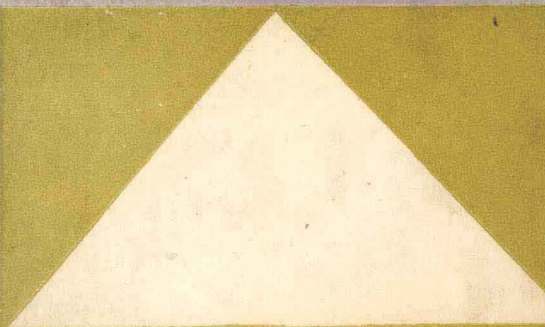


〔美〕托马斯·道森 著

离岸结构工程



海洋出版社

离岸结构工程

[美] 托马斯·道森 著

张圣堃 韩继文 李龙渊 译

海洋出版社

1987年·北京

内 容 简 介

本文是固定式离岸平台结构分析的一本专著。讨论了可能作用在离岸结构物上的环境载荷，诸如风力、波浪力，以及流、水压、浮冰和泥土滑移而产生的载荷。讨论了钢质构架和混凝土结构的静力分析和动力分析，文中涉及土壤与结构的耦合响应的近似分析、波浪力引起的时效节点载荷、不规则随机波上动力响应和受地震载荷的响应等专题。

本书内容丰富，实例较多，可作为海洋工程、土木工程和机械工程专业的大学生教材，也适合于从事海洋工程结构设计的专业人员参考使用。

OFFSHORE STRUCTURAL ENGINEERING
THOMAS H. DAWSON
1983 BY PRENTICE-HALL, INC

责任编辑：赵世青

离 岸 结 构 工 程

[美] 托马斯·道森 著

张圣堃 韩继文 李龙渊 译

*

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

海洋出版社发行处发行 建华印刷厂印刷

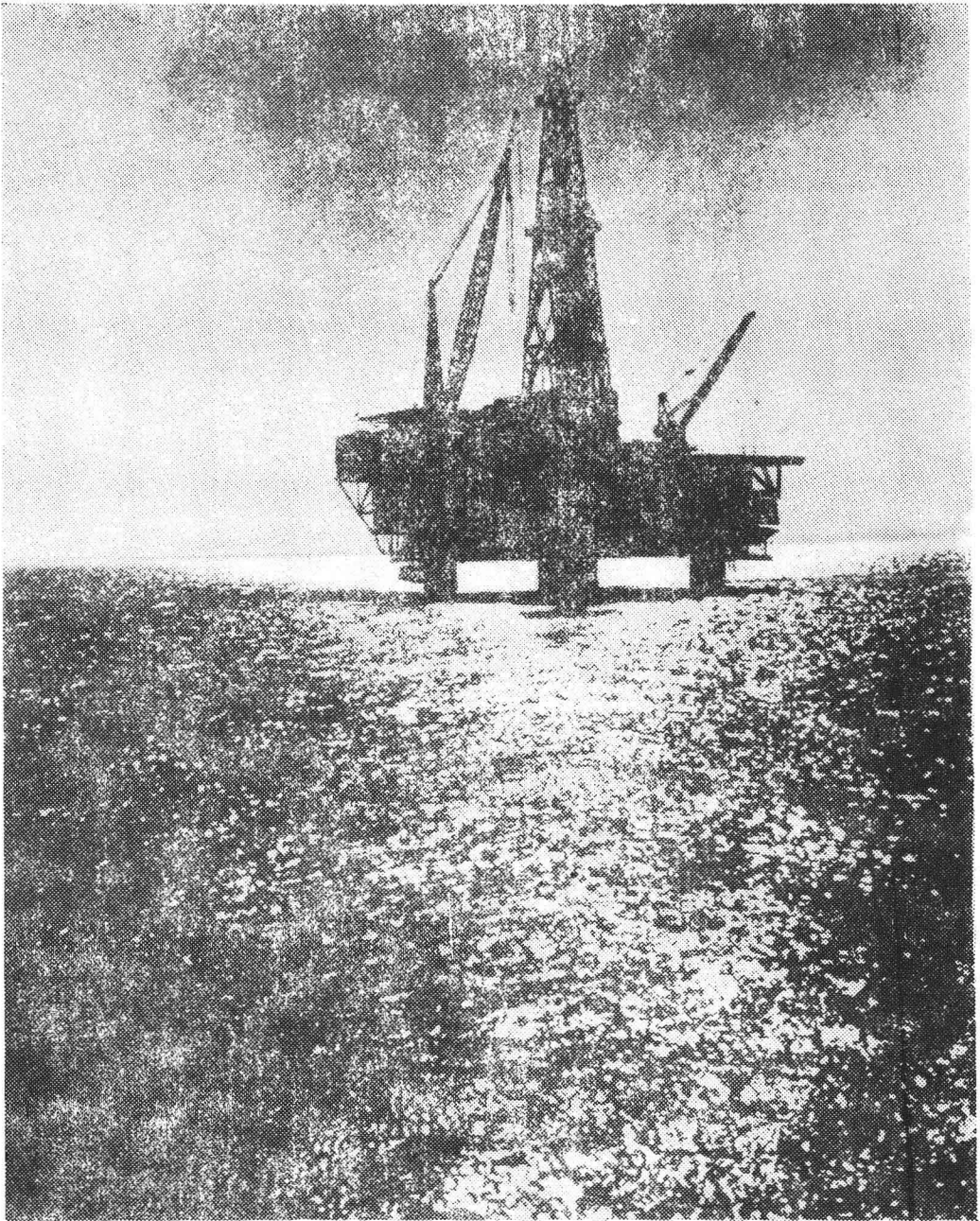
开本：787×1092 1/16 印张：14³/₄ 字数：330千字

1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷

印数：1—300

*

ISBN 7-5027-0032-3/TV·2 定价：11.00元



阿拉斯加库克湾中海洋平台的侧影（承大西洋Richfield公司和美国石油研究学会的许可）

译 序

离岸平台是进行海上工程作业的一种海洋工程结构物。它分为固定式和移动式两大类。固定式又可分为导管架式、抗冰式、重力式和深水式。

本书是关于固定式离岸平台结构分析的专著。书中包括风力、波浪力以及流、水压、浮冰和泥土滑移而产生的各类环境载荷；钢结构、混凝土结构的静力分析和动力分析。涉及离岸工程结构的各个专题，有基本理论介绍，也有实例和习题，内容丰富而实用。可作为海洋工程、土木工程和机械工程专业的教材，不失为海洋工程专业人员的良好参考书。我们不揣冒昧把本书翻译介绍给我国读者，意在引起我国广大海洋工程技术人员兴趣，也希望能为我国新兴的海洋工程事业有所裨益。

本书的第一、六章和附录由张圣堃翻译，第二、三章由韩继文翻译，第四、五章由李龙渊翻译。全书由施德培和黄根余审校，李龙渊对全书作了统稿。译校中对若干错误之处作了加注订正，其余笔误或印刷错误也作了改正。书中全部采用英制单位，并在本书最后附以英制与公制的换算表。

译 者

于 上 海

序

本书旨在对固定式离岸平台的结构工程作一介绍。它不仅涉及到基本的结构理论，而且还涉及到如下各个方面，如波浪载荷、桩脚支承和动力响应以及那些对所讨论的题材来说特别重要的内容。

本书的介绍完全立足于大学生的基础工程力学课程。同样地，数学的水准也不超过一般微积分运算和微分方程课程的内容。通贯全书，理论讨论之后都紧接有数值例子，以表明具体细节和说明适当的应用。

第一章为总的介绍。紧接着在第二章中就讨论了桁架和刚架的结构理论。在叙述这个理论时，我发现应用现代矩阵方法和强调对复杂问题的计算机求解是很有益的。这种方法具有十分明显的优点，以简洁的方式推导理论，并能把这一理论直接应用到实际问题中，而不必进一步学习近似求解技术。为了便于那些不熟悉矩阵代数的读者，在附录里给出了对这一专题的简要而充分的讨论。

之后，第三章讨论了可能作用在离岸结构物上的环境载荷。这个专题包括风力、波浪力和它们的工程描述方法，以及流、水压力、浮冰和泥土滑移而产生的载荷。

第四章则综合了二、三两章的内容，讨论了固定式离岸结构物的静力分析。除了钢质刚架结构外，也顾及了混凝土结构。为了更好地承受环境载荷，混凝土结构是预应力的或钢筋加强的。另一方面，该章对一些基本的结构动力学作了讨论，这些内容可用来评价对一特定设计作静力分析的可行性。

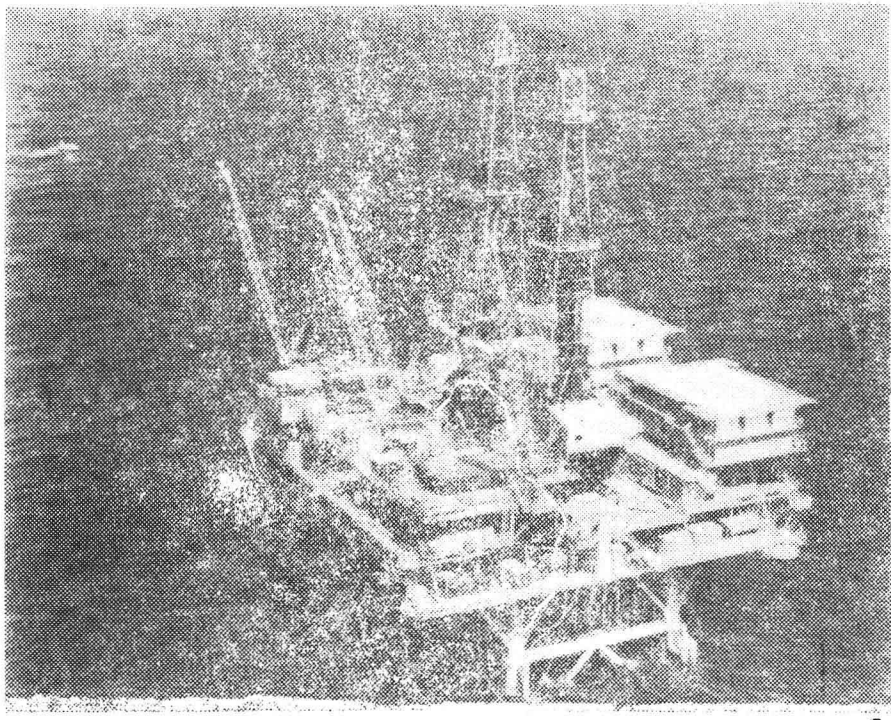
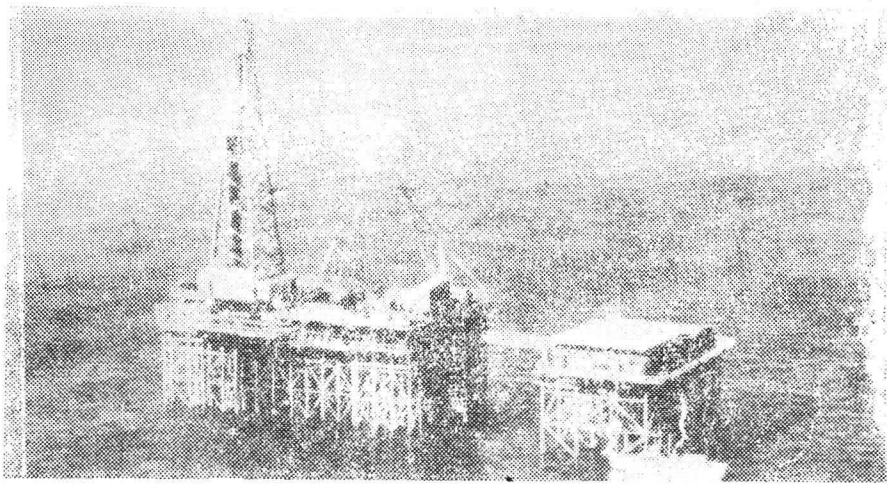
第五章涉及到离岸结构物基础的分析，对土力学作了简要的介绍，并概述了桩脚的设计和 analyses 的工程公式。同时也讨论了在离岸结构分析中土壤结构耦合响应的近似方法。

最后，第六章把第四章中关于结构动力学的简单处理方法作了扩充，以包括更详细的专题，如波浪力引起的时效节点载荷、多自由度的动力分析、不规则随机波上动力响应和离岸结构物受地震载荷的响应。

由于包括了这些内容，本书可用于海洋工程专业大学生课程或用作土木工程和机械工程学生选修课程的教材。同时，本书也将会使正从事海洋工程实际的工程师感到兴趣，因为本书对各专题所提供的处理方法都不是目前现有的任何单独一本书中所能找到的。

托马斯·道森

于安那波利斯



墨西哥湾中离岸平台的发展

上图：1947年安置在20英尺水深中的第一座钢质离岸平台。

下图：1973年安置在1000英尺水深中的壳牌公司的COGNAC平台。（经McDermott公司许可）

目 录

第一章 引言	(1)
1. 1 固定式离岸结构物的设计.....	(1)
1. 2 固定式离岸结构物的种类.....	(2)
1. 3 固定式离岸平台的分析.....	(16)
参考文献.....	(17)
第二章 矩阵结构分析	(20)
2. 1 矩阵法原理.....	(20)
2. 2 平面桁架.....	(25)
2. 3 空间桁架.....	(33)
2. 4 平面刚架.....	(36)
2. 5 空间刚架.....	(53)
参考文献.....	(57)
习题.....	(57)
第三章 环境载荷	(63)
3. 1 风速.....	(63)
3. 2 风力.....	(65)
3. 3 海洋表面波.....	(68)
3. 4 垂直管桩上的波浪力.....	(78)
3. 5 任意方位的圆柱体上的波浪力.....	(85)
3. 6 离岸结构物上的最大波浪力.....	(87)
3. 7 由波浪力引起的节点载荷.....	(91)
3. 8 浮力.....	(94)
3. 9 流载荷.....	(97)
3. 10 其他的环境载荷.....	(98)
参考文献.....	(99)
习题.....	(100)
第四章 静力分析法	(104)
4. 1 设计的环境条件.....	(104)
4. 2 钢质离岸结构的刚架分析.....	(105)
4. 3 弯曲应力乘子.....	(110)
4. 4 钢结构中水压产生的应力.....	(113)
4. 5 钢质杆件的设计应力标准.....	(119)
4. 6 圆周加强环.....	(123)

4.7	节点分析	(125)
4.8	海洋混凝土平台的分析	(129)
4.9	混凝土结构中由水压引起的应力	(139)
4.10	动力效应的校核	(144)
	参考文献	(148)
	习题	(149)
第五章	基础分析	(154)
5.1	土壤特性	(154)
5.2	导管架结构的管桩	(155)
5.3	轴向管桩能力的预报	(157)
5.4	管桩对轴向载荷的弹性响应	(160)
5.5	管桩对周期性的横向载荷的响应	(163)
5.6	等效独立管桩的刚性	(169)
5.7	离岸结构物的底座	(172)
5.8	底座的承载能力	(172)
5.9	底座的抗滑性能	(174)
5.10	一般载荷条件下底座的设计	(174)
5.11	底座的弹性响应	(177)
5.12	基础的下沉	(180)
	参考文献	(183)
	习题	(184)
第六章	结构的动力分析	(187)
6.1	波浪力的堆集表示	(187)
6.2	动力控制方程组	(190)
6.3	求解的模态法	(195)
6.4	振型计算的迭代法	(200)
6.5	应力分析	(203)
6.6	随机波浪中的动力响应	(206)
6.7	地震载荷的响应	(209)
	参考文献	(215)
	习题	(216)
附录	矩阵代数	(220)
A.1	行列式	(220)
A.2	矩阵	(221)
A.3	线性代数方程组的求解	(224)

第一章 引言

离岸结构工程相对来说是工程中的新领域，它涉及到各种用途固定式离岸平台的设计和就位安装。这一领域的发展可以追溯到1947年左右。当时在墨西哥湾海面上设置了第一座钢结构物，它与传统的结构工程的区别主要在它的一些特殊问题上，即必须考虑在把结构物运送到离岸工地过程中和在那里就位时所遇到的问题以及它要能承受在预期的服务期中可能经历的恶劣的环境载荷。这一新的技术领域的主要推动力是来自石油工业及其为开采近海海底蕴藏丰富的碳氢化合物而对固定式平台的需求。但离岸平台的应用绝不仅仅局限于石油工业，对于军事和导航，它也有着十分重要的作用。

本书旨在介绍离岸结构工程中所要用到的基本分析方法。本章仅对离岸平台作一简要的综述。在本书的以后篇幅中，将接着作详细的专题介绍。

1.1 固定式离岸结构物的设计

离岸结构物的设计在许多方面与岸上建筑物的设计是类似的，但也有特殊的附加要求，这就是离岸结构物必须在一个地方建造而在另一处就位安装。尽管很难把创造性设计离岸结构物时所需要的各个步骤作一归类，但通常在不同程度上都包括下列顺序：

1. 必要性论证。
2. 估计环境和当地条件。
3. 作出初步设计的提案，特别要注意以后要采用的就位安装方法。
4. 依据经济性、建造和就位安装的困难及基础的要求等进行估计，然后选定最终的设计型式。
5. 对选定的平台型式，根据所承受的要求载荷和环境力来决定其结构尺度和结构细部。
6. 最后，对设计作计算，以确保结构物能承受由于往工地运输和在工作就位安装时所产生的载荷。

对固定式离岸结构物的要求通常可简要地表示为：在一预定的离岸工地，它应具有一规定最小工作面积的操作甲板，并还要能承受一给定的最小重量载荷。因而要最经济地选择支承这个甲板的结构物，这主要取决于就位安装的方法以及工地的环境和当地条件。环境条件通常包括结构物可能遭受到的风、流和波浪，以及可能由浮冰和地震所引起的灾害。工地条件包括水深和海底特性，后者对结构物的基础要求是十分重要的。

当上面所提到的资料都具备时，根据所要求的操作载荷和工地所面临的主要环境载荷的粗糙估计，就可以围绕着可能的就位安装方法同时开展几种初步设计。在大部分情况下，事实上波浪载荷是设计的决定性因素，尽管当浮冰或地震给结构物造成严重灾害时会有例外。在这些初步设计中，由于经济上的不可行性或从建造和从就位安装考虑来看不切实际，其中某些设计很快就被否决了。对选留的设计就要求按把结构物从设想变成现实的过程中涉及的许多步骤（也包括成本在内）逐项作进一步的估算。尽管最后选定了一个设计蓝图和就位安装方法，但设计还得具体化和决定结构尺度以能承受必须的载荷。为使结构物能承受操作载

荷而作的尺度设计，相对来讲是一个直接的过程，但包括环境载荷后，一般要作若干次试探迭代。这是因为结构构件尺度的变化会引起作用在构件上的环境载荷的改变，从总体来讲也会改变作用在结构物上的载荷。最后，必须再对结构设计进行校核，以确保它能承受结构物运送和安放到预定工地时产生的力。这些力可能很大，如果忽略它们，也许会使结构物在投入使用前就产生很大的破坏。

1.2 固定式离岸结构物的种类

导轨型结构物

迄今为止，已经建成的固定式离岸结构物的最主要型式是图1.1所示的导轨型结构物，或称为导管架^{*}。这种结构物是由预制好的钢质下部结构和钢质甲板所组成，下部结构从海底一直伸出水面，而钢质甲板就安装在下部结构的顶上。甲板由多根管桩来支持，这些管桩

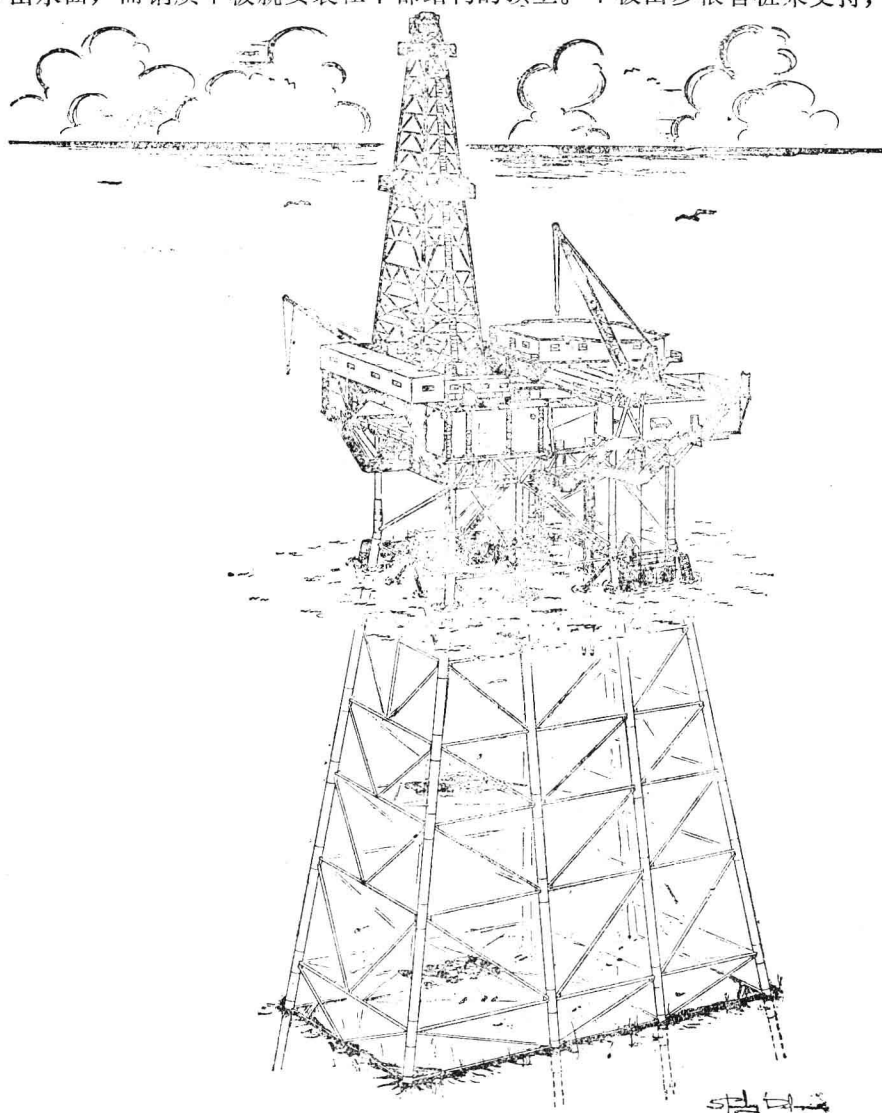


图1.1 艺术家笔下的一座现代化导管架型结构物（经McDermott公司许可）

※ 以下全部通称为导管架。——译者注

穿过下部结构的腿柱插入海底，这些管桩不仅支持了甲板，而且也使结构物能固定在原地，承受由风、浪和流产生的横向载荷。

图1.1中所示的离岸结构物是一座为水深可至350英尺而设计的现代的导管架结构。自四十年代后期以来，就有导管架结构物设置在墨西哥湾内路易斯安那的近海。根据Lee(1968)的报导，第一座这种类型的结构在1947年设置于水深20英尺的近海，紧接着第二座结构物设置在50英尺深的水中。到五十年代，离岸结构物已可达水深100英尺。这些早期的导管架结构，尽管它们的操作甲板也是安装在下部结构顶上并且由管桩来支持，但并不象图1.1中所示的那样紧凑。而是由若干个并排放放的小型下部结构所组成，管桩就从下部结构许多紧密排列着的腿柱中打入。

到六十年代中期，导管架型的设计已经发展到图1.1所示的一般形式了，而且结构物已经被安放到水深超过300英尺的水中了。在七十年代，由于有一个结构物被安置在1000英尺的水深中，导管架结构能适应的水深已经增加了一倍多。如今，几百个现代化的导管架平台矗立在墨西哥湾中，而且新的还不断在安装。尽管有不少破记录的结构物，但它们的绝大多数还是在小于300英尺的水深中。

导管架型结构物的建造和就位安装，在它的设计中起着决定性的作用(Lee, 1980)。通常下部结构是在岸边的工场中侧放着预制成的，然后水平地放置在一平甲板的驳船上，被拖曳到离岸目的地去。在就位安装的现场，把下部结构从驳船上滑放下来，然后借助浮吊将它竖立起来，使它垂直地沉向海底。一旦下部结构达到预定位置，管桩就穿过它的腿柱，由一台设在水面船只上的打桩机把这些桩打入海底。当管桩到达预定深度时，就齐下部结构的顶部把它们切断。此时预制好的甲板就插入管桩，通过现场焊接把它们连接起来。当它们完全成型后，甲板的重量完全由管桩来承受，而提供支撑的下部结构防止管桩的横向移动。图1.2示意地说明了就位安装的过程。

对图1.2中描述的建造和就位安装过程作一察看，就可发现某些为了得到满意的导管架型结构物设计而必须考虑的因素。例如，下部结构作为一个单独的结构单元，它的重量不能超过岸边建造工场起重设备的承重能力，它的重量和尺度也不能超过拖运驳船的能力。下部结构还必须设计得能承受把它吊放到驳船上去时的起吊载荷。它又必须恰当地设计成能承受离岸现场的下水载荷。在水中时，结构物要设计成能自浮，而又要同时能对某些构件灌水，使之在浮吊的协同下能竖立和下沉到海底。管桩的设计深度不能超过打桩机汽锤的能力，但又至少要能支撑甲板组合体。这些管桩是穿过下部结构的腿柱插入海底使结构物固定的。最后，预制甲板的重量或它的主要分段的重量不得超过现有的、用来把甲板放置到下部结构顶部上去的浮吊的能力。

对那些为安装在深水而设计得非常大的下部结构，图1.2中所描述的过程要作适当的修正，以便能把下部结构分成两个或更多的分段来建造，并把它们分别拖运到离岸工地加以组合装配。这些分段的下部结构，可以在竖立和下沉到海底前拼装起来，也可以把它们一个沉到另一个顶上，在它们最后的垂直位置上拼装起来。

对大型下部结构，与图1.2所示的就位安装过程的另外一个不同之处是把它们设计成能够自浮起来，这样就可避免从驳船上下水。通常这是能做到的。只要把下部结构的腿柱设计得足够大，使它能提供整个组合体所必需的浮力。当它从岸边的工场下水后，结构物就被拖到离岸工地，然后有选择地对腿柱灌水，下部结构就可垂直地安放到海底上了。

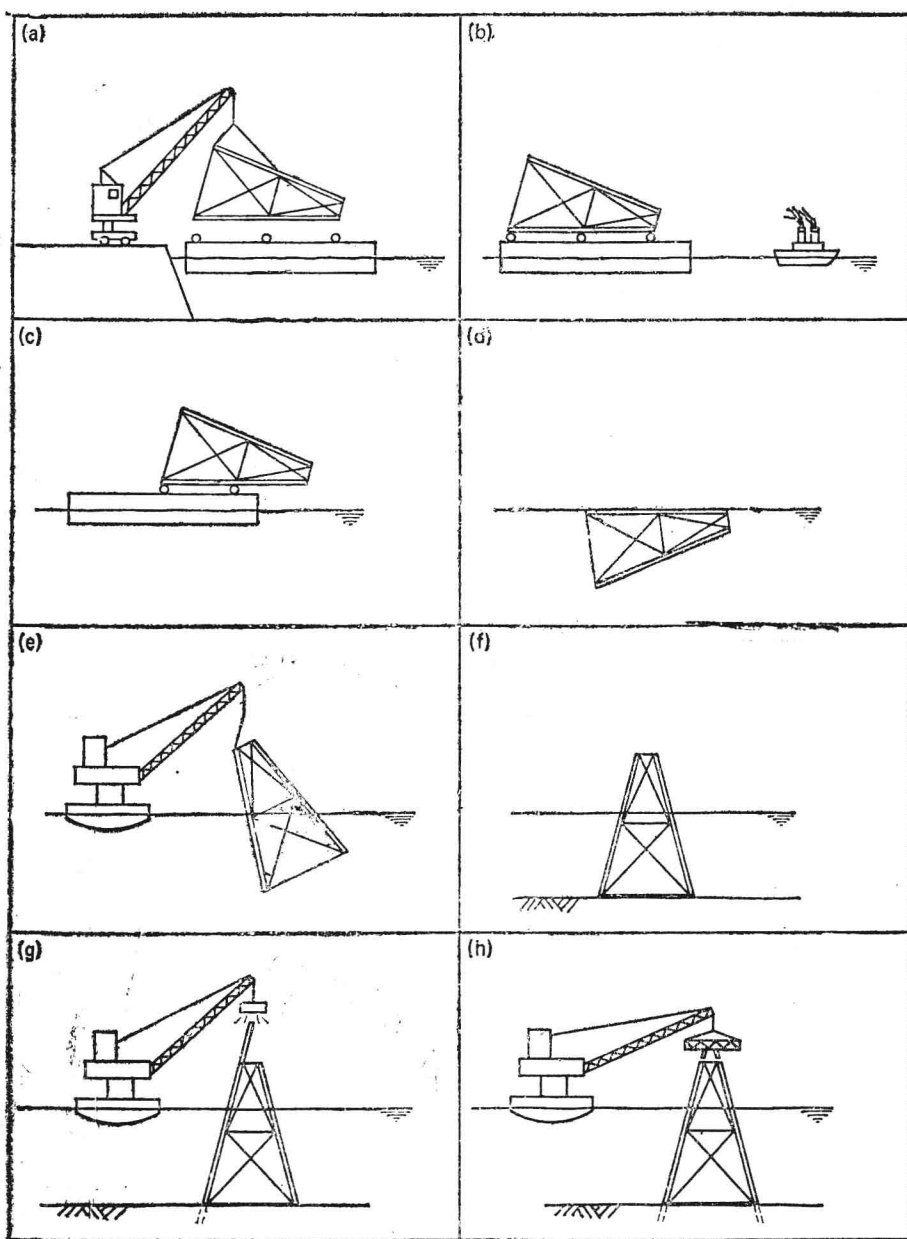


图1.2 导管架型结构的就位安装过程

相反地，为浅水设计的重量较轻的下部结构，就有可能免除下部结构从驳船下水的过程，这时下部结构可以借助于靠在边上的浮吊直接从拖运驳船上吊下来。

图1.1所示的导管架结构代表了一种标准的适用于350英尺左右水深的八条腿柱结构设计型式。当结构物要设置在非常软的沉积层上时，往往要作一些小小的修改。其中包括使用围绕结构物基础的裙桩，以提供更强的支持。应用随动杆（推动杆），把这些裙桩通过与下部结构的基础相接的粗短柱从水面上打入海底。然后在裙桩和短柱的环状间隙中灌注混凝土

(灰浆)，把两者固定起来。

图1.3中展示的一个典型的石油钻井和开采平台，就是按照上面所介绍的方法建造起来的。这个结构物位于墨西哥湾内路易斯安那近海深约300英尺的水中。甲板的尺度接近于 60×120 平方英尺，上面载有重约200万磅的操作设备。下部结构的重量约为400万磅。穿过下部结构的腿柱打入海底的八根管桩的外径是4英尺，壁厚约为1英寸。除这些以外，绕结构物的基础还设置了四根裙桩。所有的桩都打入海底200—300英尺深。这个结构物能承受在最大飓风时由风、浪和流所产生的300万磅的横向合力。由于近水面处波浪力最大，所以这个合力作用在结构物顶部附近。因而结构物也要设计成能承受一个 7×10^8 磅·英尺量级的底部倾覆力矩。这些载荷和力矩，相当于在陆地上一座典型的25层300英尺高的大楼所承受最大风力的五一七倍。

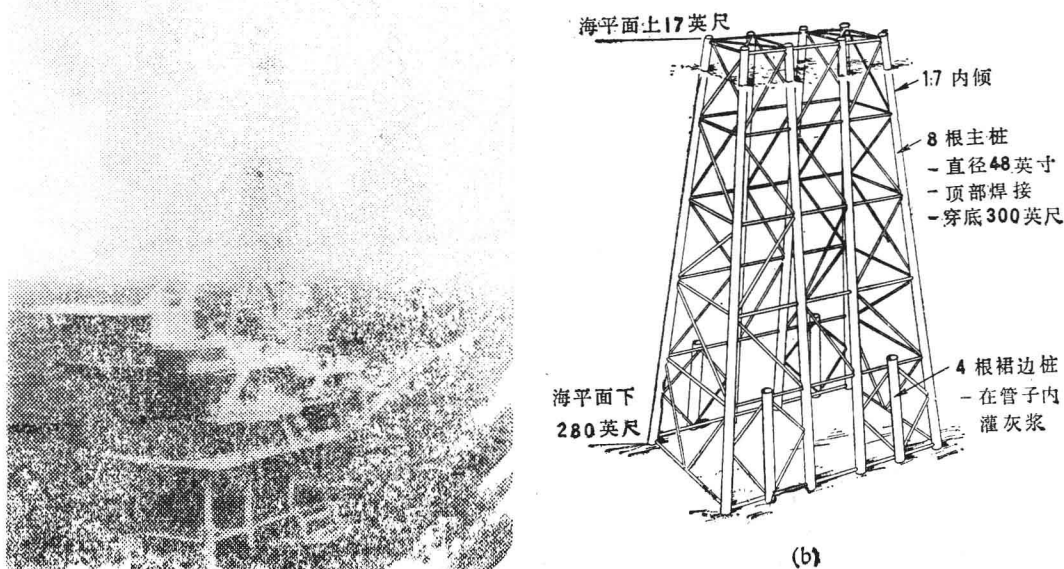


图1.3 墨西哥湾内路易斯安那近海的典型的离岸导管架型结构
(a) 就位后的结构物；(经美国石油研究学会许可) (b) 带有裙桩的下部结构
(继1974年McClelland后，经McClelland工程师联合公司许可)

对那些为水深超过350英尺而设计的结构物，已经考虑了与基本的八条腿柱导管架型不同的两种改型。第一种是增加结构物腿柱的数目，再加上裙桩，就能使结构物承受额外的甲板载荷和抵抗相应增加的横向载荷和倾覆力矩。第二种修改是基于这样的事实：随着结构物增高和基础加宽，越在里边的桩腿对承受倾覆力矩就越不起作用，因而作为一种八个桩腿结构物的改型，曾考虑把里桩都去掉，而把所有桩腿都设置在结构物四个外角的附近 (Lee, 1980)。

用于开采石油的导管架型结构物，不仅设置在路易斯安那的近海，在加利福尼亚近海同样也有。设置在这两个地方的结构物十分相似，只是在加利福尼亚近海的结构物除了能承受由风、浪、流等引起的载荷外，还能承受可能发生的地震载荷。Mashburn 和 Hubbard

(1967)已经就其中之一的结构物的就位安装作了十分有益的讨论。导管架型结构物同样还被安置在世界上其他许多地方,也包括北海。如今,在那里正在大规模地进行石油钻探和开采的活动。

除了石油开采事业之外,离岸导管架型结构还有着军事上的用途。事实上,固定式离岸平台除了用作石油钻探和开采活动之外,最大的用途就是防务,其中包括座落在美国东北部海边的得克萨斯天线塔。这些平台组成了五十年代美国早期的警报防务系统的一部分,否则就不可能在辽阔的沿海区域实现雷达警戒和尽早地探测到可能出现的敌机。图1.4所示的就是这些天线塔之一,其中有一些座落在大西洋沿岸处。

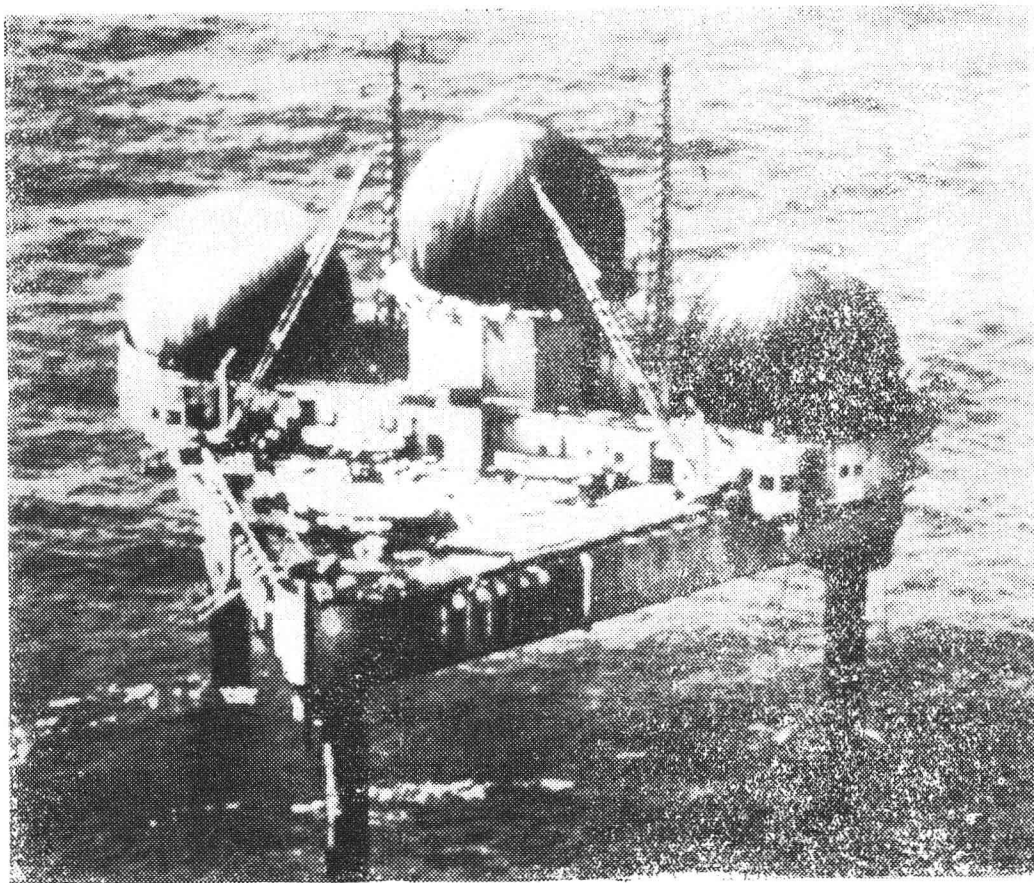


图1.4 五十年代用于防务目的的得克萨斯天线塔,
这些塔座落在美国东北部沿岸的大西洋中

1977年,在北卡罗来纳州近海设置的四个导管架型结构物,就是最近用于军事的一个例子。它们用作美国海军航空兵空中机动训练场。这种训练场就有可能以一种新的既安全又经济的办法来训练海军飞行员,即在大片无人的区域上用装在平台甲板上的雷达追踪仪记录飞行员的表现。图1.5所示的是这些塔座之一。在设计上,它们与海洋开采平台是十分相仿的,只是它们仅需用三条支持腿柱,就象得克萨斯天线塔一样。这是因为它们所承担的甲板重量比较轻。

在六十年代期间,美国海岸警卫队在大西洋沿岸设置了一些导管架结构物用来为船只导

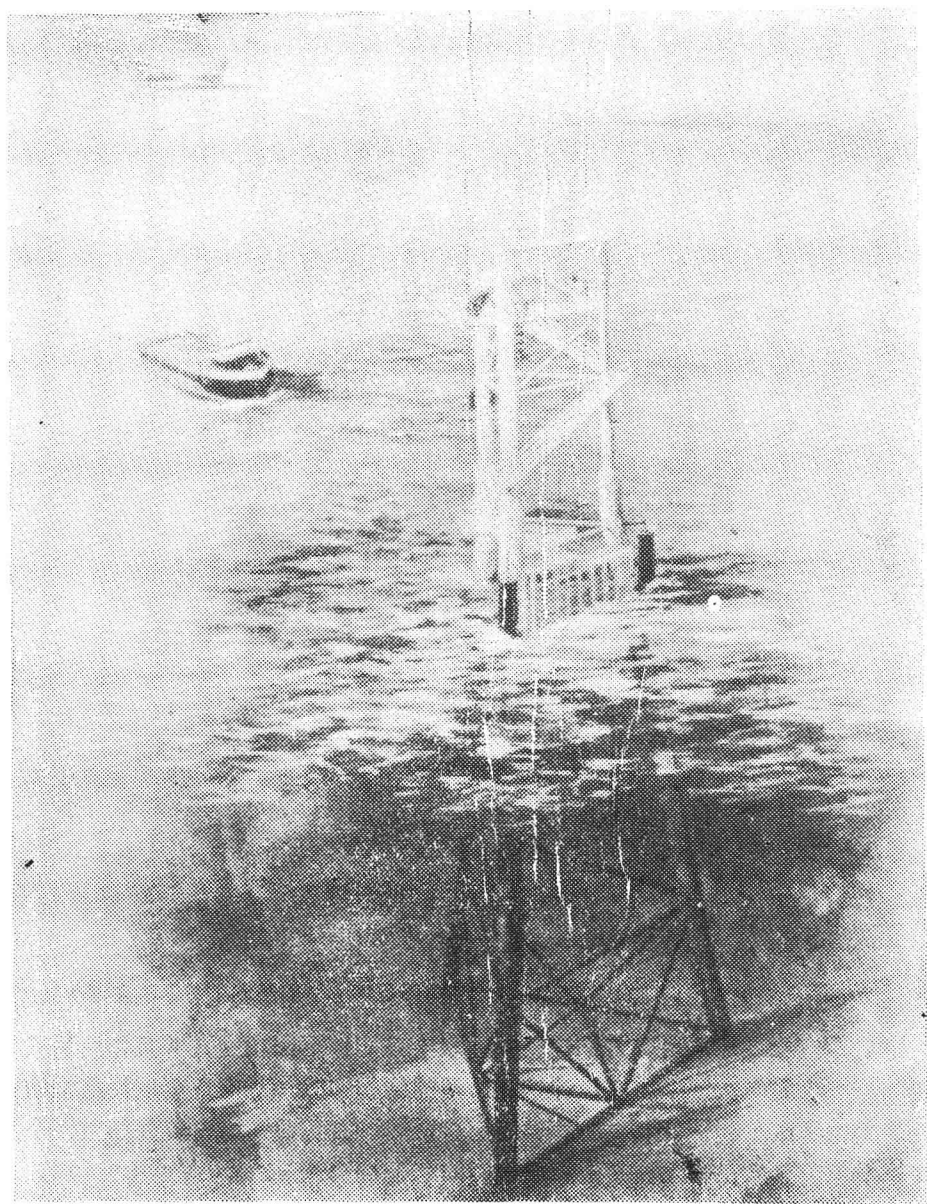


图1.5 北卡罗来纳沿岸的平台示意图
被美国海军用作航空兵训练场(经美国海军许可)

航。正象得克萨斯天线塔一样,这些结构物代表了与石油开采离岸平台这种通常应用不一样的另一种用途的离岸结构工程。Fowler(1965)和Ruffin(1965)已经对这些塔群的设计作了探讨。安装这些结构物是为了代替过时了的灯船。尽管妨碍用这种结构物来代替灯船的主要原因是经济问题,但由于它们位置固定,以及在各种天气条件下功能的可靠性,所以成为更有吸引力的一种型式。图1.6所示的就是这些灯塔群中的一个,它座落在弗吉尼亚沿海的切萨皮克海湾的入口。

抗冰结构物

离岸平台设计中第一个重大变化发生在六十年代。那时为阿拉斯加的库克港设计了几座



图1.6 美国在大西洋沿岸用于导航的离岸灯塔（经美国海岸警卫队许可）

平台，在那里，巨大的浮冰块随着潮汐流动，很有可能撞上结构物，并且作用的载荷要比由风暴、浪和流产生的严重得多。在设计这些区域的结构物时，相应地要取消结构物在潮汐涨落部位处的斜撑和水平构件，因为在这一区域这些结构有可能被冰撞击；并要用四个大直径的立柱来支撑甲板，然后每一立柱又由组成一圈的若干桩腿来支持（McClleland, 1974）。众所周知，这些结构物就是“抗冰平台”。图1.7表示了一个正在使用中的平台及其水面下的下部结构的细部。

尽管结构物主要是按冰载荷来设计的，但它们仍具有与导管架型结构相同的基本就位安装方式。其下部结构也是在岸上工场中预制好的，然后浮运到离岸工地，竖立起来，并用穿过腿柱的管桩打入海底来固定。由于下部结构的腿柱直径很大，在不灌水时它们能提供浮力，因此不必采用拖运驳船，下部结构能直接在水中拖运。

除了四腿柱平台外，在库克湾还安装了单腿柱的结构物（单支架），它被浮运并且就位于与结构物的基础相联结的水平容舱上。为了固定结构物和支持甲板，主桩群穿过结构体的腿柱打入海底，同时围绕着结构物的基础再打裙桩（图1.8）。

重力式结构物

如前面所描述的那样，导管架结构物特别适合像墨西哥湾那样的软土区。在这些区域