

海洋结构动力学

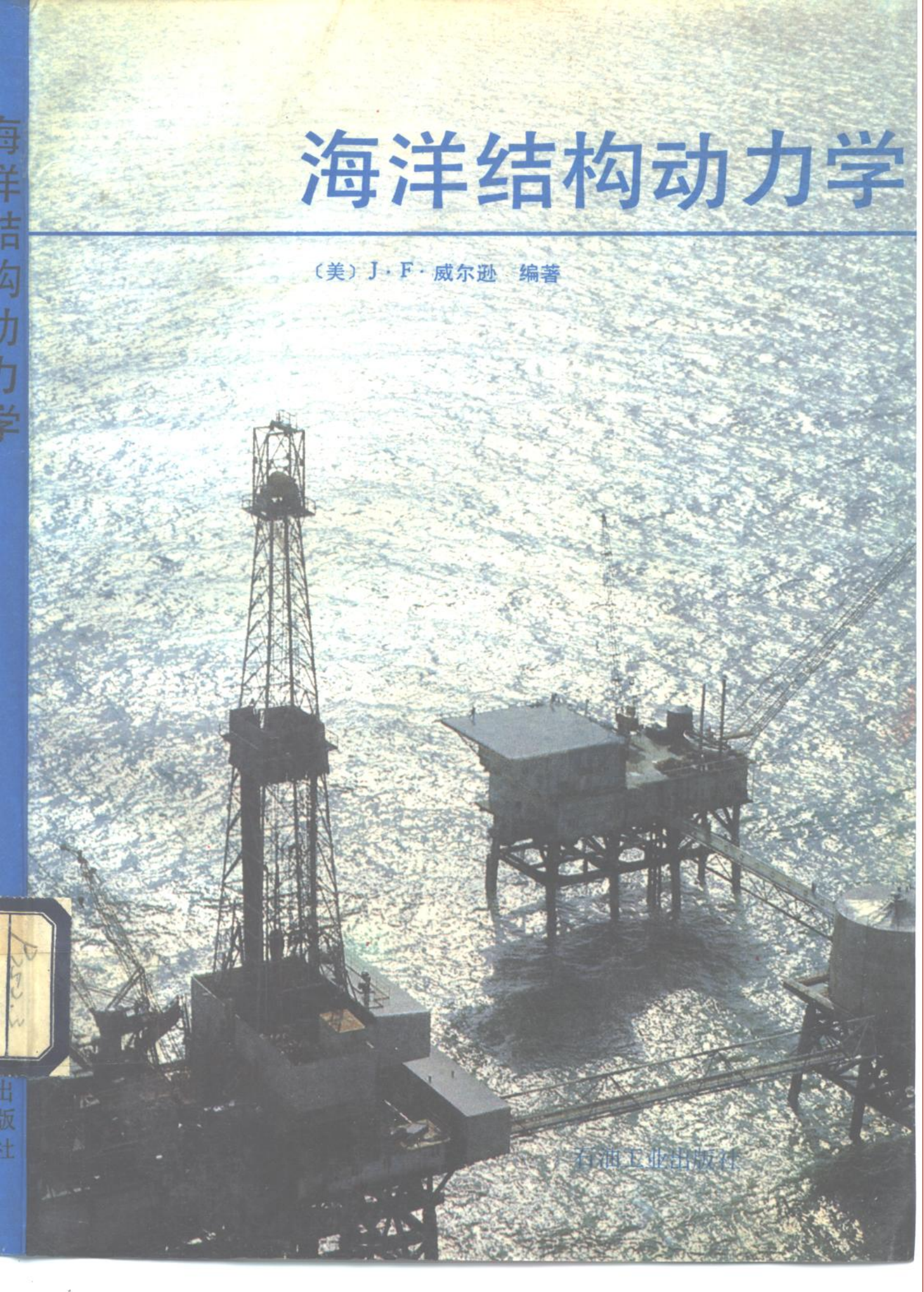
海洋结构动力学

(美) J·F·威尔逊 编著

122.3

出版社

石油工业出版社





200356907

48683

海洋结构动力学

〔美〕J.F.威尔逊 编著

杨国金 郭 毅 唐钦满 刘书功 译

袁 明 武 校



00287555



48683

5148/331

5148/02



石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书用基本物理概念和数学方法分析了海洋结构物的动力特性,并列举了实例加以论述。全书分14章,1至5章描述单自由度结构模型、相应的波浪载荷理论;6至7章描述波浪载荷和结构运动的统计分析;8至10章描述多自由度线性结构系统的分析和应用;11章描述包括缆索和管线等连续体系的运动;12至13章重点描述固定式结构桩基和结构部件的疲劳及断裂问题;14章概述了一些有应用价值的课题。

本书论述了与海洋结构物相关联的基本理论,又举出实例讲解对理论的应用,对从事海洋石油工程的技术人员、设计人员、研究人员、大专院校有关专业的教师、学生是一本很好的参考书。

James F. Wilson
DYNAMICS OF OFFSHORE STRUCTURES
Wiley-Interscience publication 1, 1984

海洋结构动力学

〔美〕J. F. 威尔逊 编著
杨国金 郭毅 唐钦满 刘书功 译
袁明武 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义县燕华营印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 22 1/4印张 559千字 印1—1,200

1991年1月北京第1版 1991年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0450-X/TE·433

定价: 7.00元

序 言

本书论述了分析海洋结构的动力特性所必需的基本物理概念和数学方法。书中选取的实例主要是各种有限寿命的海洋平台、海洋管线以及少量的与近海结构作业有关的系泊船。

在每一章里都有许多假定，有时这些假定是微妙的，在确定计算方法的数学模型和海洋环境引起的自然力时会涉及到这些假定，对此，我们给予了精心的考虑，并且着重地分析了在流动力、风力、波浪力和地震力的作用下，受线性和非线性约束的弹性结构的平面运动。一~五章描述了单自由度结构模型，以及相应的波浪载荷理论，就此得到了结构响应的确定性分析，即时间历程分析。六和七章扩充了波浪载荷和结构运动的统计分析。八~十章讲解了多自由度详尽的线性结构系统的分析和应用。十一章讨论了连续体系的分析，包括缆索和管线的运动。十二和十三章重点讲述了固定式结构的桩基础和结构构件的疲劳和断裂问题。十四章概述了一些专题，作为本书的结束。这些专题选自于我的研究课题和咨询项目。

在选取本书内容时，我考虑到了三个方面人员的需要：海洋工程专业的学生，进行海洋结构动力设计的工程师，以及从事海洋结构研究的工程师。目前，我把前七章作为“海洋系统动力学”的基础，即高年级大学生、研究生和专业工程师一学期的教程。在过去的十年间，其他作者在课堂上已试讲了他们所编写的内容。B.马加讲了“工程师用物理海洋学”；S.厄特库讲了“结构系统分析”；L.里斯讲了“基础设计”；H.佩特罗斯基讲了“断裂力学”。每一章的最后都附有大量的参考文献，以便使读者得到需要的背景资料，了解这些专业方面的发展现状。

对基本理论作了详细介绍之后，再用一些算例来说明这些基本理论的应用，而且还给出一些选自于研究和实际工程中的练习。我们选取这些练习题的目的在于让读者练习和掌握基本原理。这些练习中的大部分习题都可以用手持计算器解答，当然也可以采用结构动力设计最后阶段普遍应用的大型程序包来解答。我们的看法是工程师首先要运用所叙述的假设做相对简单的计算，以便对自己所遇到的问题得到一个“感性”认识，使自己处于高屋建瓴的地位，进而利用更复杂的结构模型分析并估算整体结构的运动和局部应力。

我希望本书能对大学生、工程师和科技工作者有所帮助，尤其是在他们承担开发海洋能源和矿物资源的结构分析富有挑战性的任务时有所启发。

我对本书求解数值练习作出贡献，并为本书手稿提出他们宝贵意见的学生和老师表示衷心的感谢，尤其是G.奥吉尔，S. M. 塞埃德，和D. 威尔逊。我还感谢杜克大学同意我休假一学期，并有幸到墨尔本大学应聘客座教授，在此期间完成了我的手稿。

J. F. 威尔逊

德拉姆，北卡罗来纳州

1984年2月

目 录

第一章 海洋结构 J. F. 威尔逊 (1)	
§1.1 一般海洋结构的描述..... (2)	
§1.2 固体——流体相互作用参数..... (7)	
§1.3 环境力..... (11)	
第二章 单自由度体系 J. F. 威尔逊 (24)	
§2.1 数学模拟的概念和示例..... (24)	
§2.2 利用能量法建立的动力学模型..... (36)	
§2.3 自由振动与动力稳定性..... (39)	
第三章 海浪的确定性描述 B. J. 马 加 (51)	
§3.1 平面波的定义..... (51)	
§3.2 线性波..... (53)	
§3.3 非线性波..... (55)	
§3.4 各种波浪理论使用的有效范围..... (61)	
第四章 结构物上的波浪力 J. F. 威尔逊 (68)	
§4.1 线性流体动量守恒..... (68)	
§4.2 柔性圆柱体的波浪荷载..... (69)	
§4.3 流体荷载区域的分类..... (71)	
§4.4 几种典型结构物的流动区域..... (73)	
§4.5 流动系数 C_b 和 C_m 的概述..... (75)	
§4.6 波浪荷载的传递函数..... (76)	
第五章 单自由度体系的确定性动力响应 J. F. 威尔逊 (81)	
§5.1 线性结构的响应函数..... (81)	
§5.2 线性结构对地震荷载的响应..... (84)	
§5.3 非线性结构的响应特性..... (86)	
§5.4 非线性结构的数值解..... (93)	
第六章 海浪的统计描述 B. J. 马 加 (101)	
§6.1 波浪谱简介..... (101)	
§6.2 有效波概念..... (103)	
§6.3 波浪能量谱的描述..... (106)	
§6.4 设计波谱的选择..... (109)	
§6.5 设计谱的时间历程的合成..... (112)	
第七章 单自由度线性结构的统计响应 J. F. 威尔逊 (117)	
§7.1 平均值与概率..... (117)	
§7.2 平稳各态历经假定..... (119)	
§7.3 自相关与谱密度函数..... (121)	
§7.4 结构响应统计学..... (122)	
§7.5 统计方法的推广..... (127)	

第八章 多自由度体系的公式S. 厄特库	(132)
§8.1 一般海洋结构的运动.....	(132)
§8.2 基本运动方程.....	(134)
§8.3 应变能、刚度矩阵和恢复力.....	(144)
§8.4 动能、质量矩阵和惯性力.....	(164)
§8.5 能量耗散、阻尼矩阵和摩擦力.....	(172)
第九章 多自由度体系的分析S. 厄特库	(177)
§9.1 无阻尼自由振动.....	(178)
§9.2 阻尼自由振动.....	(186)
§9.3 在随时间变化载荷作用下的瞬态响应.....	(189)
§9.4 在周期载荷作用下的稳态响应.....	(195)
§9.5 分析的简化.....	(199)
§9.6 重要的自由振型和频率的计算.....	(204)
第十章 多自由度体系的应用J. F. 威尔逊	(217)
§10.1 固定式平台的时域响应.....	(217)
§10.2 重力式平台的自由振动和稳定性.....	(223)
§10.3 波浪载荷作用下结构响应的统计分析.....	(227)
§10.4 固定式平台的随机响应.....	(229)
第十一章 连续体系J. F. 威尔逊	(236)
§11.1 梁和缆索的分析.....	(237)
§11.2 缆索的响应.....	(243)
§11.3 梁的响应.....	(248)
第十二章 海洋结构的桩基在横向载荷作用下的特性L. C. 里斯	(259)
§12.1 土壤响应与 $p-y$ 曲线.....	(259)
§12.2 计算 $p-y$ 曲线的几点说明.....	(270)
§12.3 无量纲方法的解.....	(271)
§12.4 有限差分法的计算机解.....	(277)
§12.5 结论.....	(287)
第十三章 海洋结构中的断裂力学和疲劳H. J. 佩特罗斯基	(291)
§13.1 基本原理.....	(292)
§13.2 裂纹扩展模型.....	(301)
§13.3 确定性分析和概率分析.....	(312)
§13.4 疲劳破坏计算的敏感性和推荐方法.....	(319)
第十四章 研究与开发中的问题J. F. 威尔逊	(324)
§14.1 一种海洋热能转换管的铺设.....	(324)
§14.2 油轮上脚手架的稳定性.....	(331)
§14.3 顺应塔架的自由振动.....	(337)
§14.4 协方差扩散方程式的应用.....	(342)
附录A 用于三维实体的一些计算公式	(347)
附录B 平均值和协方差扩散方程	(348)

第一章 海洋结构

J. F. 威尔逊

能设计出适应非常恶劣的海上环境的海洋结构,对现代的海洋工程来说,是一件既富有挑战性而又富有创造性的工作。原因是它涉及到许多学科,像气象学、统计学、海洋物理学、造船学、地质学、材料学、土力学以及流体力学与结构力学等方面的知识。借助于适应海洋条件的坚固的结构物,人类将不断地勘探与开发新的食物资源、能源和矿物资源。人们还打算建造固定腿柱式或浮动式海洋结构,以便在其上面建设海上发电厂,游乐园和海洋科学实验室等。

对新能源的需求,一直在大力地推动着工业界和政府发展海洋结构。自1887年在加利福尼亚建造了第一座钻探石油的木质平台以来,已在海上建造了约10,000座近海结构(Will, 1982年)。其中约2,000座为钢质平台,约20座为混凝土基础的钢质甲板重力式平台。这些平台的建造大部分开始于四十年代后期,当时在墨西哥湾水深20~50英尺的海域里安装了钻井用的钢质平台。

最近开发的一些最为壮观的海洋结构是图1.1所示的六种采油平台,其中包括水深800英尺的重力式混凝土平台,1,200英尺水深的钢质导管架固定式平台,以及适应水深1,000~2,500英尺,锚定于海底以保持稳定的钢质顺应平台。目前,张力腿平台以及由船舶控制的水下采油系统和半潜式平台,看来对于4,000~6,000英尺的海域是最为可行的结构。

海洋结构系统应尽量使风、浪和海流易于穿过。Mulcahy (1979年)提出了如下的设计原则:

海洋平台有点象宇宙密封舱,如能从结构上去掉每一磅不必要的甲板重量,就有可能缩小支持该重量所需要的结构尺寸。锚索顺应结构、固定式平台或张力腿平台都是这种情况。减小波浪荷载就可以减少倾覆力矩,从而也就减低了对桩基的要求,当然也可以减少结构加强构件的数量。这样,人们就可以采用较小的

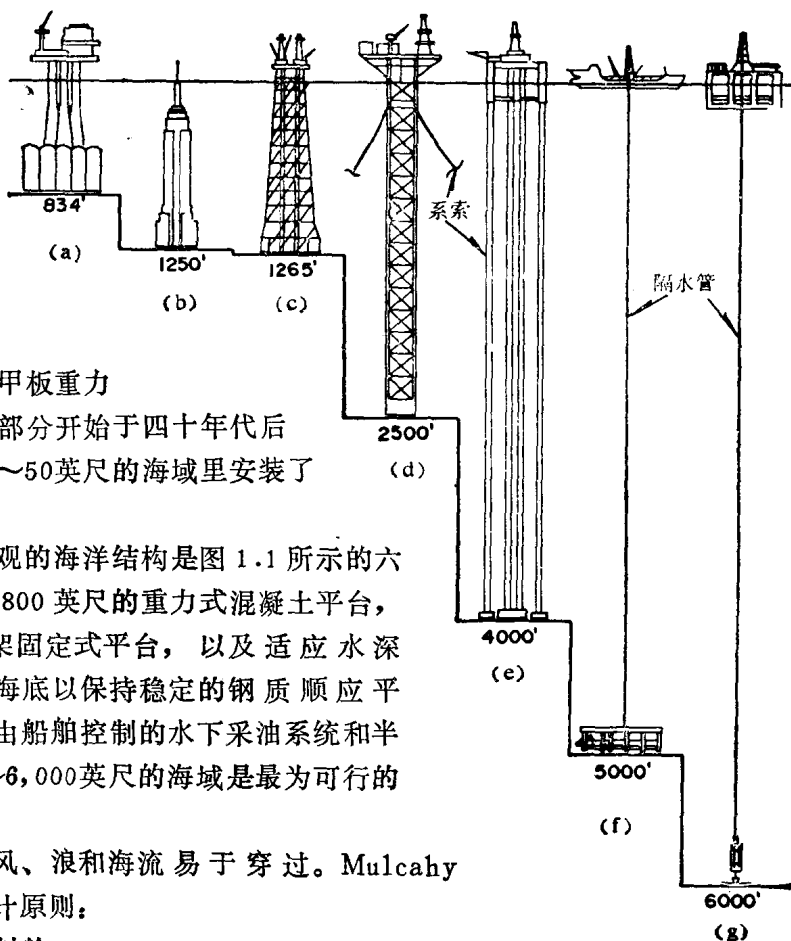


图1.1 现代最高的各种海洋结构系统的对比

(a) 一斯塔福德的康迪普A平台; (b) 一帝国大厦; (c) 一康尼亚克式平台; (d) 一锚索式顺应结构; (e) 一张力腿平台; (f) 一水下采油系统; (g) 赛德科709半潜式平台

驳船把结构物拖运到作业位置。

然而,就广义而论,海洋结构除了顺应结构和平台结构外,还包括有更多的方面。它们包括能精确控制位置的锚泊船舶或动力定位船舶;它还包括顺应式结构用的锚索、系留浮筒和张力腿平台用的缆绳、以及有关的管线等,没有这些辅助的缆索和管线,平台式和水下采油系统都将不能工作。在本书中,海洋结构还包括用来开采深达10,000英尺水下的粒状锰矿的移动式挖掘管线;以及长度超过半英里、直径为30~40英尺的垂直管线,这种管线正在研制之中,可用它从海水中提取海洋热能。

设计这些结构中的任何一种结构,设计人员必须取得结构物上经常承受恶劣海洋环境作用的动态力的定量说明,并且必须能够通过分析预测结构的整体性能。下面对所选择的海洋结构做简要叙述,然后从物理学与数学的角度来讨论海洋环境荷载及其可能导致的危险。以后各章将进行统计描述、结构模拟和动力学分析。

§1.1 一般海洋结构的描述

图1.2给出了自升式平台即自升式装置的两个图片。这种平台通常有3~6根桩腿,并装有沿桩腿调节甲板高度的马达驱动系统。桩腿的形状有管柱式的,也有桁架式的。这种平台可以从一个地方拖到另一个地方,作业水深可达300英尺。一般自升式平台的桩脚的设计是沉垫和桩靴结合的形式。桩靴是固定在桩腿底部的钢质托盘,可以减少桩腿插入海底的深度。在软质土壤的海底,即使使用桩靴,桩腿的插入深度也可达到200英尺。这种自升式装置通常用于勘探钻井。

图1.1(a)所示的重力式混凝土平台靠自身的重量保持其动力稳定性,其沉箱直接坐在位于海底的混凝土沉垫上。沉箱是由一丛贮油罐组成,罐内底部的砂子是作压舱用的。空心混凝土腿柱一般为锥形,每座重力式平台有2~4个腿柱,从沉箱向上延伸至水上与钢质甲板

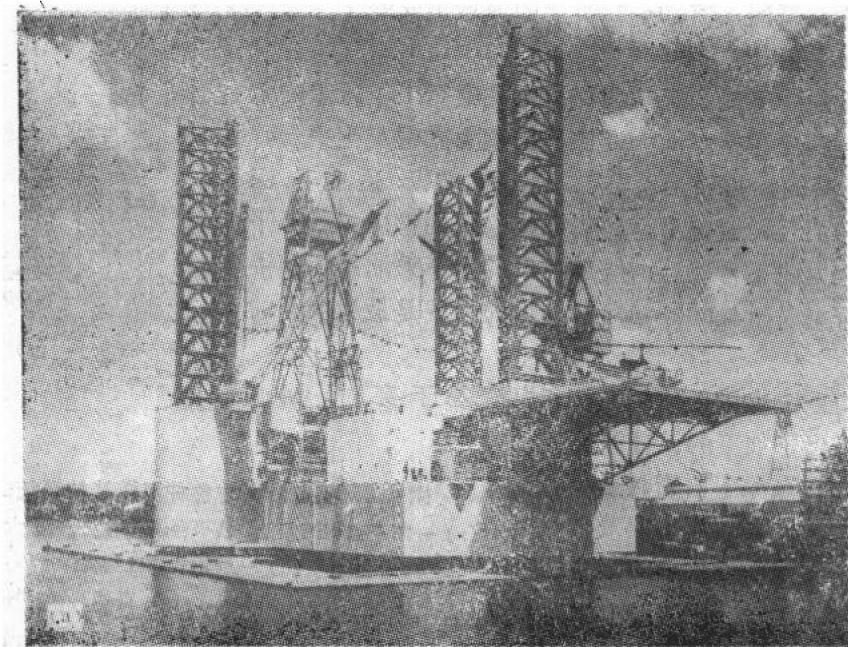


图1.2(a) 在路易斯安那一个船坞中的一座沉垫自开式装置

连接。这种结构能承受高达80英尺的波浪，目前正在北海用作采油平台。834英尺高的Statfjord，即图1.1 (a) 所示的Condeep平台位于挪威西部110英里的海上。这座巨型平台能钻42口井，钻井深度可达9,300英尺，上面可容纳200个人生活和工作 (Britton, 1981年)。阿拉斯加库克湾也安装了其他形式的沉箱式抗冰平台。对于混凝土平台设计与施工的更详细情况可参见1979年 Bercha 与 Stenning、1981年Graff与Chen、1981年Graff的文章。

图1.1 (c) 中的固定式平台是钢质导管架式平台的一个例子，目前世界上最高的这种平台，位于美国路易斯安那州新奥尔良市东南约100英里的墨西哥湾里。这种结构的特点是管状钢质腿柱和较小直径的K型或X型管状交叉斜拉筋，腿柱稍有倾斜，桩就通过这些起导管作用的腿柱打入地层，将平台固定于海底。在软地基上，为了使结构达到所要求的稳定性，有时候需要在每个角腿柱周围打入群桩。例如有10条腿柱的Cognac平台就有24根垂直裙桩，每根桩都打入450英尺深的软粘土层海底。钻井和采油应用钢质导管架结构是最为普遍的 (Furnes 1981年)。图1.3所示的结构就是这种结构中比较典型的一种。

图1.1 (d) 所示的结构，是计划在八十年代初安装在墨西哥湾的第一座顺应锚索式平台。它将安装在1,000英尺水深海域中，而这种结构的工作水深可望达到2,500英尺。这种结构仍靠桩支撑，但水平方向可随波浪摆动，于水面以下80英尺处，在结构的四周对称地系上20根五英寸直径的钢索以保证结构的稳定性。每一根钢索向下延伸约2,500英尺，与一根加重索相连，而加重索的另一端是锚固的。加重索仅在极端恶劣的气象条件下才被提高海底，以使结构能顺应自然力的作用。

在八十年代中期，在距苏格兰海岸90英里的海域里安装了第一座，图1.1 (e) 所示的张力腿平台。它的原型照片为图1.4所示是严格为实验研究目的而建造的。张力腿平台的漂浮结构由分布在每个角柱上的多条铅直高强度钢质绳索固定在井位上，这些绳索即使在极端风暴条件下也依然保持着张力。

图1.1 (f) 所示潜水式结构是目前正在研制之中的结构，它可以应用于2,500~5,000英尺以及更深的水域 (Britton, 1981年)。这种结构位于海底，油气生产由船舶或海岸上的计算机系统遥控进行。

诸如图1.1 (g) 和图1.5所示的半潜式结构是浮在处于海面波浪以下相对平静水中的浮筒上的，所设计的从浮筒到甲板的支柱要能将波浪力减小到最低限度。这种非常稳定的结构可以从一个地方被拖到另一个地方，也可以是自航的。目前使用的这类结构设计水深为2,000英

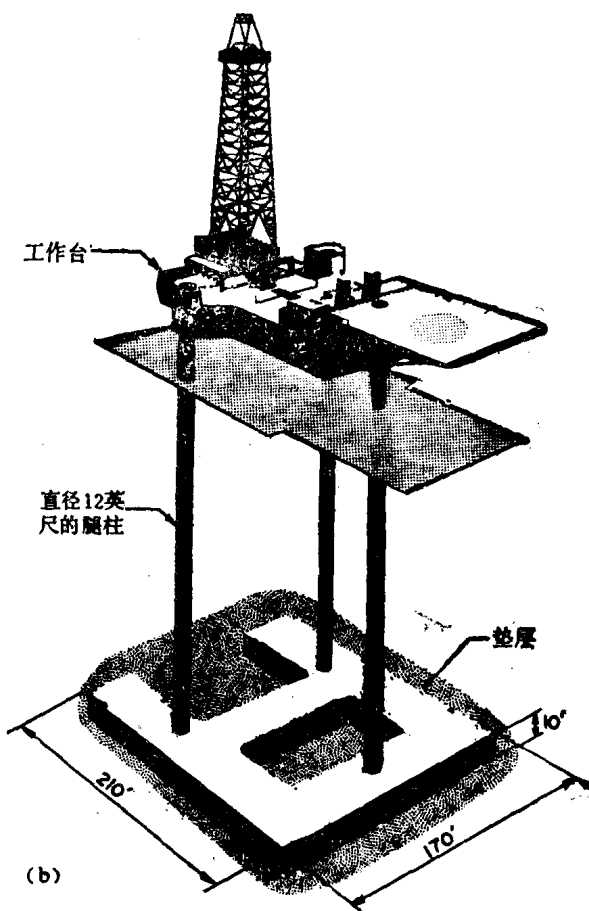


图1.2 (b) 沉垫自升式装置示意图

(由Bethlehem钢铁公司提供)

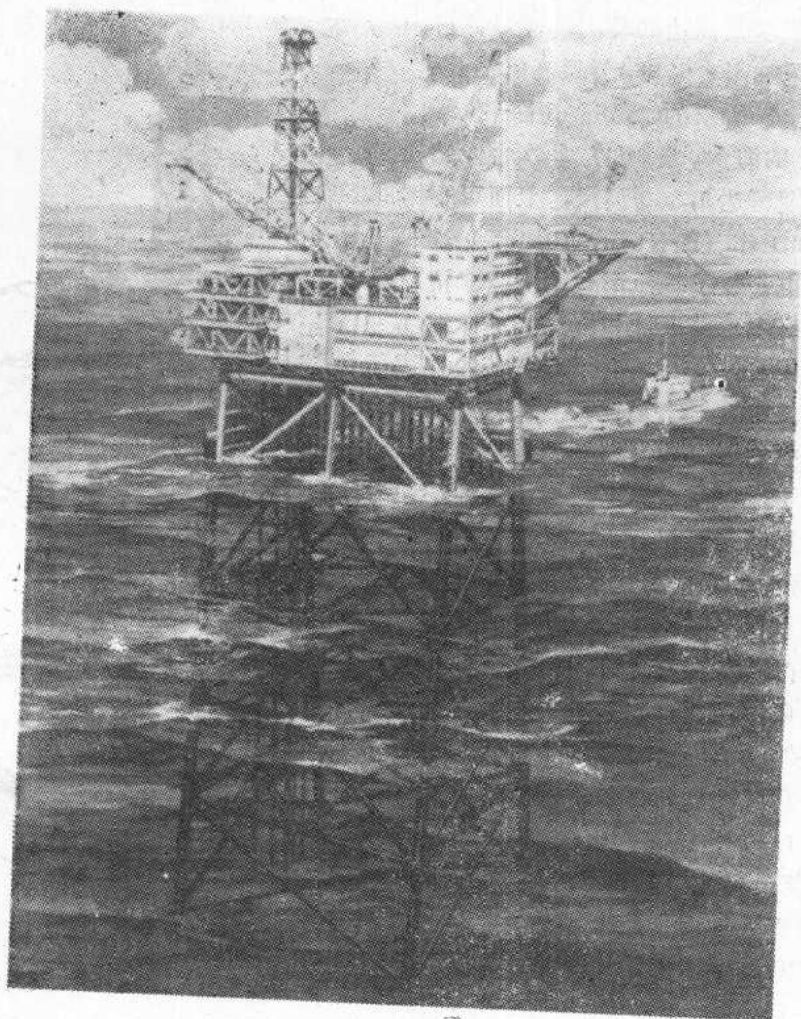


图1.3 自给导管架式平台 (日本IHI公司提供)

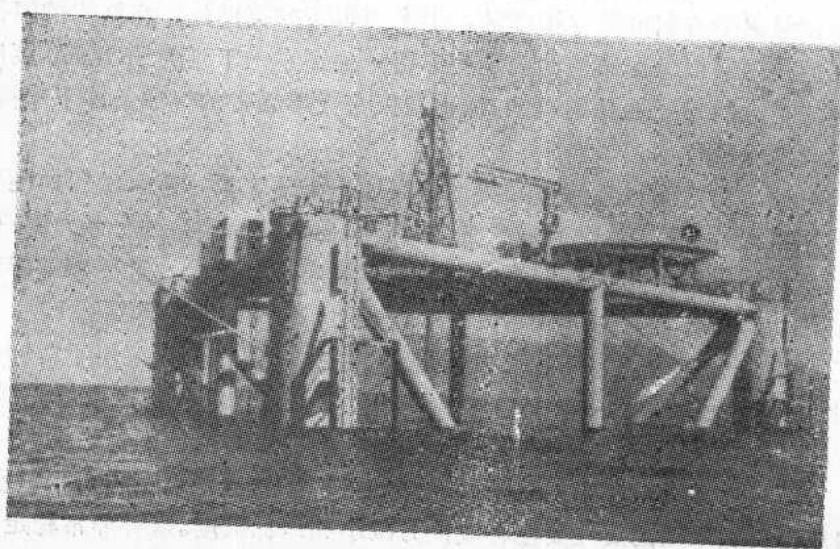


图1.4 实验性张力腿平台 (由福陆油气公司提供)

尺；将来有可能设计出三倍于这一水深的结构。这种结构靠8条或10条辐射系泊式锚缆稳定在井位的上方。为使结构定位于井口上方，所需要的操作是通过计算机控制并监视各条锚缆受力大小，并应用推力器进行调整而实现的。

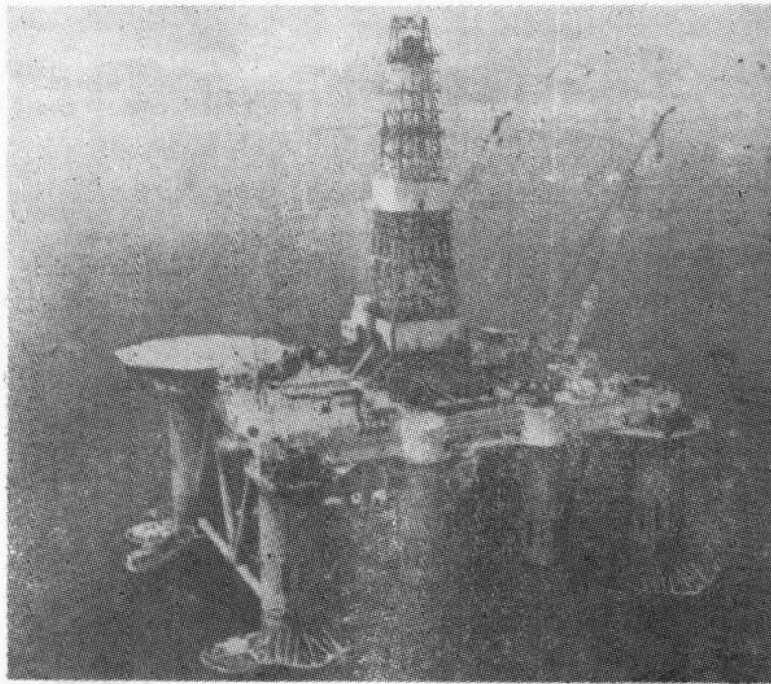


图1.5 半潜式平台

(由制造者东京三菱和业主日本钻井公司提供)

无论水下采油系统还是半潜式装置都有一个重要的附属系统，即隔水管。隔水管是一根管线，管内装有的各种特殊用途的管路，隔水管分为钻井用和采油用两种，二者在顶端都有伸缩接头，在井口有球形接头，并处于受拉状态，通过对船舶或平台的动力定位使隔水管保持在约 8° 的垂直度范围以内。1981年Sarpkaya和Isaacson对隔水管进行了动力分析。

近岸管线的铺设与操作也给分析人员和设计工程师提出了难题。恶劣的海况给采用铺管船法铺设管线带来了困难，见图1.6。采用这个方法铺管，托管架能提供必要的浮力，以使

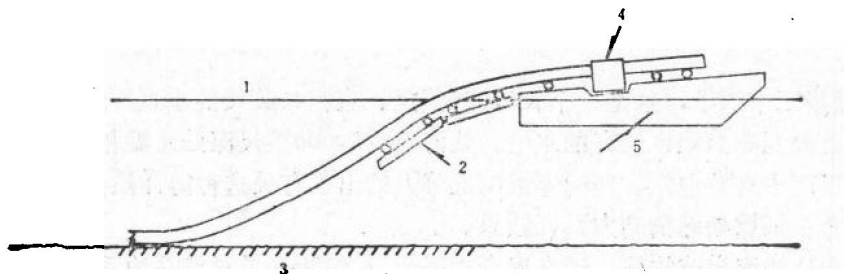


图1.6 用铺管船法铺设海底管线

1—静止水平；2—托管架（浮体）；3—海底；4—张紧装置；5—铺管船

管线产生的曲率和弯曲应力达到最小。第二个例子是图1.7所示的采矿管，用其从水深约2,500英尺的洋底开采富锰矿已获得成功Lecourt和Williams 1971年在10,000英尺水深进行作业也将成为现实。在1974年，Wilson和Biggers对这些管线进行了动力研究。

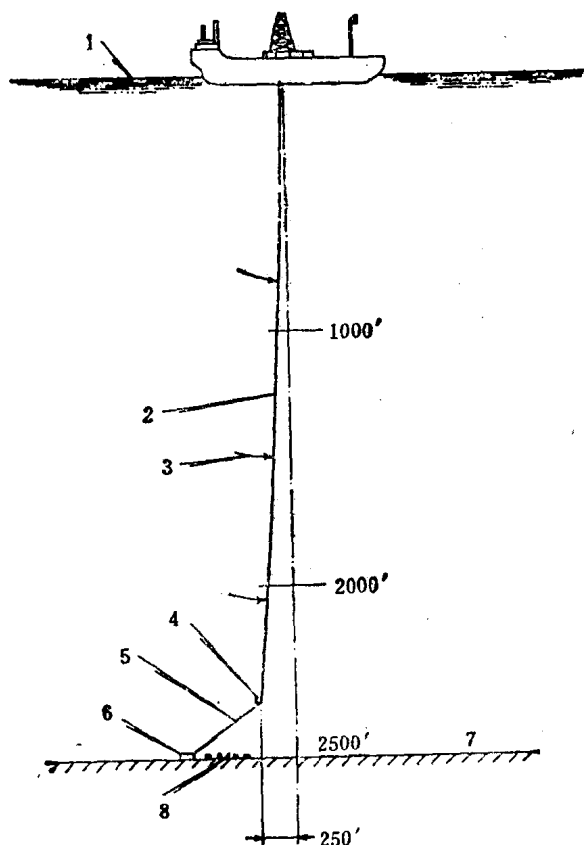


图1.7 从洋底开采富锰矿采用的采矿管真空吸入系统

1—海平面；2—采矿管；3—注入的空气；4—配重；
5—悬臂；6—采矿头；7—海底；8—矿瘤

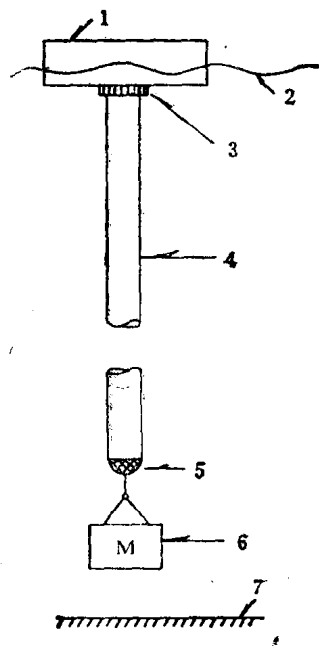


图1.8 用驳船悬挂的海洋热能转换冷水管

1—驳船；2—水线；3—旋转限制器；
4—管线；5—进口滤网；6—压载；7—海底

图1.8是第三个例子，这是一个长3,000英尺、直径40英尺的垂直冷水管，该管将较冷的水从海洋深处提到海面温度较高的水中。从海面到3,000英尺深处水温相差华氏20~40度，通过热交换足以产生有效电能。1982年威尔逊等人给出了有关这种海洋热能转换（OTEC）装置的文献及其在铺设期间的动力研究结果。

除了以上这些海洋结构外，还有混合式平台、单锚腿和单浮筒系泊系统以及诸如图1.9所示的顺应式微波传送塔。将来有可能建造发电厂和游乐园用的漂浮岛，甚至可以建造浮冰平台（Young, 1981年）。不过，我们现在回到本书的主题上来，即回到海洋固定式结构动力分析的基本原理上来。

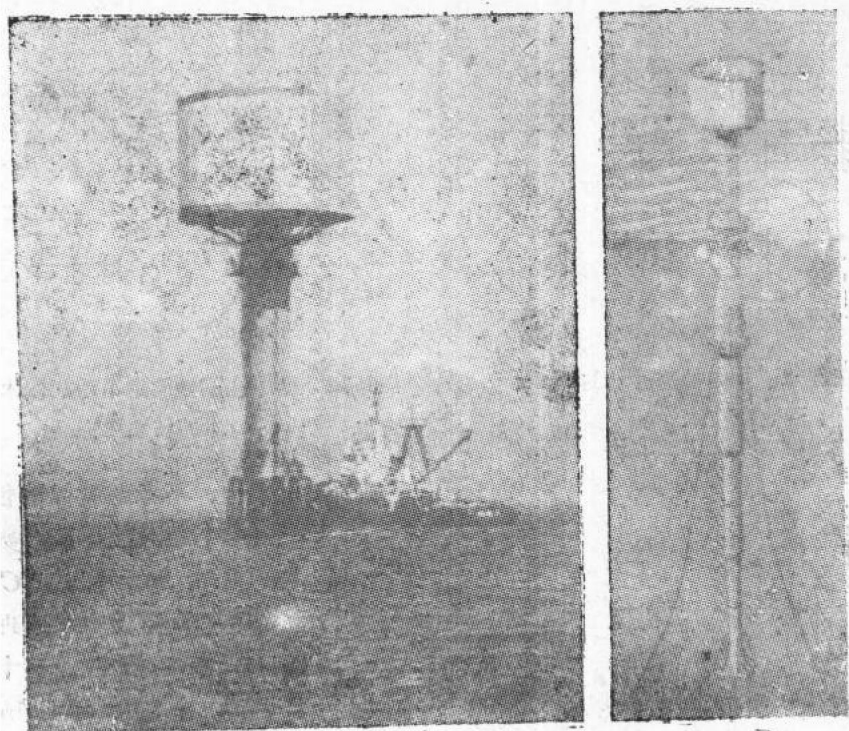
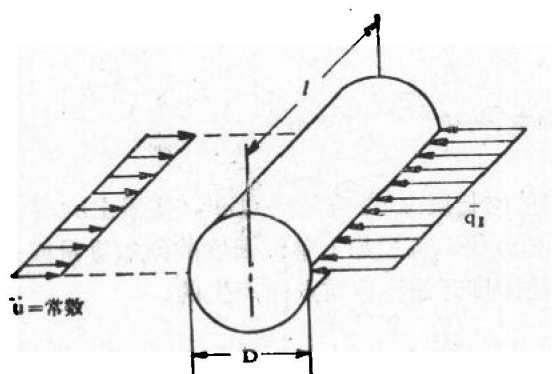


图1.9 海上微波站（制造者-东京三菱和业主日本公用电报电话公司提供）

§1.2 固体——流体相互作用参数

现在关于作用到动力流场内处于运动或静止固体上的力的理论及其测量方面的文献很多，1981年，Sarpkaya和Isaacson对十九世纪初期至1981年期间这方面的著作进行了杰出的综述。现在人们把重点放在目前理解的表征动力荷载的基本物理概念和无因次荷载参数上，而这里仅仅讨论孤立的完全潜入流体中的圆柱体，相对于该固体，流体的入射速度与其纵轴相垂直。在图1.10~1.13中所考虑的平面流的条件下，液体或圆柱的运动与其单位长度的力 $\bar{q}$ 一致。假定流体是不可压缩的，而且暂不考虑附近物体以及固体的边界效应。尽管这些假设条件看来是一种限制，但对大部分海洋结构物及其构件来说，所得结果是能描述流体荷载的基本概念的，其中包括管线、锚缆、管状结构构件和许多种水下油罐和沉箱。



l/D	C_M
1.2	1.62
2.5	1.78
5.0	1.90
9.0	1.96
∞	2

图1.10 在理想加速流体内刚性固定不动的圆柱体

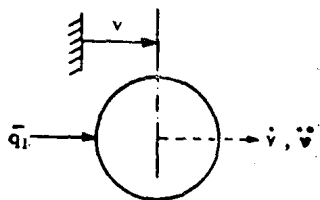


图1.11 在理想流体内加速运动的刚性圆柱体

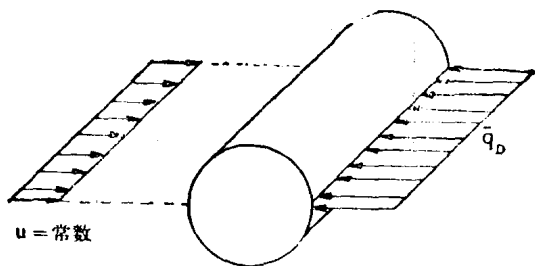


图1.12 作用在刚性固定不动圆柱体上的粘性阻力

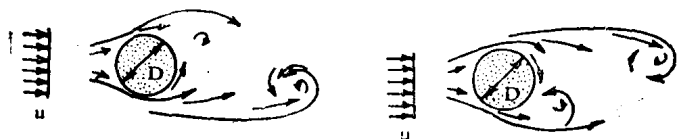


图1.13 在固定的刚性圆柱体后面产生的周期性涡街

一、不考虑流体粘性时的常数

一个经典的荷载参数是惯性系数 C_M (还可表示为 C_r 或 C_i)，这个参数是随着流体动力学或理想的非粘性流动理论产生的，并在十九世纪和二十世纪初提出的 (Lamb, 1945年)。在一种均匀流体内，即自由来流加速度 $\dot{u}$ 为常数时，为保持刚性圆柱体静止不动，该系数与单位长度圆柱体所要求的力 $\bar{q}_l$ 有关，也就是

$$\bar{q}_l = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \dot{u} \quad (1.1)$$

式中 ρ ——流体密度； D ——圆柱体直径。图1.10绘出了非脱体、非定常、理想流的情形，并列出了对应于几个长度与直径比 l/D 的 C_M 值，这是 Wendel 在 1950 年得到的结果。这些结果是依据另外一个无因次参数，即附加质量系数 C_A 的理论值求得的。 C_A 由下式定义：

$$C_A = C_M - 1 \quad (1.2)$$

对此，在后面将进行详细讨论。可以看出，由于圆柱体的长度比其直径得很多，当 C_A 趋于 1 时， C_M 的值趋于理论极限值 2。

现在考虑图1.11刚性圆柱体的情形。其单位长度质量为 $\bar{m}_0$ ，在静止流体介质中作水平位移 $v = v(t)$ 。根据牛顿第二运动定律和流体动力学理论，导出使固体产生加速度 $\ddot{v}$ 所需要的单位长度上的力为：

$$\bar{q}_l = \left(\bar{m}_0 + C_A \rho \pi \frac{D^2}{4} \right) \ddot{v} = \bar{m} \ddot{v} \quad (1.3)$$

利用公式 (1.3) 可以求出圆柱体的单位长度上的有效质量 $\bar{m}$ ，实质上 $\bar{m}$ 等于单位长度物体的实际质量 (物体在真空中时，比值 $\bar{q}_l / \ddot{v} = \bar{m}_0$) 加上单位长度的附加质量或表观质量 $C_A \rho \pi D^2 / 4$ 。这种附加质量是由于浸入圆柱体排开的流体质点而产生的。

二、考虑流体粘性时的常数

在真实流体中测量表明，粘性常常影响参数 C_M 和 C_A ，因此这两个参数与时间有关。在圆柱体后面流动被分开，并伴随有阻止圆柱体运动的压差阻力，这种力称为形状阻力。在应

用中, 公式 (1.1) 和 (1.3) 可以采用测得的 C_M 和 C_A 均方根平均值。如果缺乏这种数据, 如果 l/D 比 1 大得多, 取 C_A 的值为 1 就可认为足够精确。

在经典流体动力学中的另外一个荷载参数是粘性磨擦阻力系数 C_D , 该系数与圆柱体保持静止状态所需的单位长度上的力 $\bar{q}_D$ 和定常来流速度 u 有关, 即

$$\bar{q}_D = C_D \rho \frac{D}{2} |u| u \quad (1.4)$$

在速度项中的一项使用绝对值符号就可保证 $\bar{q}_D$ 将始终与 u 的方向相反, 如图 1.12 所示。对于这种流动情况, C_D 与两个无因次参数, 即圆柱体的粗糙度和雷诺数的实验关系是众所周知的 (Schlichting, 1968 年)。在这里雷诺数由下式求得

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (1.5)$$

式中 μ ——流体的绝对粘度。对于受到这种流动作用的光滑的圆柱体, 当 Re 的范围为 1000 ~ 200,000 时, C_D 的值近似等于 1。

如果圆柱体绕其纵轴旋转, 或该柱体不是圆形的或者附近有其它固体构件或刚性边界, 就需要另一个荷载参数, 即升力系数 C_L 。在这情况下, 与 u 和 $\bar{q}_D$ 垂直的单位长度开力, 其形式与公式 (1.4) 相同, 在这里 C_L 不仅与固体的运动和邻近系数有关, 而且与圆柱体的粗糙度和流体的雷诺数有关。

在图 1.12 所示的流场内, 在静止圆柱后面既有分流形成, 又有周期性尾流或涡流形成。这种现象 Blevins 在 1977 年作过广泛讨论, 见图 1.13。在圆柱体后面旋涡交替脱离, 而且从上至下伴随有以单位时间 f 周的特征频率的周期性压力波动。在雷诺数为 60 ~ 10,000 或更高一些时●出现这一情况。与图 1.13 流体旋涡脱落数据相关的无因次参数是 Strouhal 数, 见下式

$$S = \frac{f \cdot D}{u} \quad (1.6)$$

一般说来, S 与雷诺数密切相关, 例如 1971 年 Wilson 和 Caldwell 报告了对圆柱体旋涡脱落频率有明显影响的 Re 与 S 的关系; 该报导中的圆柱体是处于一个双联圆柱体和一个地平面附近。在任何情况下, 周期性旋涡引起的对圆柱体结构的作用力都会很大, 足以将结构毁坏。人们知道, 由垂直圆柱桩支持受到约 2 节流速的海流作用的海洋码头可以被旋涡彻底摧毁。因为这种作用力是不可预计的, 因此最好是将其避开。虽然提出了许多消除旋涡的方法 (Hafen 等人, 1976 年), 但一个特别实用的方法是在圆柱体周围绕上螺旋箍, 见图 1.14 所示。

最后一个突出的无因次流体——荷载参数是 Keulegan-Carpenter 数 K_c , 这是在周期性平面来流作用到静止圆柱体上时出现的。如果 u 和 $\dot{u}$ 都不是常数, 但可以用时间周期为 T 的单个简单平面波描述, 那么 K_c 与作用到圆柱上的力的数据密切相关, 这个参数为

$$K_c = \frac{u_0 T}{D} \quad (1.7)$$

式中 u_0 ——波浪速度幅值 (Keulegan 和 Carpenter, 1958 年)。

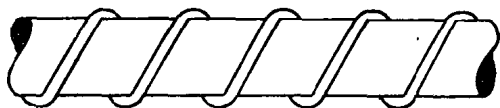


图 1.14 带有消除周期性旋涡的螺旋箍的圆柱体

●游泳的人能观察到这一现象, 例如将手指散开在水中沿水平方向让手活动, 就感到有一种手指垂直振动的倾向。

三、简单流速的叠加

对于在来流的流速 $u=u(t)$ 为任意值的平面流场内的一个静止圆柱体，人们总想通过公式 (1.4) 和 (1.1) 的阻力与惯性荷载相加，即把图1.10和1.12所描述的两个流动叠加起来，以得到单位长度圆柱体上随时间而变化的总荷载，即

$$\bar{q} = C_D \rho \frac{D}{2} |u| u + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \dot{u} \quad (1.8)$$

公式 (1.8) 是莫里森和其同事在1950年共同提出的，现在并冠以他的名字。如在第四章中所叙述的那样，这个公式也可以根据线性流体动量守恒原理推导出来。

根据英国船舶研究协会 (1976年) 和 Sarpkaya 与 Isaacson (1981年) 搜集到的大量实验结果，很显然， C_D 和 C_M 并不是简单的常数。然而对于所作用的周期性平面流，如果选定均方根值的每一个时间间隔与流动的周期相比足够长，看来 C_D 与 C_M 至少是3个参数的函数，即

$$\begin{aligned} C_D &= C_D (Re, K_c, \text{圆柱体粗糙度}) \\ C_M &= C_M (Re, K_c, \text{圆柱体粗糙度}) \end{aligned} \quad (1.9)$$

值得注意的是 Sarpkaya (1976年) 提出用频率参数 β 在以上关系式中代替 Re ，在此

$$\beta = \frac{Re}{K_c} = \frac{\rho D^2}{\mu T} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} C_D &= C_D (\beta, K_c, \text{圆柱体粗糙度}) \\ C_M &= C_M (\beta, K_c, \text{圆柱体粗糙度}) \end{aligned} \quad (1.11)$$

这一替换的主要优点是周期性速度的来流幅值 u_0 在公式 (1.11) 的每一个函数中只出现一次，而不是在公式 (1.9) 的每个函数中出现两次。对于周期性流动来说，这一替换可能便于在圆柱体受力的实验数据与周期流动的 C_D 和 C_M 之间建立更为有效或系统的关系。在这两个函数关系中被忽略不计的现象有气蚀、流体的压缩性、三维流动、相邻物体的影响和圆柱体的各种各样的运动。

一个振动圆柱体的例子：如果没有描述移动或振动固体的流体荷载，如海洋平台的水下管状构件，上面叙述的固体——流体相互作用参数是不全面的。这里所涉及的基本物理特点可以用简单的数学模型来研究。现在研究一个任意的来流的水平流速度 $u=u(t)$ ，该速度与图1.15所示的刚性圆柱体的平移运动 $v=v(t)$ 一致。假设表征结构材料线性粘滞阻尼的常数是 $\bar{c}$ ，用常数 $\bar{k}$ 描述线性弹性约束刚度，包括与其相连的结构以及可能的土壤的边缘效应在内，那么与圆柱体运动方向相反的力分别是单位长度的力 $\bar{c}\dot{v}$ 和 $\bar{k}v$ 。像1974年 Berge 和 Penzien 建议的那样，可以修改莫里森方程，即公式 (1.8)，以得到单位长度的有效荷载，即

$$\bar{q} = C_D \rho \frac{D}{2} |u - \dot{v}| (u - \dot{v}) + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \dot{u} \quad (1.12)$$

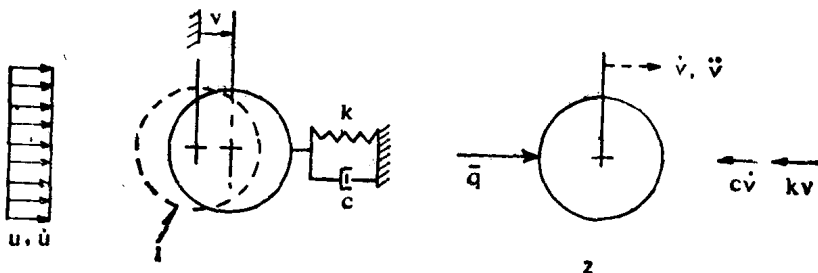


图1.15 表示流体结构相互作用特点的圆柱体模型

1—静平衡；2—隔离体图

式中的阻力项取决于流体和圆柱体之间的相对速度 $(u-\dot{v})$ ；包含 C_M 的项可仅从流体的运动得到，其中 $\ddot{u}$ 为流体的绝对加速度。对于具有虚质量 $\bar{m}$ 的圆柱体，如图1.15所示的隔离体，应用牛顿第二定律，并利用方程 (1.3) 和 (1.12)，就导出如下结果：

$$\left(\bar{m}_0 + C_A \rho \pi \frac{D^2}{4}\right) \ddot{v} + \bar{c} \dot{v} + \bar{k} v = C_D \rho \frac{D}{2} |u - \dot{v}| (u - \dot{v}) + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{u} \quad (1.13)$$

可以看出，由于阻力项的原因而使得方程 (1.13) 变为非线性方程。对于圆柱体的“小”扰动，可以用一个如下的新的阻力系数 C'_D 来求得阻力项的近似值：

$$C'_D = C_D |u - \dot{v}| \simeq \text{常数} \quad (1.14)$$

利用这一假设，方程 (1.13) 就变为

$$\left(\bar{m}_0 + C_A \rho \pi \frac{D^2}{4}\right) \ddot{v} + \bar{c} \dot{v} + \left(C'_D \rho \frac{D}{2}\right) \dot{v} + \bar{k} v = C'_D \rho \frac{D}{2} \dot{u} + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \ddot{u} \quad (1.15)$$

方程 (1.15) 很清楚地表明，由于流体阻力而使一个运动着的圆柱体的阻尼增加，实际上这个阻力通常比起结构的内部阻尼效应 $\bar{c}$ 来将占压倒优势。对于非线性阻尼的模型也得到了同样的结论。

这样，要解方程 (1.13) 或 (1.15) 中的结构位移 v ，必须知道4个结构参数： $\bar{m}_0$ 、 D 、 $\bar{c}$ 和 $\bar{k}$ ；流体密度 ρ 和自由流流场 $u(t)$ 和3个经验常数 C_A 、 C_D 及 C_M 。在后面的几章里，将估算各种特殊情况下的 $\bar{k}$ 和 $\bar{c}$ ，并将更详尽地讨论后面的3个经验常数对波浪的依赖关系。下面简要地介绍影响海洋结构运动的其他环境因素。

§1.3 环 境 力

有几种环境因素控制着海洋结构的动力设计。对于浮式和桩腿固定的结构来说最重要的是定量地描述第三章和第六章所讨论的冲击波浪运动。对于固定式海洋结构尤为重要是在土壤基础处对结构的约束，这种约束限制重力式平台的摇摆与滑移运动，并限制桩基结构的横向移动。在第二章里概述了这类约束，至于桩的特性将留在第十二章中加以详细讨论。具有腐蚀性的海洋环境对海洋结构的影响有几种方式，其中包括海洋有机物产生的污损，砂粒造成的磨损，海流对土壤基础的冲刷等，这一切对结构的耐久性都将产生不利的影响。与动力腐蚀疲劳寿命有关的结构可靠性分析将在第十三章详细研究，但是根据本书结构动力学这一名称，叙述腐蚀、磨损、冲刷和海洋生物等引起的结构损坏则不属本书的内容 (Gaythwaite, 1981年)。本章主要讲述风、海流和地震引起的结构荷载和由于波浪拍击和浮冰引起的冲击荷载。全书通过例题用特定的结构动力学数学模型推导并解释了由这些环境力引起的结构响应。下面较详细地讨论人们对环境荷载、浮力和重力的最好的理解。

一、浮力与重力

众所周知，要举起一个重物时，在水中比在空气中容易得多。这是由于水的压力产生了作用于潜在水中物体上一个向上的静力或浮力。希腊数学家阿基米德（公元前287—212年）用很准确的语言叙述了这个原理：