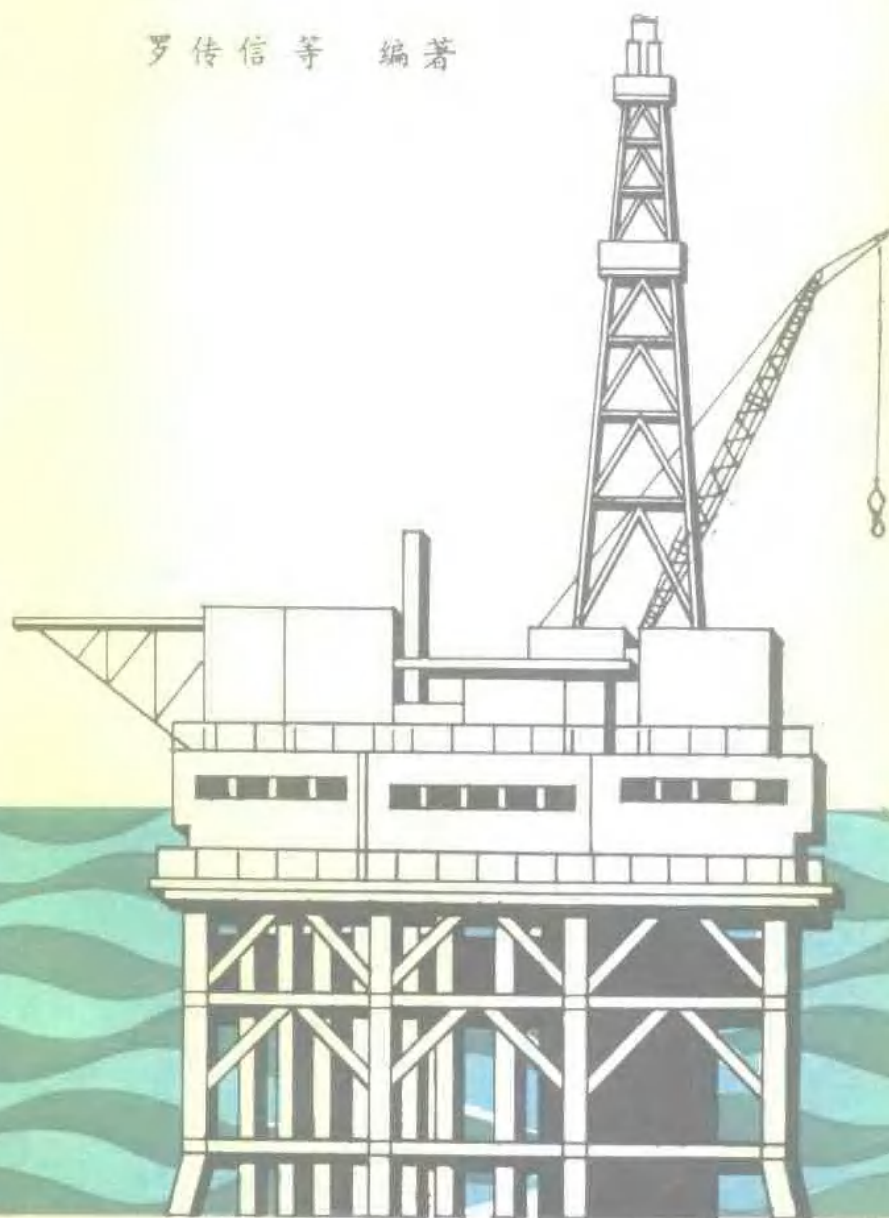


海洋桩基平台

罗传信等 编著



天津大学出版社

P75
L94

425305

海洋桩基平台

罗传信 等 编著



天津大学出版社

田家康

内 容 提 要

本书是有关海洋桩基平台结构的编著, 主要论述海洋桩基平台的结构分析方法。全书共八章, 分别介绍国内外海洋桩基平台发展概况与平台总体规划, 平台载荷与载荷计算方法, 桩基计算的基本假定与计算方法, 高桩承台式平台基桩内力分析方法, 导管架型平台的静力与动力分析方法, 管结点的应力与设计方法, 管形构件的稳定性计算等。

本书可供高等学校海洋工程专业本科生使用, 也可作为其他建筑结构类专业学生的参考书, 并可供从事海洋平台工程的设计、研究人员参考。

DU61/3

海洋桩基平台

吴传信等 编著

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 11⁵/₈ 字数: 280千字

1988年7月第一版

1988年7月第一次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5618-0035-5

TV·1

定价: 2.00元

前 言

我国是海洋石油蕴藏极为丰富的国家。20世纪60年代开始在渤海海域钻井勘探，继而在渤海、黄海、东海及南海等各海域全面开展了海底石油勘探。目前渤海埕北油田已进入工业性开发阶段，南海部分海域也将进入开发阶段。

在海洋石油、天然气的开发阶段，必需设置海洋固定平台，以便提供钻多口生产井并支持油井进行石油生产的场地、储油的场地、油气处理的场地以及生活的场地。按用途，平台可分为钻井采油平台、储油平台、油气处理平台、生活平台等。国内外实践表明，海洋桩基平台是应用最广泛的一种结构型式。

海洋桩基平台设置在无掩蔽的海域，承受着暴风、巨浪、海冰、地震等恶劣海洋环境的侵袭。要求结构本身具有足够的强度和稳定性。同时，由于桩基平台结构的特殊性而产生许多值得研究的问题。诸如桩的水平变位与土反力的非线性性质给结构分析带来的复杂性；当水深较大时波浪周期与平台结构基本周期接近，进行平台结构动力分析的必要性；管结点应力集中是平台破坏的重要原因。在设计中应予足够的重视；以及不容忽视的管形杆件的稳定性等等。这些问题成为探索我国各海域桩基平台的合理型式、研究桩基平台结构设计理论与方法的重要内容。

为适应我国海洋石油工业的发展，天津大学于1971年设置了海洋工程专业。我们结合对海洋桩基平台的研究开设了海洋桩基平台课程，先后编写了三个版本的讲义。此次在原讲义的基础上，吸取国内外近年的研究成果重新编写，形成本书。

本书由天津大学罗传信主编，并由罗传信编写第四、八章，王柳君编写第一、三章，唐红英编写第二、五、七章，边启光编写第六章。

海洋桩基平台无论在设计理论上或在应用实践上都还存在许多尚待解决的问题，本书除了力求反映国内外水平外，对某些需要进一步探讨的问题，也提出了作者的看法。由于我们从事海洋桩基平台的研究时间尚短，业务水平有限，书中必有不当甚至错误之处，恳切地希望读者批评指正。

编者 1986年9月

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 国外海洋桩基平台的发展概况	(1)
§ 1.2 我国海洋桩基平台的发展概况	(9)
§ 1.3 平台设计条件与总体规划	(13)
第二章 设计载荷	(18)
§ 2.1 设计载荷及其组合	(18)
§ 2.2 环境载荷	(19)
§ 2.3 使用载荷	(41)
§ 2.4 施工载荷	(44)
第三章 桩基计算	(46)
§ 3.1 概述	(46)
§ 3.2 桩的轴向承载力	(46)
§ 3.3 桩对轴向载荷的弹性反应	(48)
§ 3.4 水平载荷作用下桩的变位性质	(49)
§ 3.5 土反力模量随深度线性增长的单桩变位与内力计算	(52)
§ 3.6 水平承载桩的非线性分析	(64)
第四章 高桩承台式平台基桩内力分析	(67)
§ 4.1 概述	(67)
§ 4.2 基本假定与坐标系统	(67)
§ 4.3 局部坐标系下桩顶刚度矩阵	(70)
§ 4.4 整体坐标系下桩顶载荷与桩顶位移的关系	(74)
§ 4.5 承台与桩顶之间位移、载荷转换矩阵	(75)
§ 4.6 承台位移与桩顶固端力的计算	(76)
§ 4.7 基桩对称性的利用	(81)
§ 4.8 基桩受水平载荷时的内力分析	(82)
第五章 桩基导管架型平台的静力分析	(84)
§ 5.1 概述	(84)
§ 5.2 结构计算模型	(84)
§ 5.3 基桩支座的概念	(86)
§ 5.4 空间杆件的刚度矩阵	(88)

§ 5.5	平台的变位与内力计算	(96)
§ 5.6	平台构件强度校核	(101)
§ 5.7	平台结构静力分析示例	(103)
第六章	桩基平台的动力分析	(114)
§ 6.1	概述	(114)
§ 6.2	计算模型	(115)
§ 6.3	运动方程	(118)
§ 6.4	自振特性计算	(126)
§ 6.5	平台对规则波的响应分析	(130)
§ 6.6	平台对不规则波的响应分析	(134)
§ 6.7	平台地震响应分析的历时法	(136)
§ 6.8	平台地震响应分析的响应谱法	(139)
第七章	管结点的应力与设计	(142)
§ 7.1	概述	(142)
§ 7.2	管结点的构造	(145)
§ 7.3	冲剪应力法校核管结点强度	(146)
§ 7.4	管结点应力计算与设计的其他方法	(154)
§ 7.5	管结点的疲劳分析	(162)
第八章	管形构件的稳定性	(165)
§ 8.1	概述	(165)
§ 8.2	杆的横向屈曲	(165)
§ 8.3	在均匀轴向压缩下圆筒壳的对称屈曲	(167)
§ 8.4	均布外压下圆筒壳的屈曲	(170)
§ 8.5	管形构件稳定性计算	(173)
参考文献		(177)

第一章 概 论

§ 1.1 国外海洋桩基平台的发展概况

随着大陆架浅海石油的勘探和开发技术的进步,世界石油开采的重点已由陆地向大陆架转移。全世界大陆架的总面积约2800万平方公里。据一些资料报导:大陆架目前已有78%以上的地方进行过勘探。到2000年,40%~50%的石油将在大陆架范围内开采。最近几年,国外海上勘探活动又在向水深大于200m的深海发展,海洋桩基钻采平台已在超过300m水深的海域作业。

长期以来,海洋桩基平台是世界海洋石油生产中应用最广泛的一种结构,它几乎遍布各个有油的海域。以下根据各海域的开发特点,分别叙述桩基平台的概况。

委内瑞拉的马拉开波海,水深30m,波高1.8~2.4m,风速35.7m/s,海水有高度的腐蚀性。根据这些特点,在马拉开波海选择了图1-1所示的平台型式。承台尺寸为9.1m×9.1m,打入8根外径为137cm、壁厚12.7cm的空心预应力钢筋混凝土桩,用后张法施加预应力。桩分段浇注,每段长4.9m。8根桩分设在平台的四角,每角打一直桩和一斜桩,用现场浇注的混凝土桩帽把它们连结在一起。平台分设两层甲板,下甲板可用钢架或预制的钢筋混凝土构件,直接放在桩帽上。上甲板悬出约7.9m,上面设置绞车房。这种平台是按支持单个油井设计的。钻井时平台上仅设置井架、绞车及一些主要设备,而大多数重型设备、钻井供应品和住房,都设在附属船上,钻井完毕,井架和上甲板移走,下甲板留作采油平台,以支持井管和防喷器。这种平台适用于海洋环境比较平静的海域,因为是用混凝土材料制成,特别适用于有腐蚀性的水域。

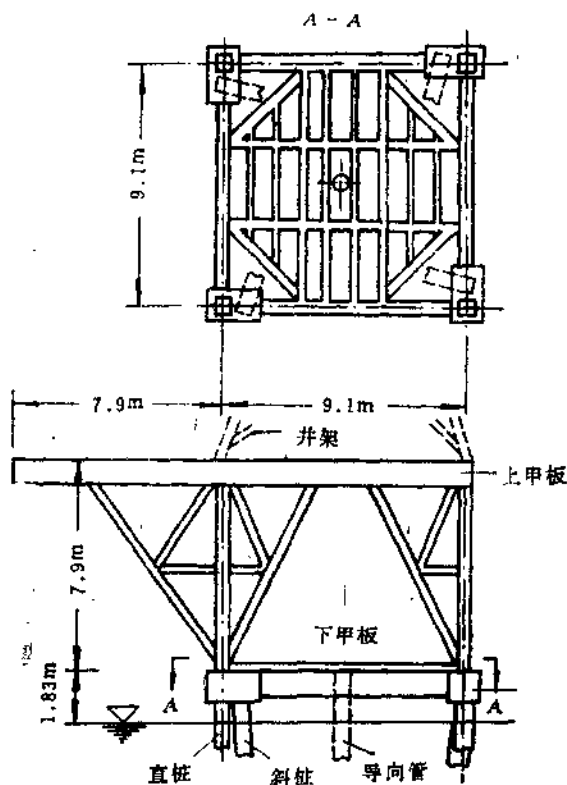


图 1-1 马拉开波海的承台型平台

苏联里海的浅水油田,多采用装配式平台结构。如图1-2所示,平台由3个有6只底脚的构件A、一个有4只底脚的构件B、4个中间构件C、步行桥梁D以及2个停泊码头E

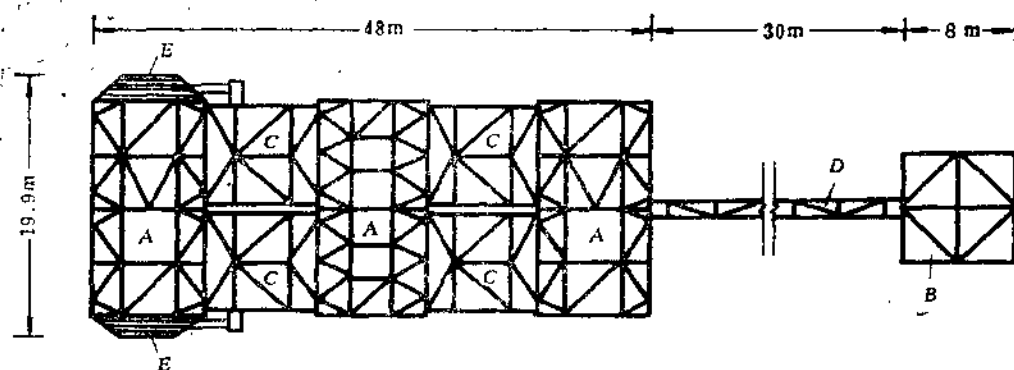


图 1-2 里海的装配式平台

组成。

图 1-3 所示的平台基础构件为具有 6 只底脚的构件 A。构件具有两层十字拉筋，支柱是管形构件，由两个套筒管构成，内管用特殊的管靴 1 固定在海底。由于内管的伸缩量可达一米，这种结构可以不受海底起伏影响，使整个平台保持水平。

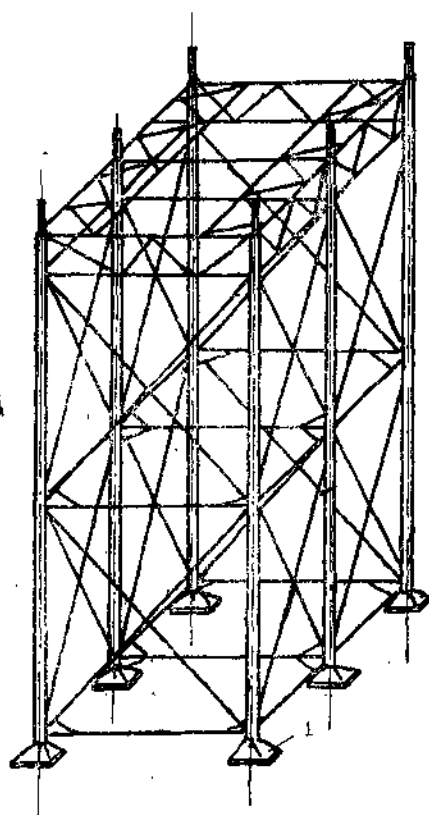


图 1-3 平台基础构件

和采用新设备，桩的外径增加到 76cm，桩数相应减少。象 1955 年在哥兰德岛 47 段油田，在水深 30m 处建造的平台，仅由三个导管架组成，每个导管架只打入 8 根桩，提供甲板面积为 $67\text{m} \times 32\text{m}$ ，是当时建在墨西哥湾的大型平台之一，所有甲板与导管架都是用 250t 起重船安装的。

安装的时候，首先将 3 个构件 A 设置好，彼此之间保持 8m 的距离，然后用 4 个长宽各为 8m 的中间构件 C 与之相连。

这种结构的特点是：所有构件几乎都是预制的，安装时受天气的影响小，只需将预制好的构件装在起重船上，在风浪小时，运到指定地点进行装配，几天即可完成。

墨西哥湾海域桩基平台的发展具有代表性。墨西哥湾水深、风大、浪高，百年一遇的最大波高可达 27m 左右，最大风速可达 $56.3 \sim 60.4\text{m/s}$ ，特别适用导管架型平台。目前已有数百座现代化的导管架平台建在墨西哥湾，新的平台仍不断安装。

墨西哥湾可以说是近海技术的摇篮。早在 1937 年到 1940 年期间，就采用木平台结构进行海上钻井。1947 年在沃密林 71 地段 6m 水深处第一个采用钢质导管架型平台。随后又在哥兰德岛 18 段水深约 15m 处建成一座两层的导管架平台，两层甲板面积总计 3600m^2 ，由 100 根 25.4cm H 型钢桩支承，桩通过 25 个 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 的导管架打下。这种初期的平台，由于受当时钢管制造技术水平及起重设备能力所限，支承平台的桩径和长度不能很大，因而平台所需的桩数相当多。50 年代中期，随着技术的提高

50年代至60年代,开发油田的水深大大增加。为减小平台尺寸,大部分使用带辅助船的小平台,如图1-4所示。在平台上仅放置井架、绞车、转盘、振动筛、动力装置、日常用水、燃料、辅助泥浆池或容量较小的泥浆池。而将大型泥浆池、泥浆泵、泥浆槽、储备干水泥及化学处理剂的仓库、固井车、测井车和工作人员住室等放在驳船上。这种结构抵御恶劣天气的能力较弱,一遇恶劣天气,辅助船就需驶离平台,并停止钻井作业。70年代以来,全装备型平台得到了很大的发展。随着电子计算机在平台分析中的广泛应用以及大型起重船(最大起重量3000t),大型运输驳船(最大载重量为4万吨)、大型打桩锤(冲击能量达100t·m以上)的采用,海洋桩基平台无论在设计和建造技术上,还是在适用水深上,都有较大的变化和发展。图1-5示出从1947年至1978年桩基平台发展的概况。

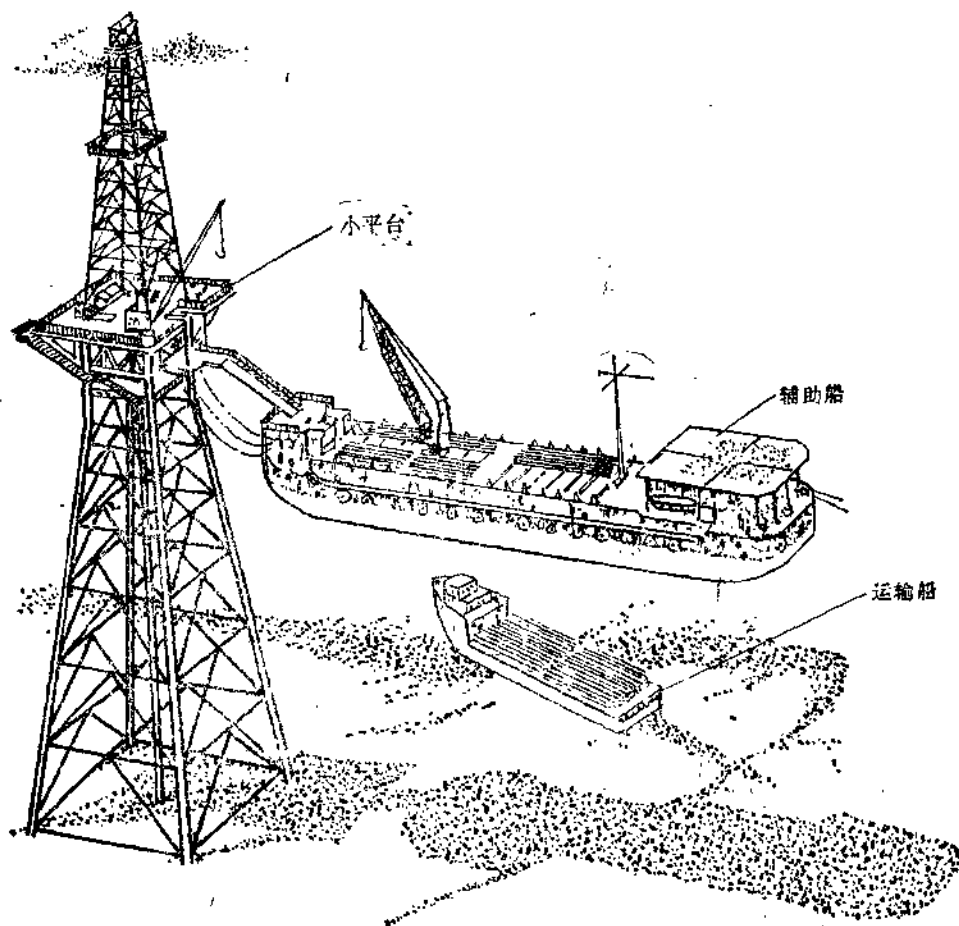


图 1-4 带辅助船的小平台

下面介绍近年来在墨西哥湾建造的两座大型平台的情况。1978年在墨西哥湾密西西比河入海口以南24km处,安装了一座“Cognac”钻采平台,如图1-6(●)所示。该平台全高385.6m,被认为是当今世界最高的。所处海域水深312m,导管架重33000t,腿柱10根,直径为213cm,裙桩24根,直径为213cm,钻井数为62口。它是以极端的飓风载荷控制设计。建造这一平台采用了先进的海上安装技术,导管架分三段建造,下水后由驳船运至现场,采用声学定位系统,并用电子计算机控制整个安装过程。安装时的位置资料都在图上显示出

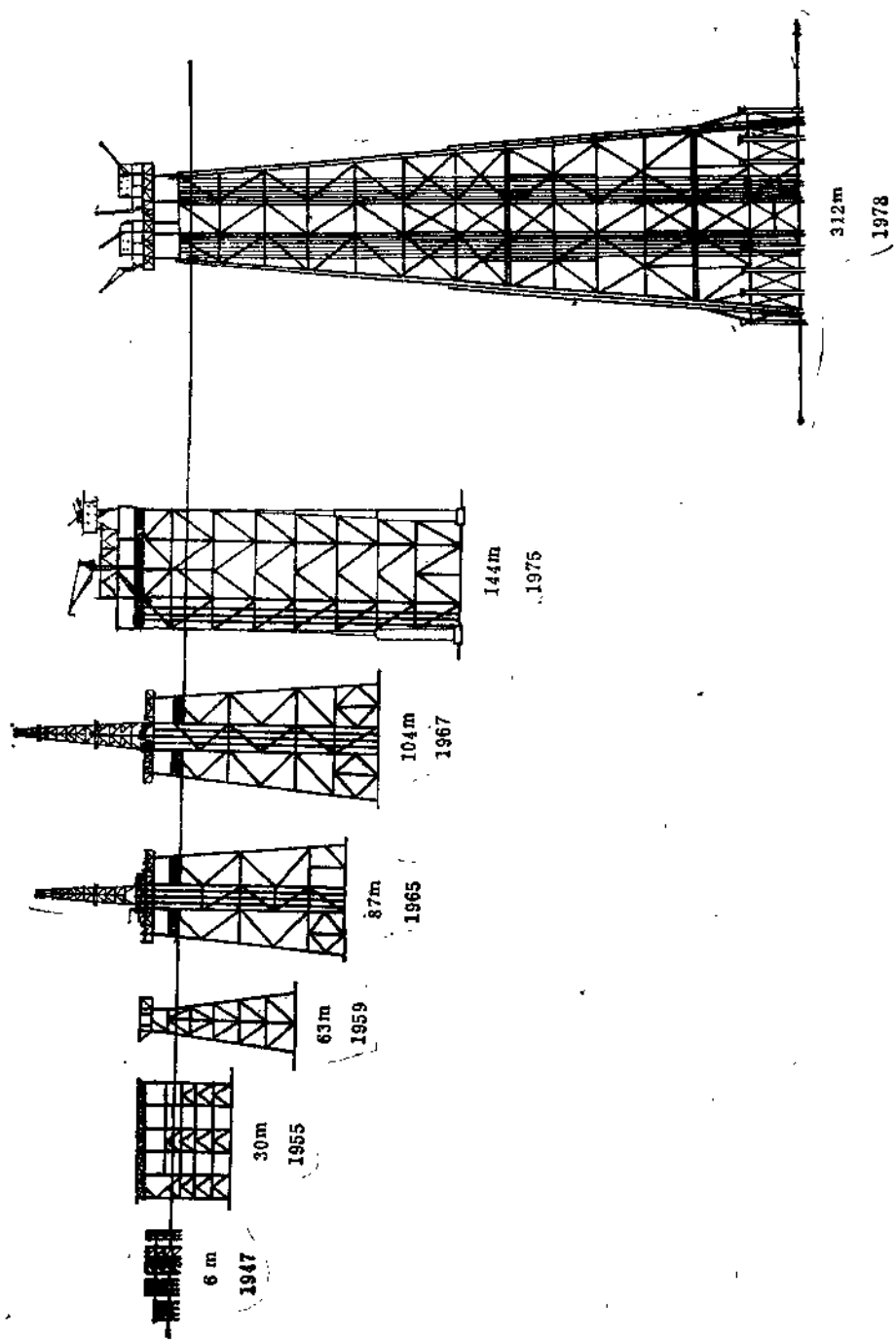


图 1-5 海洋柱基平台的发展概况

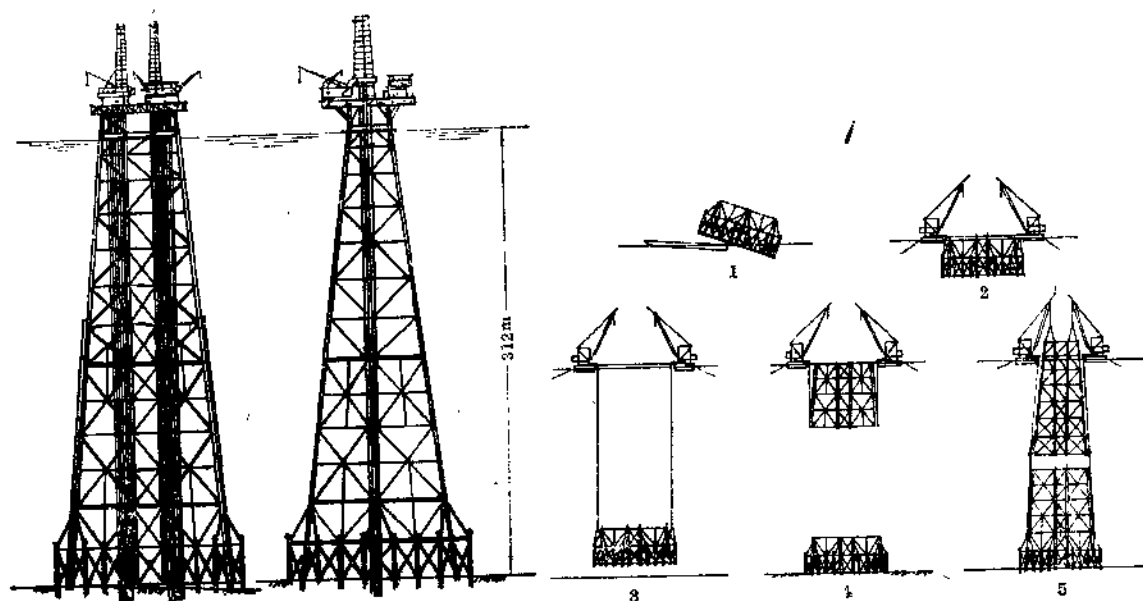


图 1-6 Cognac 平台
(a) 结构示意图 (b) 安装过程

来，便于调整。导管架各分段采用专用连接卡把腿柱暂时连接在一起，最下段导管架的高度，是由风暴出现在桩打下之前导管架段不致倾覆的条件决定的。一旦下段导管架就位完毕，立即用水下桩锤打桩。然后紧接着安装中段和上段导管架，导管架的腿柱内下入直径为183cm、长度差不多与腿柱长度相等的管柱，腿柱与管柱之间的环形空间灌浆固结。图1-6(b)描述了安装过程。

1981年在墨西哥湾又建成水深285m的“Cerveza”平台，如图1-7(a)所示。该平台导管架重23000t，主桩8根，直径为152cm，裙桩16根，直径为183cm，设计钻井数为40口。导管架不分段而是整体制造，这是海上平台在技术方面的最新成就，是迄今世界上制造的最大整体型海上平台。该平台的成功经验表明：深水中建造整体式导管架在技术上是可行的，同时也是经济的。这个平台在构造简化、成本降低、安装迅速上代表了海洋桩基平台发展的新方向。该平台是用目前世界上最大载重量为4万吨的“莫脱马克650号”驳船运往现场的，其安装过程见图1-7(b)。

北海海域按纬度可分为三个区域：北纬52~54.5°为南部，54.5~57°为中部，57°以上为北部。北海南部油田，一直采用一般的导管架型结构。而北海北部油田所在海域海洋环境比墨西哥湾明显恶劣，过去为墨西哥湾研制的那种平台，在北海北部不适用。北海北部海域的波高与潮流都比墨西哥湾大很多，海水的腐蚀性也比墨西哥湾严重，北海北部与墨西哥湾两者典型海洋环境对比如表1-1所示。

1974年在北海北部的福蒂斯油田建造的一座平台可作为北海桩基平台结构类型的代表，如图1-8所示。平台位于水深128m处，百年一遇的风暴波高为28.7m，风速为58m/s。风和波浪作用于平台的总水平力达10000t。平台建造处地基表层又有16m厚的淤泥和软粘土层，除环境条件造成的载荷外，平台基础还要承受57000t的结构自重、备品和设备重量。环境对结构的要求比较严酷。为承担巨大水平载荷所产生的倾覆力矩，导管架的所有桩都集中

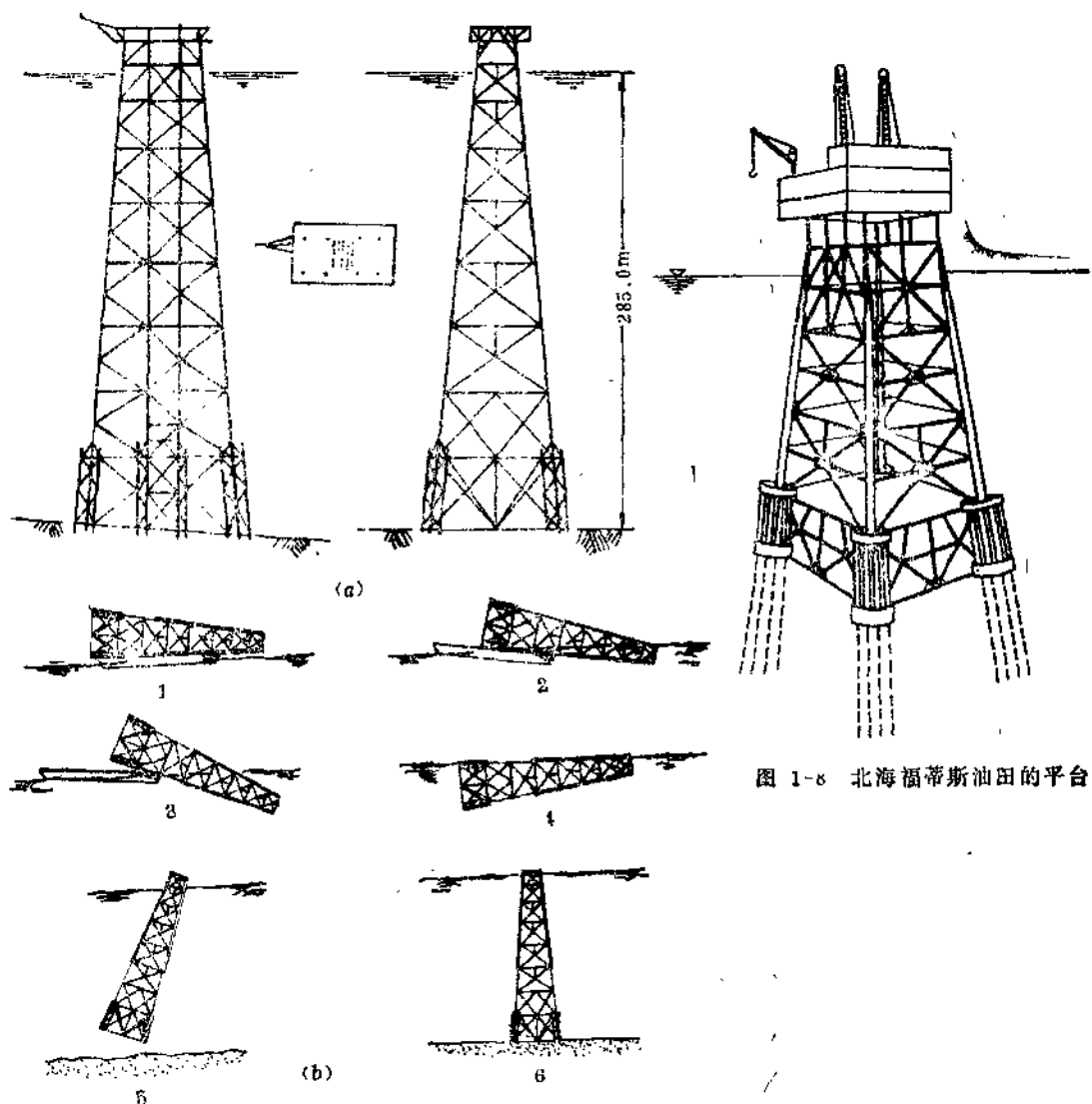


图 1-8 北海福蒂斯油田的平台

图 1-7 Curveza 平台 (a)结构示意图 (b)安装过程

表 1-1

海洋环境	北海北部	墨西哥湾
百年一遇波浪 (波高/波周期)	31m/14~18s	22m/12~15s
潮流	表面处1.5m/s 海底以上0.75m/s	稳定流 0.26m/s
风	海平面以上10m, 10分钟 的设计风速为41m/s	持续风速 45m/s
一年中夏季风暴状态 (最大波高/周期)	14m/9~11s	长周期小波, 不象北海猛烈
腐蚀性—裸钢 初值	160mA/m ²	100mA/m ²
阴极防护最小 中值	120mA/m ²	80mA/m ²
设计电流密度 终值	100mA/m ²	70mA/m ²

在四个角上，每角除一根大直径的腿柱外，在腿柱周围又环绕打入数根桩，以增大抗倾覆的能力。

处于亚北极地区的阿拉斯加库克湾的平台结构，具有明显的特点：平台必须抵抗各种形式的冰的作用。因此平台结构就不宜采用暴露于冰区的具有许多支撑的导管架型结构，而需采用腿柱式结构，支承甲板靠大直径腿柱。这种结构从1964年以来，已建成了十几座，成功地经受了严重的冰情。

在阿拉斯加库克湾，随潮流运动的大片浮冰厚达107cm，抗压强度为 2.1MN/m^2 ，冰载荷的作用范围可随高达9m多的潮位升降。冰载荷比风暴、波浪和潮流产生的载荷更恶劣。图1-9所示的钻井平台是这种结构的一个实例。支承甲板靠四个大直径的腿柱，每根腿柱内打入8~10根桩。为避免油井导管与冰接触，常将其放在腿柱内，利用基础桩作为油井的表层套管，桩与两个同心圆筒之间的空间灌注砂浆。

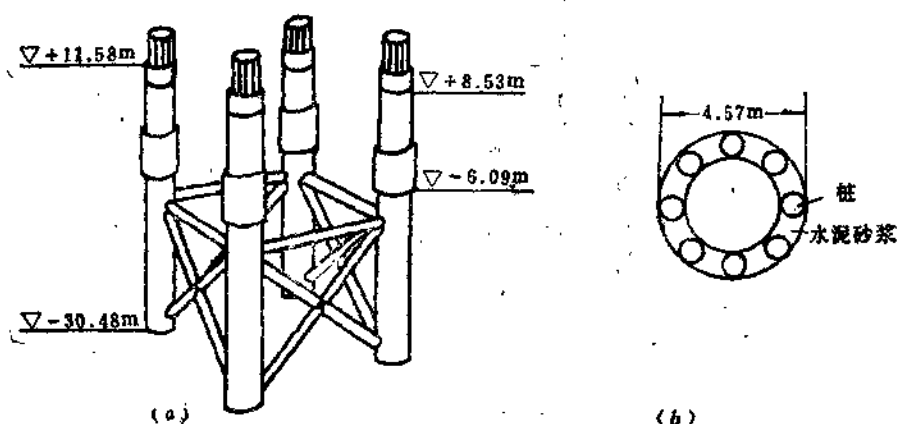


图 1-9 库克湾腿柱式钻井平台

(a) 平台的下部结构 (b) 平台腿柱横截面

除四个脚柱的平台外，库克湾还建造了独腿平台，如图1-10所示。该平台所处水深为19.8m。采用的是沉箱结构，中间主腿的直径为8.69m，靠水平拉筋和斜撑与二沉箱相连，沉箱的纵向长度为61m，直径约为6m左右，端部直径约为6.5m，斜撑和水平拉筋的直径分别为4.5m和2.3m，独腿的上部用大型的箱型变截面梁支撑上部结构，独腿内设隔水导管。平台的固定，主要通过沉箱四角的水下桩，每角8根，共计32根。海上施工采用浮运法拖至井位，下沉就位后，使用导向小框架打水桩，打完后，拆除该小框架。上部的成块组件，座在箱型梁上，组件采用桁架式结构。组件顶部拼装成的甲板面积为 $33\text{m} \times 33\text{m}$ ，平台总用钢量为5636t。平台共打32口井。

最后应当指出的是，国外海洋桩基平台目前最大高度为385.6m，由于桩基平台本身结构的特点，导管具有一定的斜度。随着水深的增加，用钢量将增加很多，建造起来亦更趋复杂。因而人们对固定平台提出了两种设想，一种是牵索塔式平台（见图1-11），它是由一等截面的支承塔架结构和数根牵索组成，牵索系在海底的重块上，又从重块系至锚桩上，构成一双重的刚性锚系统，平台靠牵索保持直立，在操作载荷作用下，重块搁置在海底，在恶劣的风暴期间，重块时而升起离开海底，这种运动容许塔架摇摆，以缓冲作用在它上面的巨大载荷，不致使牵索超载。这类平台用于水深610m处。

另一种是张力腿式平台（见图1-12），它的上部酷似半潜式平台，设计成具有很大的浮力

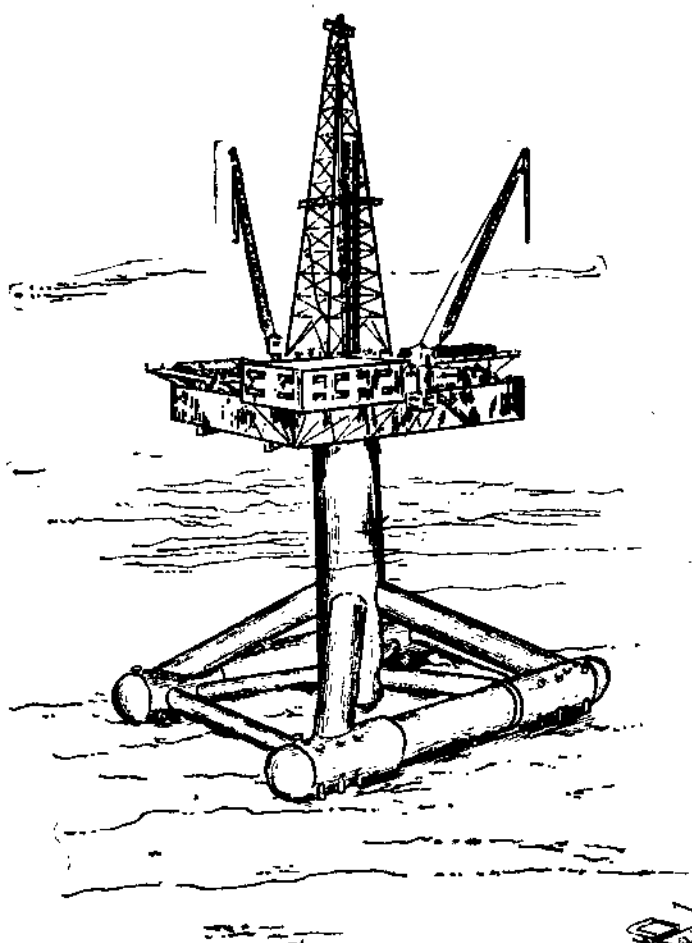


图 1-10 独腿抗冰平台

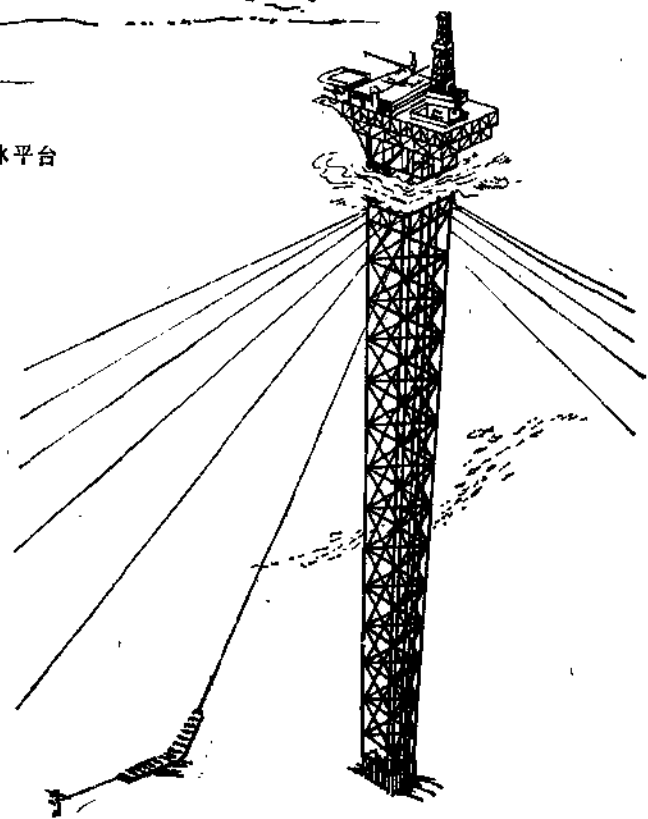


图 1-11 索塔式平台

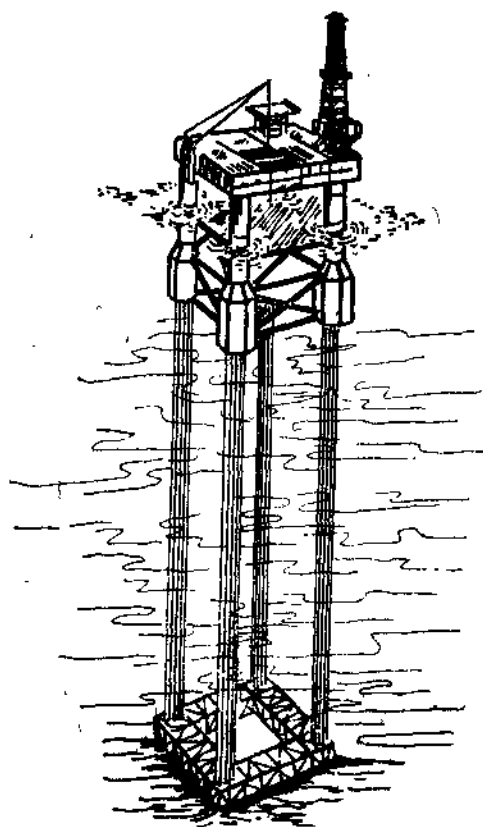


图 1-12 张力腿式平台

的腿柱与浮箱，利用垂直构件把它锚固在置于海底的基础上，并使垂直构件处于张拉状态。所有垂向载荷由潜入水中的腿柱与浮箱产生的浮力相平衡。在波浪、风、海流作用下，平台恢复力增加，其侧向漂移便受到限制。这类平台用于水深913m处。

§ 1.2 我国海洋桩基平台的发展概况

海洋石油工业在我国起步较晚。从1966年在渤海湾水深6.5m处建造的第一座钢质桩基平台到现在，有十几座桩基导管架型平台先后建成在渤海湾进行钻井和采油工作。除了早期曾有一个平台被冰推倒以外，这些平台都已经受了风浪、地震以及特大冰情的考验。

回顾我国海洋桩基平台发展的过程，大致可分为以下几个阶段：

(1) 从分离式到整体式

早期建造的平台将钻井、设备和生活平台分开成为两个或三个单体式结构。图1-13所示的平台分成两个单体。整个平台由四个独立的导管架组成，共打入24根 $\phi 526 \times 6$ 的螺纹钢桩，考虑强度不够，又在管外包焊了一层10mm厚的钢板。钻井平台的两个导管架尺寸为 $7 \times 7.5 \times 15\text{m}$ ，因其负荷较重，故12根桩采用爆扩桩，大头直径为1.5m。设备平台的两个导管架尺寸为 $5 \times 7 \times 18\text{m}$ 。这种结构，由于对环境载荷的恶劣程度估计不足，整体性又差，一旦遇到大的冰情，就有被推倒的危险。1969年出现了50年一遇的特大冰情，有一座三个单体式结构的平台被冰推倒。这促使设计者对冰的观测、冰力估算，冰对结构的作用以及合理的

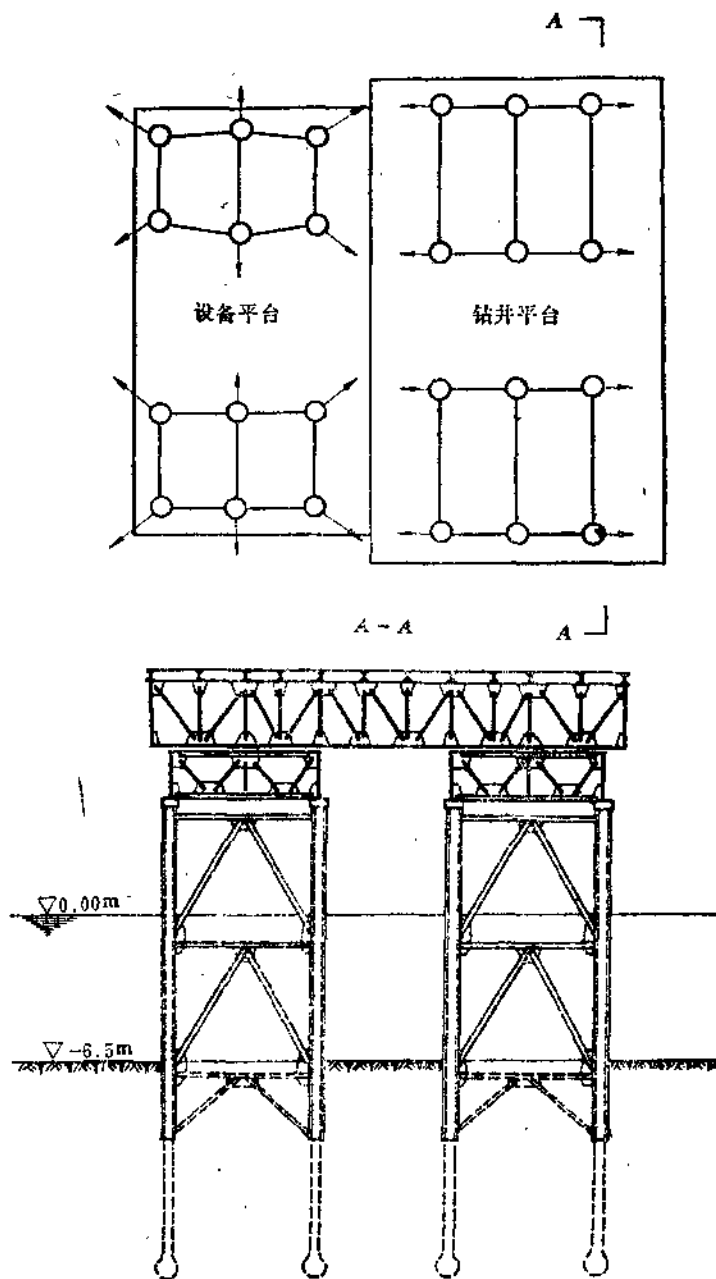
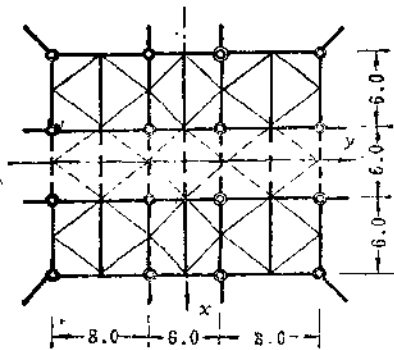


图 1-13 分离式平台

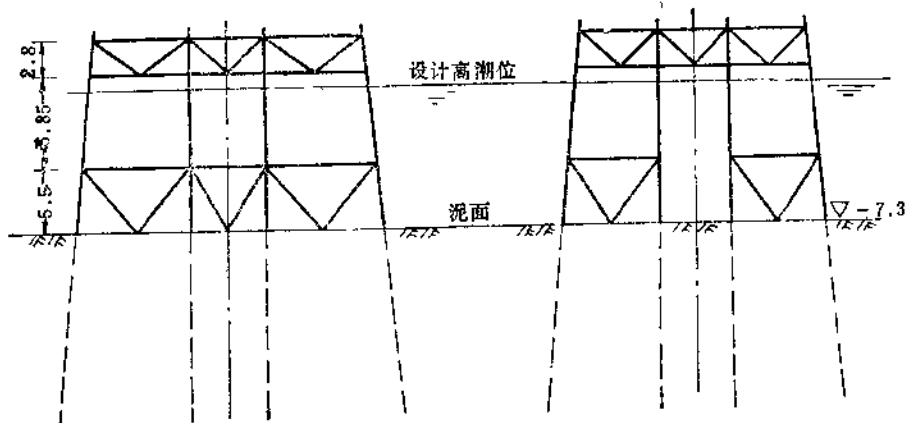
结构型式等进行了认真的研究，并采取了相应措施。如结构设计以冰作为控制载荷，结构布置上取消了潮差段的联杆以防止海冰冲击、挤压，平台采用多层整体式结构布置等，保证了平台的使用安全。整体式结构如图1-14所示。

(2) 从固定式到搬迁式

渤海油田开发初期，主要使用的是固定式桩基钻井平台，由于处在勘探阶段，不可能每口探井都找得到具有开发价值的油、气田。为节省钢材，高效率利用平台，采用了可搬迁的



(a)

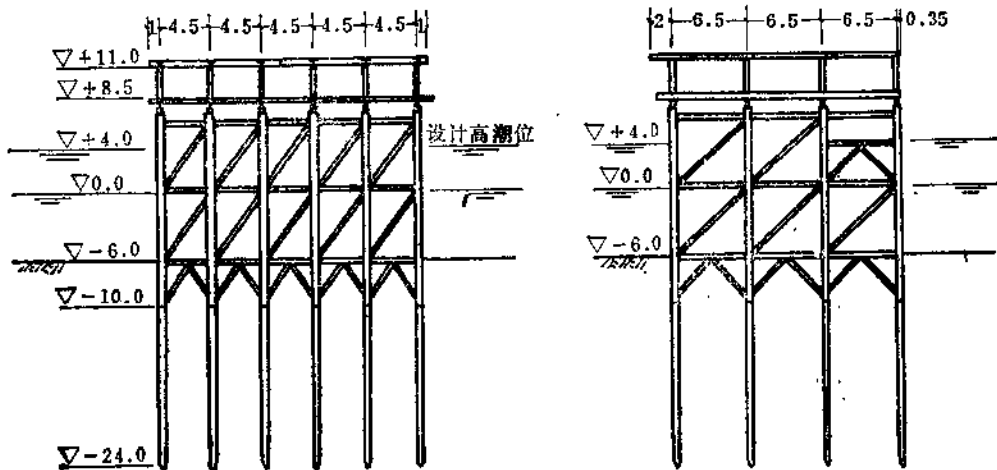


(b)

图 1-14 整体式平台

(c)

桩基平台，如图1-15所示。为便于拔桩，平台全部桩均采用直桩。在导管与桩之间的环形空间注入硫磺砂浆，以代替水泥砂浆，搬迁时通电加热，硫磺熔化后即可搬迁。这类平台设计时不考虑抗冰，由于全部是直桩，对平台整体稳定性不利，摇晃较大，不能用作永久性采油平台。



(a)

图 1-15 搬迁式桩基平台

(b)