和浅水区的基础设施建设上。进入 20 世纪中期，随着石油需求的激增，海洋油气开采成为推动海洋工程快速发展的主要动力。1947 年，世界上第一个钢结构海洋平台的建成为海洋工程奠定了基础。随着北美墨西哥湾油田的开发，海洋平台的设计逐渐走向多样化，出现了自升式平台、导管架平台等多种结构形式。这一时期，海洋工程虽然进入了膨胀期，但是技术水平仍较低，更多地是通过实际应用和经验积累来解决面临的各种问题。1959~1973 年，海洋工程技术进入了专业化和国际化阶段，在此期间，欧洲北海油田的开发成为推动海洋工程技术革新的重要因素。海洋石油工业的繁荣使海洋平台的设计不断创新，特别是半潜式平台、单点浮泊系统等技术的应用，使深海油气的开采成为可能。此外，海洋工程的国际化进程也在这一时期加速，各大石油公司纷纷开展技术合作与知识共享，推动了全球海洋工程技术的共同进步。

1973 年的石油危机导致全球对石油的需求急剧上升，迫使海洋工程在技术和设计上迎来新一轮的突破。半潜式平台技术得到广泛应用，并随着技术的不断改进，在深海环境中取得了良好的应用效果。此时，海洋工程不仅关注平台的设计和建设，还逐渐涵盖水下采油树、海底管道以及海底作业系统的开发，逐步形成了一个完整的海洋资源开采体系。海洋石油的开采逐步深入深海区域，而这一过程伴随着越来越复杂的技术挑战，需要新型的设备和更加可靠的技术保障。然而，海洋工程的发展并非一帆风顺。1980 年后，由于全球石油价格的大幅波动以及帕玻尔·阿尔法(Piper Alpha)平台灾难等一系列事故的发生，海洋工程行业进入了一个反思期。海洋工程界开始更加注重安全性和环保问题，许多新技术和安全标准被提出并付诸实施。随着对海洋平台设计和施工要求的不断提高，行业对技

术的研发加大投入,尤其在安全管理和环境保护方面取得了显著进展。与此同时,浮式生产储油卸油装置等新型设备开始得到应用,灵活性和经济性成为这一时期海洋工程技术创新的重要特点。进入 21 世纪,海洋工程进入了一个全新的转型期。2008 年金融危机后,全球经济和能源格局发生了深刻变化,特别是《巴黎协定》之后,全球对“双碳”目标更加重视,海洋工程逐渐向新能源开发转型。海上风电作为一种极其重要的清洁能源,逐渐成为海洋工程发展的新亮点,尤其在近海水深不超过 50m 的区域。

近十年,在全球能源转型与“双碳”目标推动下,海洋资源开发已从补充性选项跃升为保障国家安全、重塑能源格局的战略工程。目前,海洋资源开发主要包括海洋油气资源、清洁可再生能源(风能、太阳能和波浪能等)、海底矿物资源、远海岛礁开发等。其中,海洋油气资源和清洁可再生能源是全球能源供给的重要来源。随着世界各国海洋装备和技术的不断提升,海洋资源开发逐渐从近海向深远海扩展。海洋工程结构形式也随之优化升级:在近海浅水区域(水深 <100m),主要采用单桩固定式或导管架式结构;随着水深增加到 100~500m,导管架式、顺应塔式等平台结构成为主流选择;而当水深超过 500m 时,浮式结构物因其显著的技术经济优势而成为必然选择。

目前,全球多个具有标志性的大型海洋浮式结构物已经建成(图 1-1),包括:挪威 Hywind Tampen 浮式风电群采用 11 台 8.6MW 风力发电机(本书简称为风机),是全球首个为油气平台供电的浮式风电场,水深达 260~300m;北美墨西哥湾 Appomattox 半潜式平台的作业水深达 2255m,是当前工作水深最大的油气开发设施之一;中国“深海一号”超深水气田采用世界首座 10 万 t 级半潜式生产储油平台,最大作业水深达 1500m;中国“蓝鲸 2 号”钻井平台可抵御 15 级台风,最大钻井深度为 15250m。这一系列标志性项目展示了全球浮式结构技术从浅水向超深水的跨越式发展。



(a) 挪威 Hywind Tampen 浮式风电群



(b) 北美墨西哥湾 Appomattox 半潜式平台



(c) 中国“深海一号”钻井平台



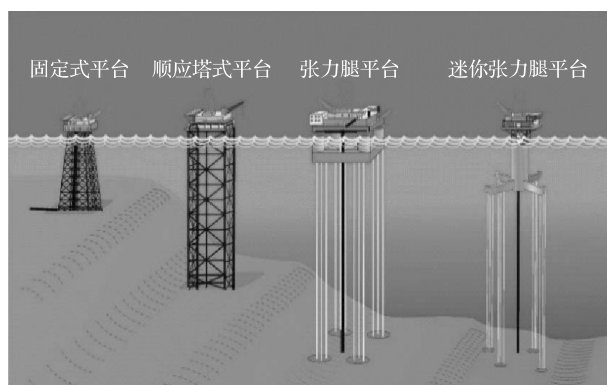
(d) 中国“蓝鲸2号”钻井平台

图 1-1 全球标志性大型海洋浮式结构物

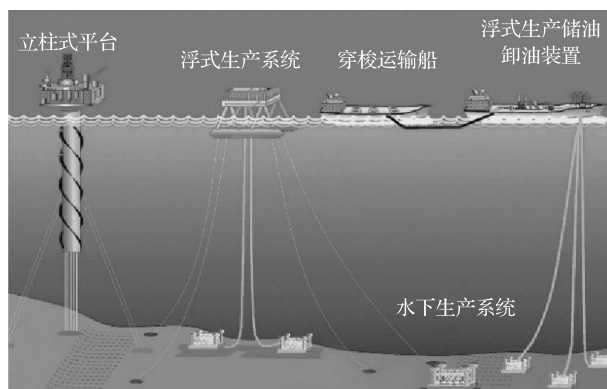
1.2 锚泊定位系统

1.2.1 海洋浮式结构物

自 20 世纪 70 年代以来,深水油气开采逐渐成为国际石油工业的一个重要前沿阵地,在欧洲北海、巴西近海、北美墨西哥湾以及西非近海等地区取得了重大的突破性进展。海洋油气资源的开发依赖于各类海洋结构物,包括近海固定式平台、远海浮式平台、浮式生产储油卸油装置、水下生产系统和锚泊系统等(图 1-2)。在近海浅水区域($<100\text{m}$),固定式平台或顺应塔式平台是其主要平台形式;当水深超过一定深度后,浮式平台经济优势显现,应用广泛的浮式平台类型包括张力腿平台(tension leg platform, TLP)、立柱式平台、半潜式平台、浮式生产储油卸油装置(floating production storage and offloading, FPSO)等。



(a) 固定式和竖向锚泊结构



(b) 浮式结构和水下生产系统

图 1-2 海洋结构物(芮圣洁, 2022)

浮式风机是一种以浮式平台为基础结合风机进行发电的结构,也是一种新兴清洁能源及产业。全球风能理事会预测,到 2030 年海上风力发电能力将增至 234kMW。对于深海风能资源,尤其是欧洲,80%的风能资源位于 60m 以上的深海海域,但传统固定式结构开发成本较高(International Energy Agency, 2021)。我国近海可开发的风能资源丰富,总量约为陆上可利用风能总量的 3 倍。一般来说,离岸 10km 的海上风速比海岸高 25%左右,深水区(水深为 50m 或离岸 50km)的风能更为丰富(Hartnell and Miborrow, 2000)。对于海上风机平台,在水深小于 50m 的区域主要使用单桩或者导管架基础,当水深增大至 50m 后,浮式平台基础成本更优。目前,浮式风机的设计理念主要参照海洋油气平台类型,即半潜式平台、张力腿平台和立柱式平台,如图 1-3 所示。在半潜式平

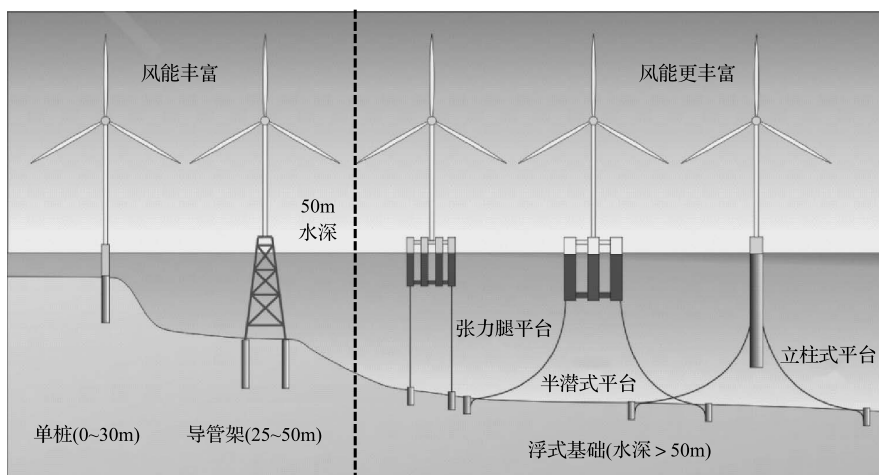


图 1-3 适用于不同水深的海上风机结构和基础类型(芮圣洁, 2022)

台中, 回复力矩通过分布浮力获得, 回复力由锚泊系统提供; 在张力腿平台中, 张力索平衡平台的剩余浮力用来改善浮式平台垂荡等运动响应; 在立柱式平台中, 压载舱将系统重心降低到浮心以下, 以保持平台稳定性。

海洋观测浮标漂浮于海面, 可在恶劣海况下长期工作, 对风、浪、流等多类环境要素进行自动、连续的同步观测, 与调查船、调查飞机、卫星遥感等互补, 是现代化海洋监测系统的重要组成部分, 受到全球海洋国家的重视。20 世纪 60 年代, 美国、挪威、加拿大、荷兰、日本等国家开始海洋观测浮标的研制。截至目前, 美国等世界海洋强国已经建立了面向全球的海洋浮标观测网。

在全球海洋战略格局中, 远海岛礁是天然的地理支点。南海、西太平洋等海域密集分布的珊瑚礁与离岸岛群, 因其独特位置优势, 既是海洋资源开发的天然枢纽, 又是维护国家海洋权益的前沿阵地。传统岛礁开发依托填海造陆等工程手段, 满足基本功能需求, 但是面临着生态代价高昂、成本投入巨大等突出问题。岛礁浮式平台(图 1-4)的技术突破为可持续海洋开发开辟了新路径。



图 1-4 岛礁浮式平台

下面分别针对典型浮式平台形式进行简要介绍。

1. 立柱式平台

立柱式平台技术应用于海洋开发已经有超过 30 年的历史, 但在 1987 年以前, 立柱式平台主要作为辅助系统, 而不是直接的生产系统。立柱式平台主要由硬舱结构、连接舱结构和软舱结构组成, 硬舱结构是指从主体顶甲板至可变压载舱底部之间的部分, 它是一个大直径的圆柱体结构, 中央井贯穿其中; 连接舱结构是指平台主体从可变压载舱底部至临时浮舱顶甲板之间的部分, 为桁架结构, 在桁架结构中设置 2~4 层垂挡板, 以增加平台的附加质量并附加阻尼, 提高稳定性;

平台主体中段以下的部分为软舱结构,主要设置固定压载舱,以此降低平台重心,同时为平台自行竖立过程提供扶正力矩。立柱式平台到目前为止已经发展到第三代,如图 1-5 所示。第一代立柱式平台称为经典立柱式平台,主要特点是主体为封闭式单圆柱结构,体形巨大;第二代立柱式平台称为构架立柱式平台,是目前建成使用最多的立柱式平台,其基于第一代立柱式平台的主体结构进行了改进,主体上部的硬舱同样采用封闭式单圆柱结构,中部则呈开放式构架结构,底部为压载舱;第三代立柱式平台称为蜂窝立柱式平台,由若干个小型、中空的圆柱形主体组成,组装时以一个小型圆柱为中心,将其他的圆柱体环绕捆绑在该中心圆柱体上,形成一个蜂巢形的主体结构。截至 2022 年,全球共有 22 座立柱式平台,其中有 20 座在墨西哥湾,挪威和马来西亚各有 1 座,工作水深最大的一座在墨西哥湾(壳牌的 Perdido)。

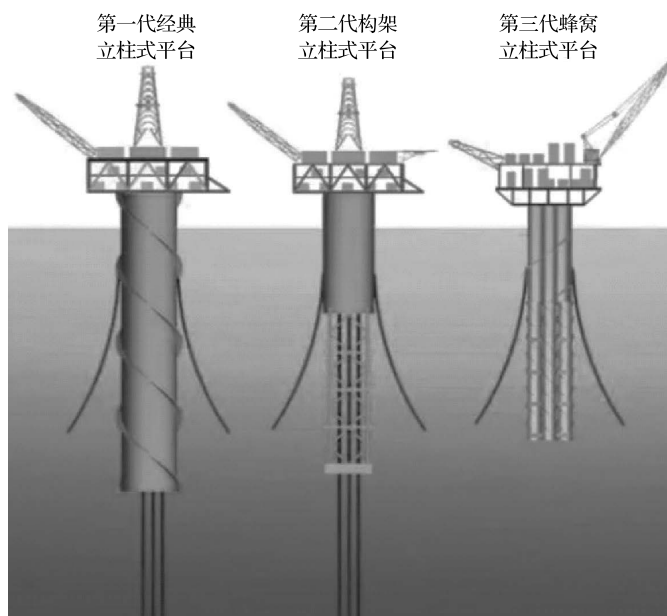


图 1-5 立柱式平台的演变

2. 张力腿平台

张力腿平台是一种典型的顺应式平台,通过数条张力腿与海底相连,张力钢筋键具有很大的预张力,这种预张力由平台本体的剩余浮力提供。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,从而使平台本体在平面外的运动(横摇、纵摇、垂荡)近于刚性,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来平衡。张力腿平台在各自由度上的运动固有周期均未落入海洋能量的主要集中频带范围。一座典型的张力腿平台,其垂荡运动的固有周期为 $2\sim 4\text{s}$,而纵荡和横荡运动的固有周期为 $100\sim 200\text{s}$,这就避免了共振现象的发生,表现出良好的稳定性。自1954年美国的 Marsh 提出采用倾斜系泊方式的索群固定海洋平台方案以来,张力腿平台经过近50年的发展,形成了成熟的理论体系。1984年第一座实用化张力腿平台——Hutton 张力腿平台(图1-6)在欧洲北海建成之后,其在生产领域的应用也越来越广泛,与立柱式平台一并逐渐成为当今世界深海采油领域的两大主力军。进入20世纪90年代之后,张力腿平台的发展进一步加速,在生产区域方面,已经从北海和墨西哥湾扩展到了西非沿海。1992年,挪威的 Saga 石油公司在 Snorre 油田第一期的开发工作中采用了张力腿平台的设计方案,这是北海区域第一座真正意义上的深水平台结构,它引进了一种简单经济的海洋浮式结构的锚固基础,即裙式重力基础(轻质紧密型混凝土制造大型重力锚)。1994~2001年,荷兰皇家壳牌石油公司在墨西哥湾相继制造了五座典型的张力腿平台,分别是 Auger、Mars、Ram Powell、Ursa 和 Brutus,这五座张力腿平台接连打破了深海采油平台工作水深的世界纪录,其中 Ursa 的水深更是突破了千米大关,达到了 1158m ,证明了该设计方案在深水海域的实用性。



图1-6 Hutton 张力腿平台

3. 半潜式平台

在世界各类移动式钻井装置中,适用于深水作业的半潜式平台有较大发展。半潜式平台稳定性较好、移动灵活,适用于较深的工作水深,作业可靠性高。在1996年全世界拥有132座半潜式平台,1997年增至147座,2000年增至170座,2002年增至175座,其中有31座工作水深在1829m及以上,有16座工作水深在2286m及以上,最大工作水深为3048m。当前世界上较典型的深水大型先进钻井平台有:Deep Water Horizon半潜式平台(图1-7(a)),工作水深为3048m,钻深能力为9144m,可变荷载为8200t,可住152人,动力定位系统为 $8 \times 5000\text{kW}$ 水平推进器;Cajun Express半潜式平台(图1-7(b)),工作水深为2591m,钻深能力为10668m,工作水深可升级改造至3048m。该平台与Sedco Express、Sedco Energy系采用同一设计(Sedco Express 2000)。Sedco Express平台和Sedco Energy平台在法国建造,其最大特征是井架装在平台后端,而且井架两侧都有连体桁架,可以组装和排放钻杆立根、套管立根和隔水管,并将其移送到井架中,可以大大缩短辅助时间,提高效率。Sedco Express平台除工作水深为1829m、可升级改造至2286m外,其余参数均与在新加坡建造的Cajun Express相同。Sedco Express和Cajun Express平台钻井机主绞车型号均为Hitec AHD6400 HP,各装有四台推进器,每台功率均为7MW,航速可达12kn($1\text{kn}=1.852\text{km/h}$),工作海区分别为墨西哥湾、巴西和尼日利亚海域,均于2000年建成。



(a) Deep Water Horizon半潜式平台



(b) Cajun Express半潜式平台

图1-7 典型的半潜式平台

1.2.2 锚泊线

锚泊线起到传递荷载的作用,即将上部浮式平台受到的荷载传递到锚固基础。锚泊线上端点通过导缆器连接到浮式平台上,通过绞车调整锚泊线长度和张力;锚泊线下端点连接至锚固基础,并利用锚固基础进行固定,整个系统主要通过锚泊线刚度和自重定位浮体位置。典型海洋工程锚泊系统如图 1-8 所示(芮圣洁, 2022),锚泊线上部通过导缆器与浮式结构相连接,下部固定于海床中的锚固基础。连接锚泊线的导缆器包括导缆孔和绞车导缆孔处设置的定滑轮,用于限制位置并改变锚泊线方向;绞车设置为止链器,用于收放锚泊线。

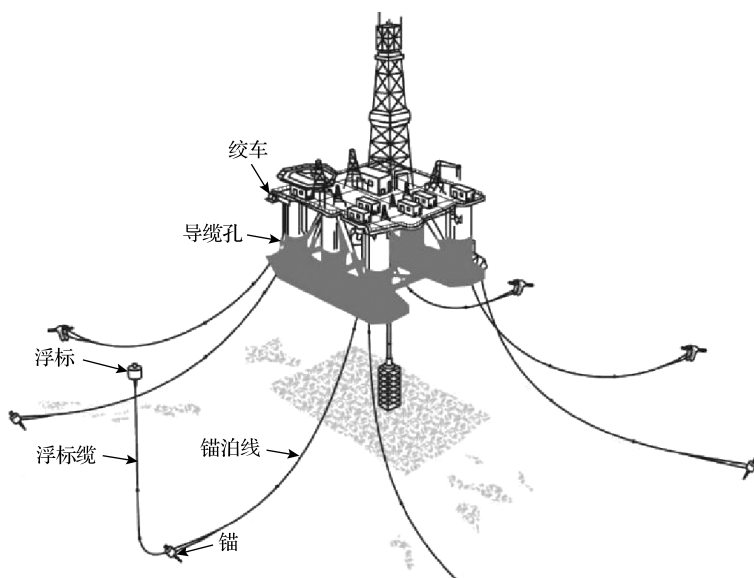


图 1-8 典型海洋工程锚泊系统(芮圣洁, 2022)

锚链是应用最广泛的锚泊线材料,其由许多链环顺次连接环环相扣而成,具有强度高、耐磨损、重度大等特点,适合浅水锚泊系统;但其自重较大且造价高,不适用于张紧式锚泊,因此深水条件下较少作为单一成分锚泊线使用。锚链最重要的参数是名义直径,是指制作链环所用的单链环直径(图 1-9),海洋工程锚链规格见 DNV-OS-E304 (Det Norske Veritas, 2020)。

钢绞线由若干钢丝围绕芯线捻制而成,常见结构包括六股式、八股式、多股式、螺旋股式,如图 1-10 所示。海洋工程中使用最广泛的是六股式钢绞线,多股式钢绞线一般具有更长的使用寿命;螺旋股式钢绞线纵向刚度较高,多用于深水锚泊系统中。

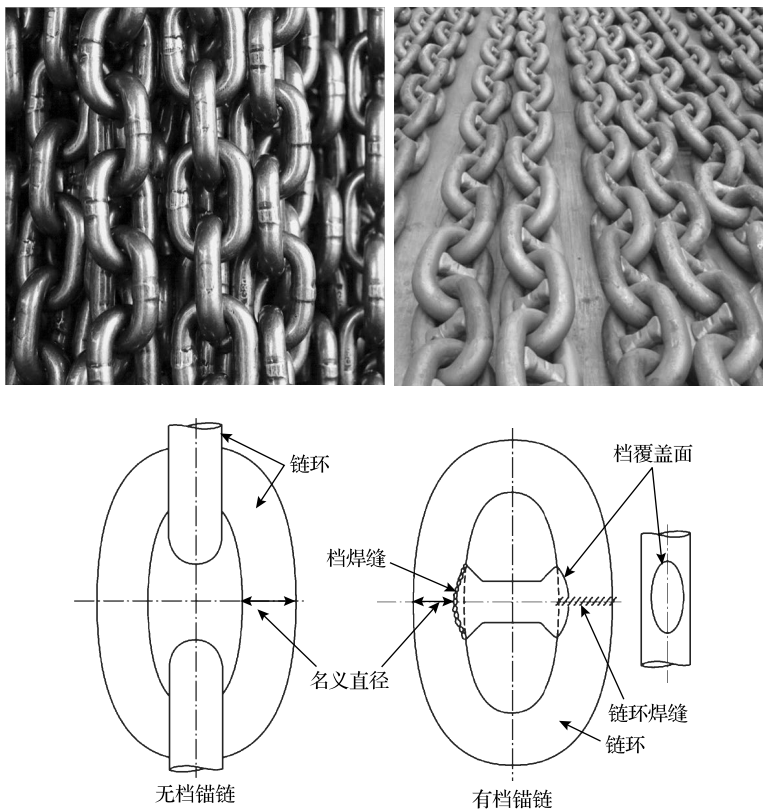


图 1-9 有档锚链和无档锚链 (American Petroleum Institute, 2005)

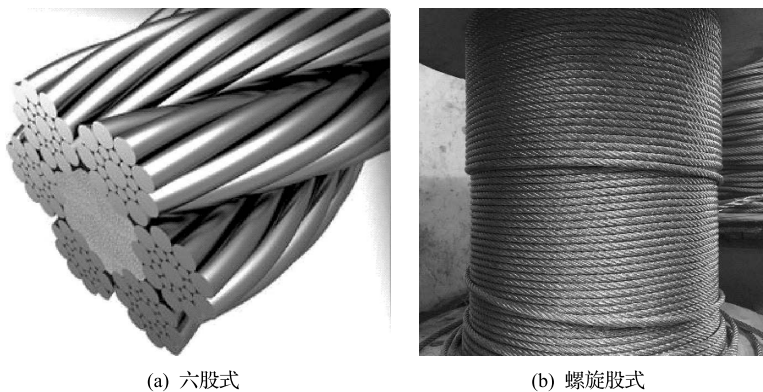


图 1-10 钢绞线

合成缆具有强度高、轻质等特点，在张紧式锚泊系统中应用广泛，合成缆主要包括尼龙缆、聚酯纤维缆、聚乙烯缆等，如图 1-11 所示。其中，聚酯纤维缆弹性模量小、强度高、疲劳性能好、抗蠕变能力强且成本低，在锚泊系统中应用广