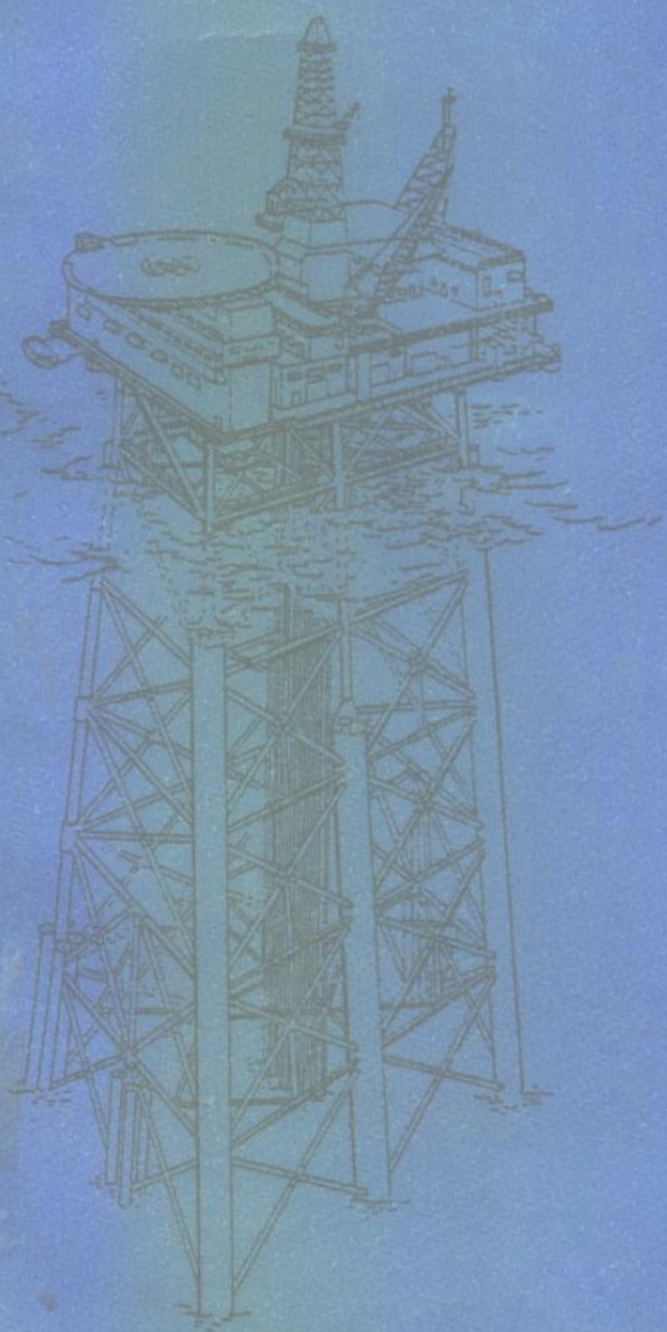


海洋平台强度分析



李润培 王志农 编著
上海交通大学出版社

海洋平台强度分析

李润培 王志农 编著

上海交通大学出版社

沪新登字 205 号

内 容 提 要

本书主要论述海洋平台强度分析的基本理论及工程实践中采用的设计计算方法。全书共分十章,系统地介绍了海洋平台的结构特征、环境载荷计算、移动式平台锚泊力计算、平台桩基础分析、钢材性能与选择、管节点的强度与疲劳分析、上部模块结构分析等内容,并以自升式平台、半潜式平台和导管架平台等三类目前使用最广泛的平台为例介绍了平台强度分析的特点和方法。

本书选材注意先进性和实用性,具有很好的完整性和系统性,可供高等院校海洋工程专业本科生使用,也可供从事海洋工程的技术人员参考。

海洋平台强度分析

出版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发行:新华书店上海发行所

印刷:常熟文化印刷厂

开本:787×1092(毫米) 1/16

印张:13.5

字数:328000

版次:1992年10月 第1版

印次:1992年11月 第1次

印数:1—1480

科目:280—296

ISBN7-313-01099-0/P·75

定价:3.85元

出版说明

根据国务院国发[1978] 23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会(小组)评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会(小组)复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

前 言

为适应国内外海洋石油工业和海洋工程技术的发展,以及海洋工程专业教学的需要,我们于1988年编写了《海洋平台强度分析》讲义,以供海洋工程专业本科生必修课使用。在教学实践的基础上,对原讲义作了较大的修改、补充,形成本书。第1章至第5章主要介绍海洋平台的结构特征、环境载荷的确定、移动式平台锚泊力的计算、桩基础分析、钢材的性能和选择等内容。这些内容是海洋平台强度分析的基础。第6章至第8章分别以目前使用最广泛的自升式平台、半潜式平台和导管架平台为例介绍海洋平台强度分析的基本特点和方法。第9章和第10章分别介绍管状节点强度和疲劳分析,以及平台上部模块结构分析。鉴于如何合理设计节点结构,提高其强度与疲劳寿命,以及正确考虑平台上部模块结构与支承结构的相互作用已经成为海洋平台结构设计中的重要课题,因此单列这两章也是十分必要的。

在本书的编写过程中,充分注意收集国内外的新资料,也反映了近几年来在教学、科研以及工程实践中积累的一些经验和成果。希望学生通过本书的学习能掌握海洋平台强度分析的基本理论和在工程实践中采用的设计计算方法。

本书的编写分工是:第1、2、3、5、6、7、9章由李润培同志编写;第4、8章由王志农同志编写;第10章由王志农、李润培同志编写;全书由李润培同志定稿。编写后由中国船舶工业总公司第708研究所徐寿钦同志主审。

在编写过程中,得到上海交通大学船舶结构力学教研室和海工教研室等有关同志的支持和帮助,在此深致谢忱。由于编者的学识水平和教学经验所限,本书中不当和错误之处在所难免,希望广大读者和使用本书的师生提出宝贵意见,以期在今后的教学实践中不断改进和完善。

编 者

1992年6月

目 录

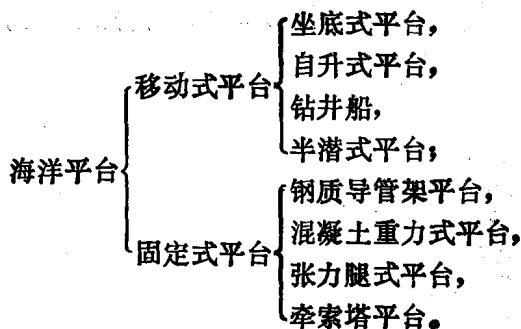
第 1 章 绪论	1
§1.1 海洋平台的种类	1
§1.2 平台的结构特征	5
§1.3 平台的典型破坏事故分析及安全性要求	11
§1.4 平台结构设计的一般步骤和强度分析方法	13
第 2 章 环境载荷计算	16
§2.1 平台承受的载荷的分类	16
§2.2 风载荷	17
§2.3 波浪载荷	20
§2.4 海(潮)流载荷	30
§2.5 冰载荷	31
第 3 章 移动式平台锚泊力的静力计算	33
§3.1 锚泊定位系统的布置形式及其设计参数	34
§3.2 单根锚链特性分析	35
§3.3 锚泊力的静力计算	39
§3.4 应用实例	40
第 4 章 基础分析	44
§4.1 海洋土力学	44
§4.2 桩基础的基本形式	46
§4.3 单桩的轴向承载力	48
§4.4 单桩的水平承载力	57
§4.5 基础的沉降、滑移和冲刷	68
第 5 章 钢材的性能和选择	77
§5.1 平台钢材的基本性能	77
§5.2 平台钢材的选择	80
第 6 章 自升式平台强度分析	86
§6.1 自升式平台的主要工作状态	86
§6.2 平台着底状态的总体强度计算	88
§6.3 桩腿局部强度计算	96
§6.4 拖航状态下桩腿的动力分析	100
第 7 章 半潜式平台强度分析	103
§7.1 半潜式平台设计工况的选择	103
§7.2 半潜式平台的结构理想化问题	106
§7.3 半潜式平台总强度分析的设计波算法	109

§7.4 半潜式平台总强度设计波计算法的计算实例	117
§7.5 半潜式平台结构强度的设计谱算法	122
第8章 固定式平台强度分析	129
§8.1 导管架平台强度的静力分析	129
§8.2 导管架平台强度的动力分析	136
§8.3 导管架平台地震反应分析	141
§8.4 导管架平台在运输、下水及安装过程中的受力分析	145
§8.5 混凝土重力式平台强度分析简介	147
第9章 节点强度与疲劳分析	152
§9.1 平台的节点型式	153
§9.2 管状节点的应力状态和破坏形式	154
§9.3 管状节点的冲剪应力校核	163
§9.4 管状节点的疲劳校核	168
第10章 上部模块结构分析	173
§10.1 上部模块结构的型式与特点	173
§10.2 上部模块结构与支承结构的相互作用	176
§10.3 上部模块结构分析的基本理论	179
§10.4 支承在4支点上的模块结构分析	188
§10.5 钻井设备与井口模块结构相互作用分析	194
§10.6 层叠模块结构相互作用分析	202
参考文献	204

第1章 绪 论

§1.1 海洋平台的种类

随着海洋石油开发事业的发展, 各类海洋平台应运而生。海洋平台的种类大体上可按如下划分:



一、移动式平台

移动式平台是一种装备有钻井设备, 并能从一个井位移到另一个井位的平台, 它可用于海上石油的钻探或生产。

1. 坐底式平台

这种平台一般用于水深较浅的海域, 工作水深在 61m(200ft) 以内, 作业水深再大则结构重量大, 不大经济。加上其作业水深不能调节, 对海底地形和土壤基础有一定要求, 故适应性不强。从世界范围而言, 坐底式平台发展较慢。然而我国渤海沿岸的胜利油田、大港油田和辽河油田等向海中延伸的浅海潮间带, 潮差大而海底坡度小, 对于开发这类浅海区域的石油资源, 坐底式平台仍有较大的发展前途。图 1-1 为我国自行设计建造的“胜利 1 号”坐底式钻井平台。

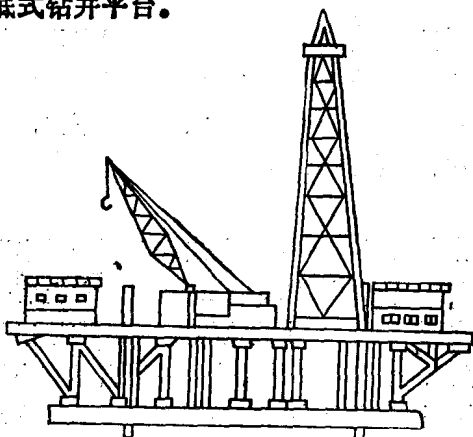


图 1-1 “胜利 1 号”坐底式平台外形图

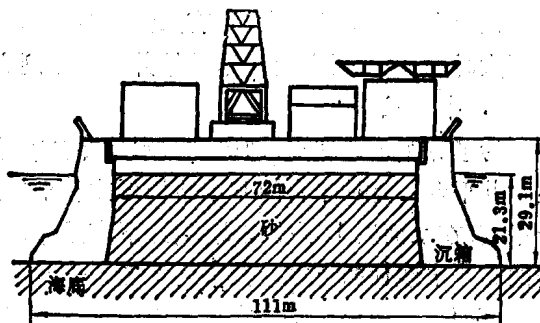


图 1-2 极区坐底式平台外形图

80年代初,人们开始注意北极海域的石油开发,设计、建造极区坐底式平台也引起海洋工程界的兴趣。目前已有几座坐底式平台用于极区,图1-2即是其中一种,它可加压载坐于海底,然后在平台中央填砂石以防止平台滑移,完成钻井后可排出压载起浮,并移至另一井位。

2. 自升式平台

自升式平台产生于1950年,它具有能垂直升降的桩腿(图2-3),钻井时桩腿着底,平台则沿桩腿升高海面一定高度;移位时平台降至水面,桩腿升起,平台就像驳船,可由拖轮把它拖移到新的井位。自升式的优点主要是所需钢材少,造价低,在各种海况下都能平稳地进行钻井作业;缺点是桩腿长度有限,使它的工作水深受到限制,最大的工作水深约在120m左右。超过此水深,桩腿重量增加很快,同时拖航时桩腿升得很高,对平台稳性和桩腿强度都不利。

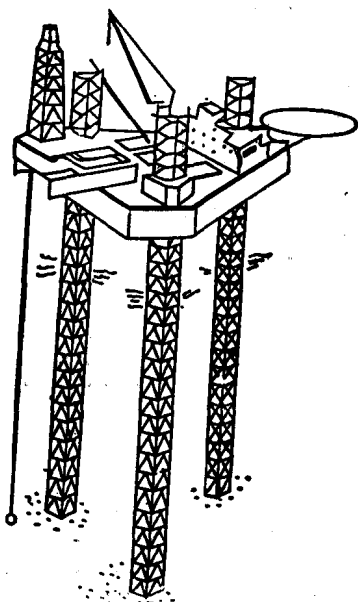


图1-3 自升式钻井平台

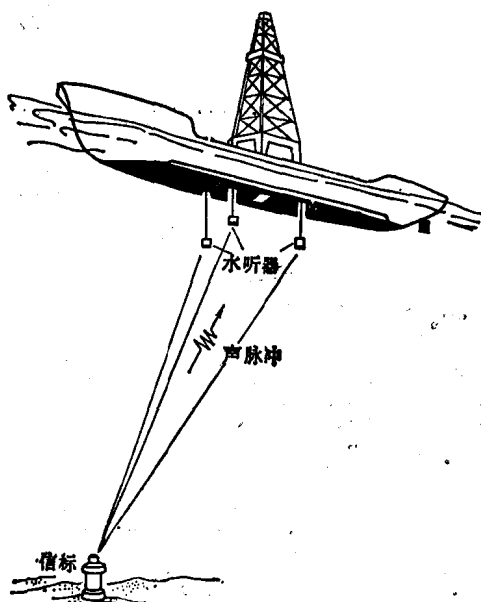


图1-4 钻井船

3. 钻井船

钻井船(如图1-4)在船中央设有井孔和井架,它靠锚泊系统或动力定位装置定位于井位上。它漂浮于水面作业,能适应更大的水深,同时它的移动性能最好,便于自航。但由于它在波浪上的运动响应大,稍有风浪就会引起很大的运动,使钻井作业无法再进行下去,风浪更大时船还得离开井位,这是钻井船得不到大的发展的主要原因。

4. 半潜式平台

为了克服上述缺点,即能在深水钻井又有较高作业效率,在1962年出现了第一艘半潜式钻井平台。这种平台的基本结构形式和坐底式相仿,是由坐底式演变而来的。它上有平台甲板,在水面以上不受波浪侵袭;下有浮体,沉于水面以下以减小波浪的扰动力,连接于其间的是小水线面的立柱,图1-5至图1-7所示为半潜式平台的几种型式。由于它具有小的水线面面积,使整个平台在波浪中的运动响应较小,因而它具有出色的深海钻井的工作性能,一般在作业海况下其升沉不大于 $\pm 1 \sim 1.5\text{m}$,水平位移不大于水深的5~6%,平台的

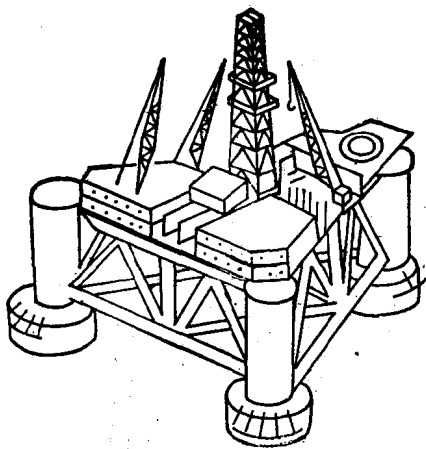


图 1-5 三立柱圆沉箱半潜式平台 (SEDCO135)

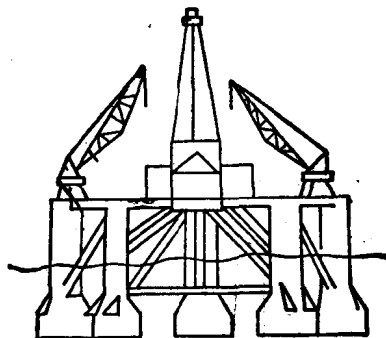


图 1-6 五立柱半潜式平台

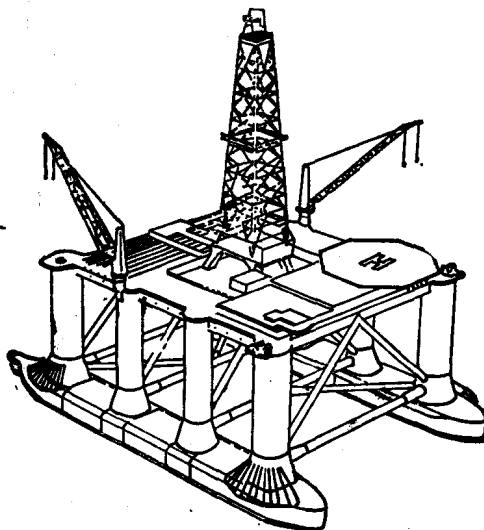


图 1-7 双下体半潜式平台

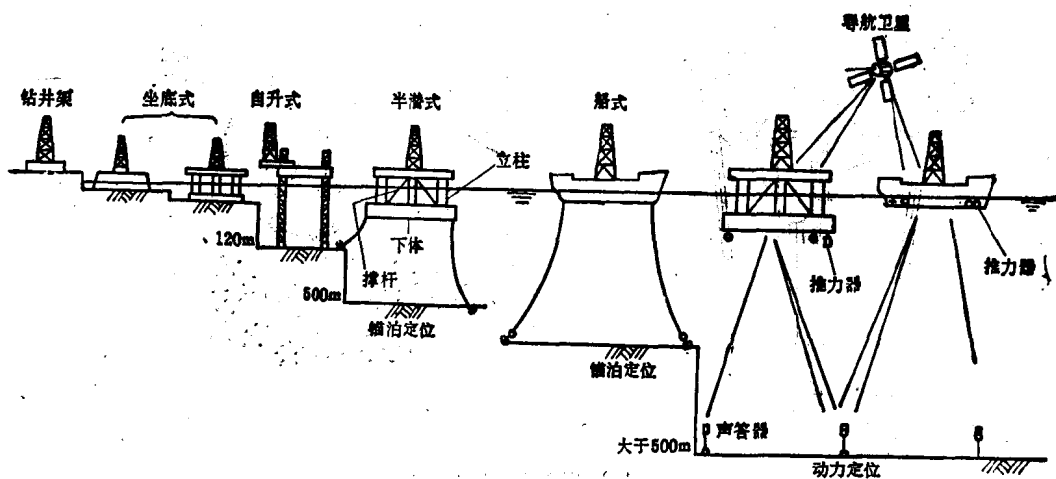
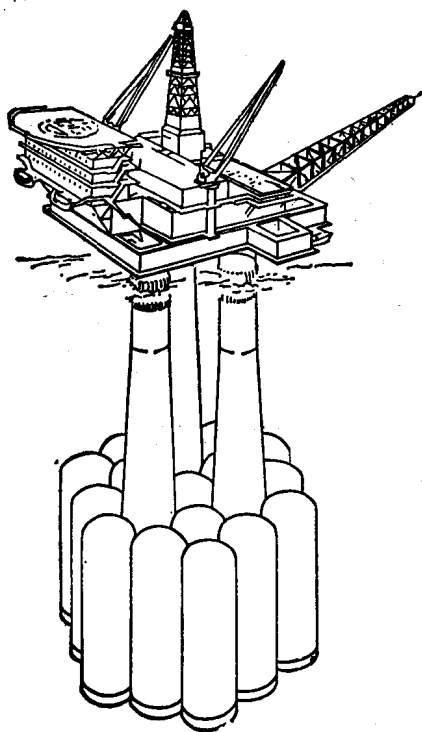
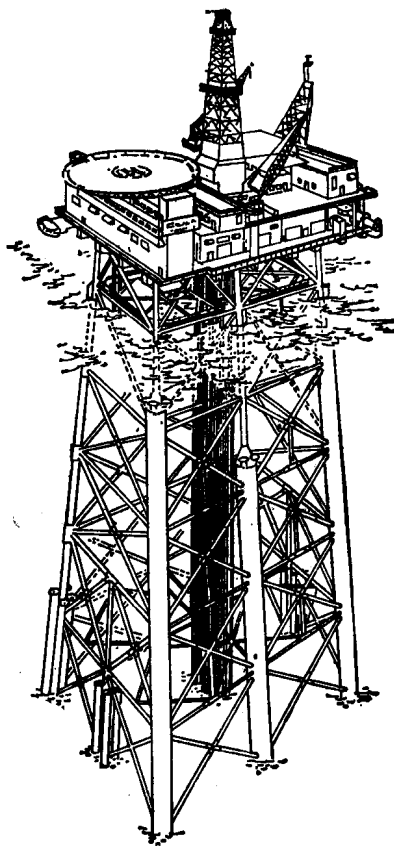


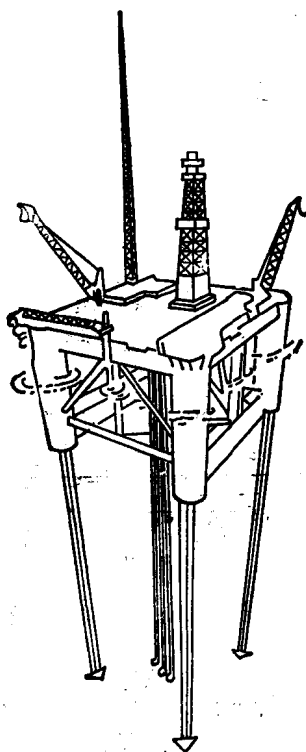
图 1-8 移动式平台的型式和作业水深



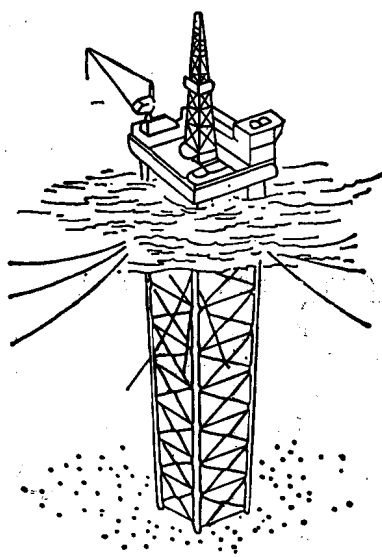
(a)



(b)



(c)



(d)

图1-9 固定式平台示意图

(a) 混凝土重力式平台 (b) 钢质导管架平台 (c) 张力腿式平台 (d) 牵索塔平台

纵横倾角不大于 $\pm 2^\circ \sim 3^\circ$ 。这种性能对漂浮于水面钻井的平台具有十分重要的意义。

半潜式平台可采用锚泊定位和动力定位,锚泊定位的半潜式平台一般适用于 200~500 m 水深的海域内作业。图 1-8 表示了移动式平台的作业水深情况。

二、固定式平台

固定式平台靠打桩或自身重量固定于海底,目前用于海上石油生产阶段的大多是固定式平台。固定式平台的外形如图 1-9 所示。

1. 混凝土重力式平台

这种平台的底部通常是一个巨大的混凝土基础(沉箱),用三个或四个空心的混凝土立柱支撑着甲板结构,在平台底部的巨大基础中被分隔为许多圆筒型的贮油仓和压载仓,这种平台的重量可达数十万吨,正是依靠自身的巨大重量,平台直接置于海底。现在已有大约 20 座混凝土重力平台用于北海。

2. 钢质导管架平台

钢质导管架平台通过打桩的方法固定于海底,它是目前海上油田使用最广泛的一种平台。钢质导管架平台自 1947 年第一次被用在墨西哥湾 6m 水深的海域以来,发展十分迅速,到 1978 年,其工作水深已达 312m。据报道,高度为 486m(1600ft) 的巨型导管架平台将安置于墨西哥湾 411m(1350ft) 水深的海域上^[10]。

3. 张力腿式平台

张力腿式平台的上部类似于半潜式平台,整个平台是通过张力腿(实为系泊钢管或钢索)垂直向下固定于海底。见图 1-9。张力腿式平台是一种新开发的深海石油平台,与导管架平台相比,导管架平台的造价与水深关系大致呈指数关系增加,而张力腿式平台的造价则随水深的增加变化较小。此外,由于每个张力腿都有很大的预张力,因此张力腿平台在波浪中的运动幅度远小于半潜式平台,这对海上作业是十分有利的。目前,虽然世界上只有一个张力腿平台用于北海的赫顿(Hutton)油田(水深 150m),但各国的海洋工程界已十分重视对张力腿式平台的开发研究。

4. 牵索塔平台

牵索塔平台由甲板、塔体、牵索系统三部分组成。见图 1-9,塔体是一个类似于导管架的空间钢架结构,牵索则围绕着塔体对称布置,牵索系统可以吸收由外力产生的能量以保证塔体的运动幅度在规定的范围内。据文献[11]的介绍,水深在 305m(1000ft) 时,固定式平台和牵索塔平台造价几乎相等,水深在 305~610m(1000~2000ft) 时,牵索塔平台优于固定式平台,而当水深大于 610m(2000ft) 时,牵索塔平台应让位于张力腿式平台。目前已有一座牵索塔平台用于墨西哥湾水深 305m 的海域。

§1.2 平台的结构特征

目前世界上使用最多的是自升式平台、半潜式平台和钢质导管架平台,下面就以这三种平台为例分别介绍其结构特征。

一、自升式平台

自升式平台由平台主体、桩腿和升降机构三大部分组成。

1. 平台主体结构

平台主体的平面形状一般有三角形(三腿)、矩形(四腿)和五角形(五腿)等,如图1-10所示。

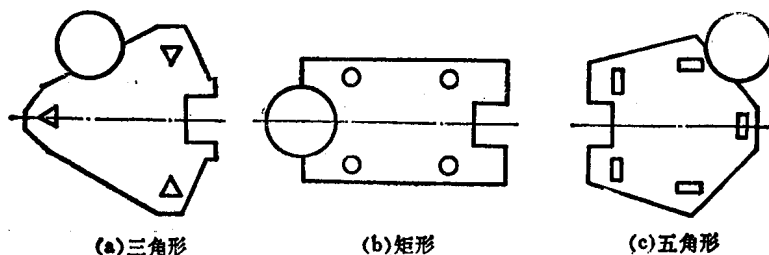


图1-10 平台主体的平面形状

平台主体通常是一个具有单底或双层底的单甲板箱形结构。其内部根据作业、布置和强度要求设有纵仓壁和横仓壁,但在桩腿之间的连线上必须设置强力仓壁作为平台主体的主桁材。在大的液体仓内有时还设有止荡仓壁以缓冲仓内液体在平台运动时的摇荡。主体结构的甲板、底板、仓壁等也和一般船舶一样需要由扶强材或强桁材加强。

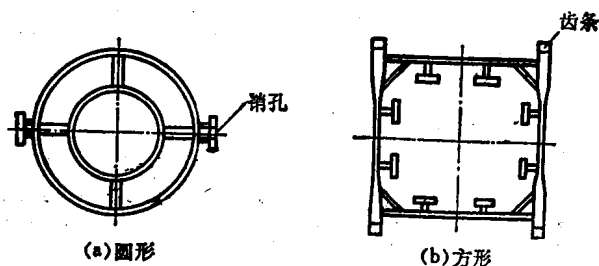


图1-11 壳体式桩腿

2. 桩腿结构

桩腿的作用主要在平台主体升起后支承平台的全部重量,并把载荷传至海底。桩腿的型式可分为壳体式和桁架式两类。壳体式桩腿由钢板焊接成封闭形的结构,其横断面有圆形和方形两种,如图1-11所示。

为配合升降装置,桩腿上有的设有销孔,有的装有齿条。这种壳体式桩腿一般用于工作水深60~70m以下,再深则需增

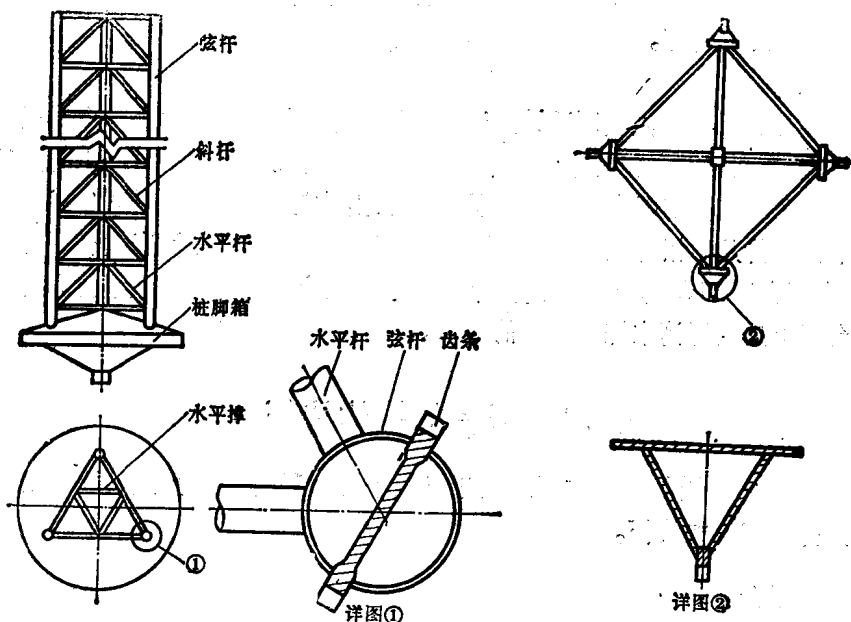


图1-12 桁架式桩腿(三角形、正方形)

大桩腿尺寸,导致更大的波浪载荷,结构的重量也增大。因此,深水的自升式平台都采用桁架式桩腿,如图1-12所示。桁架式桩腿由弦杆、斜撑杆、水平撑杆、内水平撑杆组成,在弦杆上装有齿条。

为适应海底地貌和土质的不同情况,桩腿下端结构可设计成单独带桩腿箱 (spud can), 亦称桩靴 (footing), 或设计成整体沉垫的型式。如图1-13所示。

带桩腿箱的桩腿一般说可兼顾软硬地基的要求。桩腿箱的主要型式如图1-14所示。对较硬的海底,桩腿箱设计成具有较小的支承面,甚至略带锥形;对较软的海底,桩脚箱的平面形状有圆形、方形和多边形等。

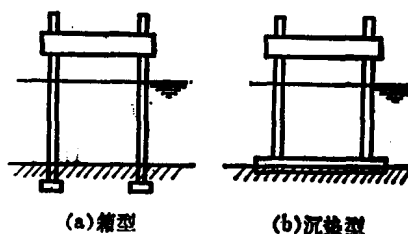


图1-13 桩腿下端的结构型式

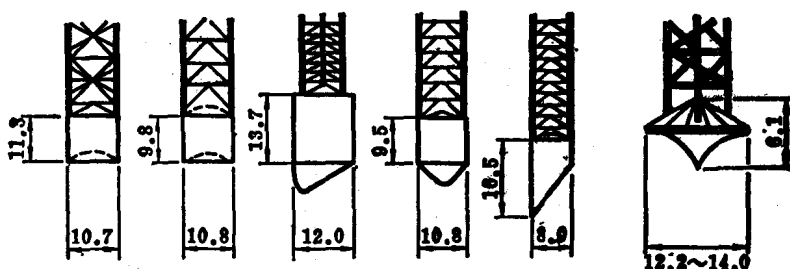


图1-14 桩脚箱的主要型式

沉垫型是将几根桩腿的下端连成一个共同的大沉垫,由于沉垫的支承面很大,故适用于软地基,但采用沉垫型的自升式平台在大风浪中容易产生滑移,故不宜用于淤泥地区。

3. 升降机构

升降装置安装在平台主体和桩腿的交接处,升降装置能使桩腿和平台主体实现上下相对运动,或把平台主体固定于桩腿的某一位置。

升降装置常用的有电动液压式和电动齿轮齿条式。

电动液压升降装置常用于壳体型桩腿,它利用液压缸中活塞杆的伸缩带动环梁上下运动,并利用锁销将环梁和桩腿锁紧而实现平台主体和桩腿的相对运动,如图1-15所示。

电动齿轮齿条式升降装置常用于桁架式桩腿,它由电动机经过减速机构带动齿轮转动,使齿轮与桩腿上的齿条啮合而完成平台主体与桩腿的相对运动。当电动机处于制动状态时,则可将平台主体固定于桩腿的某一位置。在升降装置的齿轮架的上面和下面还设有缓冲垫,以缓和力的冲击作用(例如桩腿与海底碰撞的力),如图1-16所示。

在钻井作业和拖航状态时,平台主体必须可靠地固定在一起。固定桩腿的常用方法,对圆柱型桩腿是在桩腿和主体结构之间的环隙内嵌入上下两圈楔块,如图1-15所示。对桁架式桩腿则在齿条两侧各嵌入楔块,如图1-17所示。一般每个桩腿的固桩块都承受着由桩腿传递来的弯矩。为了加大上、下固桩块的距离以减少固桩块处的水平力,通常上固桩块设在升降室的顶部,下固桩块设在主体底部。

二、半潜式平台结构特征

半潜式平台主要结构由三大部分组成:即上层平台,浮箱或下浮体、立柱和撑杆。如图

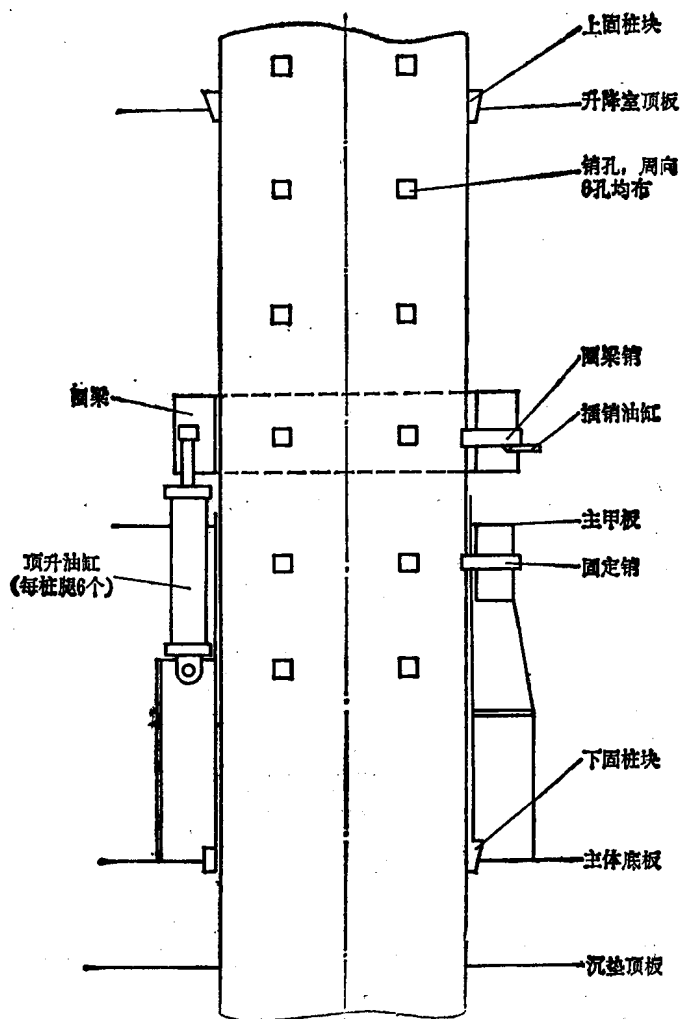


图 1-15 销子、销孔与液压升降装置

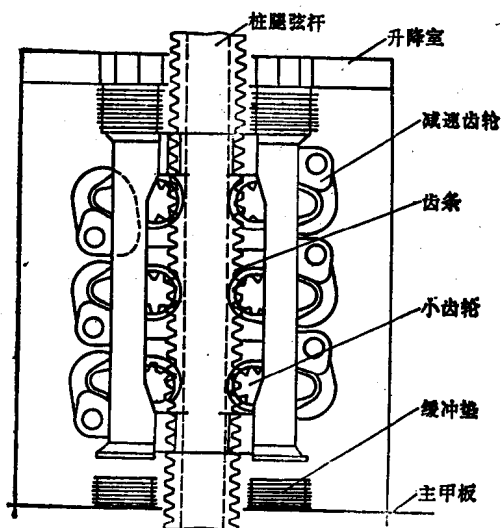


图 1-16 电动机齿轮齿条升降装置

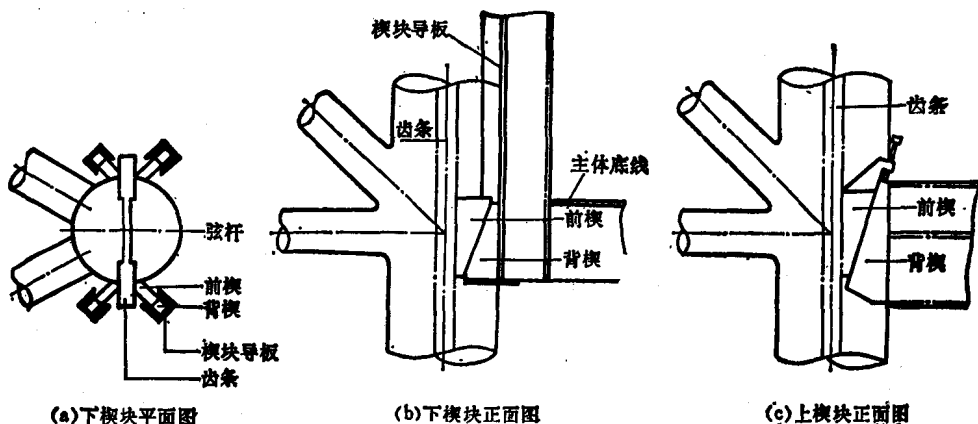


图 1-17 桁架式桩腿的固桩装置

1-18. 平台的结构形式不同,它的组成也不同,目前具有代表性的三种类型为

(1) 平台形状为三角形——由三个立柱,三个浮箱,三角形上层平台以及若干撑杆所组成(如图 1-5);

(2) 平台形状为五角形——由五个立柱,五个浮箱,五角形上层平台以及若干撑杆所组成(如图 1-6);

(3) 平形状为矩形——由二个下浮体,4至8个立柱,矩形上层平台以及若干撑杆所组成(如图 1-7)。

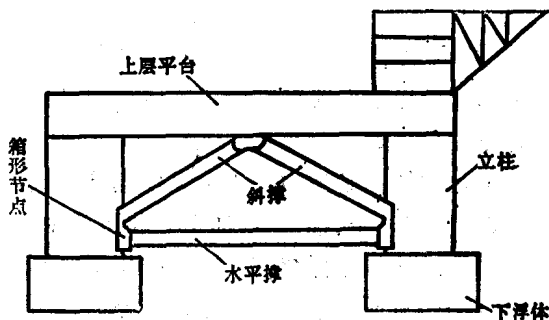


图1-18 半潜式平台结构组成示意图

三角形平台与其它平台相比,结构形状简单、重量轻,但因其立柱下采用靴式,结构复杂,撑杆较多,节点建造较难,而五角形平台结构更为复杂,重量也会增加,从施工建造考虑,它们也都比矩形平台困难。五角形平台的优点是稳性好,而且波浪不论来自何方,结构受到的载荷相差不大。

目前建造较多的还是矩形平台。

1. 上层平台结构

上层平台布置着全部钻井机械,平台操作设备,物资贮备和生活设施,上层平台承受的甲板载荷常在 3000~6000t 之间,一般上层平台是由平台甲板、围壁和若干纵横仓壁所组成的空间箱形结构。根据布置和使用要求,它可分为若干层,如上甲板、中间甲板、主甲板等。由于半潜式平台在海上工作的危险性,要求上层平台为水密或具有一定的水密性,以便在万一失事中平台具有更大的安全性。上层平台可以是一个整体的箱形结构,也可以是由若干纵横箱形结构单元组合而成的组合体,如“田”、“井”字形,“△”形。上层平台采用箱形结构可以获得较大的抗扭刚度,但也有些半潜式平台为了减轻上层平台的重量,只设一层主甲板,而用立柱之间的强桁材,或利用与上层建筑形成的箱形结构来支承甲板。不过这种上层平台结构的材料一般都必须采用高强度钢。

2. 浮箱或下浮体结构

(1) 浮箱结构: 它是一个水密的圆台,设置在立柱下面,彼此互不相连,三角形半潜