

海洋工程 结构力学

陈铁云
陈巍旻 邵文蛟 吴水云
著



海洋工程 结构力学

第四版

周敏强 周玉明 周成元

1



海洋工程结构力学

陈铁云
吴水云 陈巍旻 邵文蛟 著

大连理工大学出版社

内 容 提 要

作者积 40 余年结构力学的教学经验与近 10 年来从事近海平台结构强度研究的心得体会, 结合国内外学者的大量研究成果, 编著了这本教材。

本教材主要介绍结构力学的基本理论与方法以及它们在各种型式结构分析上的应用; 在结构响应方面, 主要讨论静力响应及结构稳定性和极限承载能力; 对离岸结构中一些重要的特殊问题, 如线状结构、管状接头及地基基础等也专门列出章节进行讨论。

全书共分十章, 前七章属基本内容, 可作为本科生教材, 后三章专题性较强, 有些是作者近年来的研究成果, 适宜作为研究生的教材或供大学本科高年级学生选读。本书亦可作为造船、土木、航空、机械等系的高年级学生的选修课教材, 也可供有关专业的工程技术人员和科研人员参考。

海洋工程结构力学

Haiyang Gongcheng Jiegou Lixue

陈 铁 云

吴水云 陈巍旻 邵文蛟 著

大连理工大学出版社出版发行 (邮政编码: 116024)

(出版社登记证号[辽]第 16 号) 大连理工大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10 1/8 字数: 263 千字

1991 年 8 月 第 1 版 1991 年 8 月第 1 次印刷

印数: 0001—1500 册

责任编辑: 王世连

封面设计: 葛 明

责任校对: 宋玉珠

ISBN 7-5611-0444-8/U · 21 定价: 3.12 元

前 言

我国有 23 000 余公里的海岸线以及区域广阔、水深在 200 米以下的大陆架,海洋资源十分丰富。近二十年来,我国对海洋开发事业投入了相当多的人力与物力,尤其对近海石油资源的钻探与开采更给予高度重视。与此相应,各高校的造船、土木等系都纷纷成立海洋工程专业,开设了海洋工程结构力学课程。但至今为止,尚未见到一本公开出版的教材。为此,笔者积四十余年结构力学的教学经验与近十年来从事近海平台结构强度研究的心得与体会,结合国内外学者的大量研究成果,编写了这本教材。

本教材主要介绍结构力学的基本理论与方法,即力法、位移法、能量原理与变分法、矩阵法与有限元法等以及它们在各种类型的结构分析上的应用。在结构响应方面,主要讨论静力响应及结构稳定性和极限承载能力。对离岸结构中一些重要的特殊问题,如线状结构、管状接头及地基基础等专门列出章节进行讨论。本教材力求体系的完整性,从各种海洋工程结构的分类与特点,海洋工程结构所承受的外载荷及结构的静力响应,承载能力到特殊结构——管状接头的疲劳分析等,均有涉猎。

全书共分十章。前七章属基本内容,可作为本科生教材;后三章专题性较强,有些是作者近年来的研究成果,适宜作为研究生的教材或供大学四年级学生选读。本书亦可作为造船、土木、航空、机械等系的高年级学生的选修课教材。

本书编写人员分工情况如下:陈铁云编写第二、八、九章;陈巍旻编写第一、六、十章;吴水云编写第三、四、五章;邵文蛟编写第七章。全书最后由吴水云,陈巍旻修改、校核,陈铁云审定。

本书大纲早在四年前便已拟就，当时得到杨文华副教授的大力协助，后因她工作繁忙，未能参与编写工作，但她的宝贵意见对本教材的编写起了很大作用，特此表示感谢。从书中所列的参考文献目录可以看出，笔者近年来所指导的各位研究生的出色的工作，大大充实了本书的内容，为本书增色不少，笔者愿在此向他们表示谢意。另外，在本书编写过程中，在选题、内容以及最后定稿方面，都得到大连理工大学金在律教授的大力帮助与支持。陈铁云教授的博士研究生张惠元同志，在出版过程中对书稿认真进行了通读、校对及修改，在此一并表示衷心的感谢。

陈 铁 云

1989 年 12 月于上海交通大学

目 录

前 言	1
第一章 绪 论	1
§ 1.1 海洋环境	1
§ 1.2 海洋结构物	6
§ 1.3 海洋工程结构力学的研究内容	10
第二章 设计载荷	12
§ 2.1 概述	12
§ 2.2 风载荷	13
§ 2.3 波浪载荷	14
§ 2.4 流载荷	28
§ 2.5 冰载荷	29
§ 2.6 泥载荷	30
第三章 杆系结构矩阵分析	32
§ 3.1 矩阵法	32
§ 3.2 桁架结构分析	49
§ 3.3 刚架结构分析	57
第四章 平板弯曲静力分析	63
§ 4.1 概述	63
§ 4.2 刚性板弯曲的微分方程式	64
§ 4.3 刚性板弯曲的解	70
§ 4.4 刚性板弯曲的能量解法	76
§ 4.5 刚性板弯曲的有限元法	81
§ 4.6 正交异性板的弯曲	90

第五章 圆筒形薄壳的静力分析	96
§ 5.1 概述	96
§ 5.2 圆筒形壳的基本理论	98
§ 5.3 圆筒形壳的无矩理论及其解	111
§ 5.4 圆筒形壳的有矩理论及其解	119
§ 5.5 圆筒形薄壳的有限元解法	129
§ 5.6 加筋圆筒形壳的结构分析	136
第六章 线状结构分析	145
§ 6.1 概述	145
§ 6.2 系泊与拖曳缆索系统	147
§ 6.3 海洋立管分析	158
§ 6.4 海洋管道的静力分析	167
第七章 结构稳定性分析	178
§ 7.1 概述	178
§ 7.2 求解临界荷重的几种方法	181
§ 7.3 杆与杆系结构的屈曲	185
§ 7.4 在均布外压作用下圆环的屈曲	188
§ 7.5 矩形板的屈曲	189
§ 7.6 圆筒形薄壳的屈曲	192
§ 7.7 加筋圆筒形薄壳的屈曲	199
第八章 结构极限设计	205
§ 8.1 概述——极限载荷设计的原则	205
§ 8.2 结构的极限分析	207
§ 8.3 连续梁的极限分析	210
§ 8.4 刚架的极限分析	213
§ 8.5 板架的极限分析	217
§ 8.6 平板的极限分析	220
第九章 近海平台管状接头强度	236
§ 9.1 引言	236

§ 9.2 管状接头静强度	238
§ 9.3 管状接头塑性极限分析	253
§ 9.4 管状接头应力集中系数	265
§ 9.5 管状接头疲劳分析	276
第十章 近海平台地基基础分析	284
§ 10.1 概述	284
§ 10.2 导管架平台管桩基础分析	289
§ 10.3 重力式平台底座分析	301

第一章 绪 论

§ 1.1 海 洋 环 境

1. 海洋资源及其开发

人类赖以生存的地球表面的 70.8% 是广袤的海洋，而陆地面积只约占地球表面积的 30%。随着人类文明的发展，陆地资源（包括各种动植物资源、矿产资源等等）被大量开采、消耗，许多自然资源在陆地已日渐枯竭。与之相比，人类对海洋资源的开发利用还相当有限，因此，海洋被称为人类残存的宝库。人口的急剧膨胀与现代文明的飞速发展，使人类面临着资源不足与空间不足的危机。因此，海洋资源与海洋空间的开发与利用，成为我们今天面临的重要课题。

广阔的海洋蕴藏着极为丰富的自然资源。海洋中大量的水产生物可以为人类提供丰富的蛋白质，海底的矿产资源则更是令人神往。据推算，许多重要的金属矿产资源在海底的储藏量大大超过陆地，如表 1-1 所示。特别是在水深为 3500~4500m 的海底表面，分布着厚度达 1m 左右的锰结核层，更是海洋中最宝贵的矿产资源之一，开采价值极高。锰结核直径为 0.5~20cm，其成分包括锰（57~76%）、镍（0.06~2.37%）、钴（0.008~2.09%）、铜（0.013~2.92%）等。锰结核年年都在不断生长，因此是永久性资源。海底沉积盆地中含有丰富的石油、天然气资源，据统计，1968 年沿海大陆架所产石油已达全球原油产量的 17%，1980 年更高达 35%。此外，体积达 $1.37 \times 10^7 \text{km}^3$ 的海水本身及其所含物质也是

一项丰富的资源，除了海水淡化、制盐以外，还可以从海水中提取原子能工业的重要原料铀与重氢。潮汐、海流、波浪、温差、盐度差等又是可供开发利用的巨大的能源。

表 1-1 海洋中部分金属储藏量

元素	储藏量 ($\times 10^{12}\text{t}$)	与陆地储藏量之比 (倍数)	锰结核生长量 ($\times 10^6\text{t/年}$)
锰	358	4000	2.5
铁	207	4	1.4
钴	5.2	5000	0.036
镍	14.7	1500	0.102
铜	7.9	150	0.005

海洋开发的内容除了海洋自然资源开发以外，还应包括海洋运输（如水面运输、水下运输以及通过海底电缆、光导纤维所进行的信息与能量传递，通过海底管道所进行的石油、天然气输送等等）、海洋勘探与测量、海洋环境保护及海岸带的开发等。为了开发海洋，我们必须首先了解海洋环境。

2. 海底地形构造

海底地形与陆地一样，也由山、谷或盆地、台地、平原等构成。在太平洋、大西洋、印度洋中，巨大的海底山脉大致呈南北走向。与海底山脉走向大致相同的有海底深谷，如玛丽阿娜海沟、日本海沟等。海沟中更深的部分称海涧，如玛丽阿娜海沟中的斐查兹海涧，海下深度达 11 034m，这一数字超过了世界第一高峰珠穆朗玛峰的高度，是世界海洋目前已知的最深点。

图 1-1 所示为两种典型的海底形状剖面图，分别称为大西洋型和太平洋型。前者结构简单，后者结构复杂。海底地形大致分成大陆边缘部（又称大陆边缘台阶或大陆台阶）、大洋盆地及中央海岭。大陆边缘部又分成大陆架，大陆坡和大陆架海隆。从海岸低潮线到水深 200m 左右（离海岸约 5~200km）呈 1/500~1/1000 平线倾斜的地区为大陆架；由大陆架延伸到水深 1500~3500m 呈 1/10~1/40 倾斜的为大陆坡；再接着往外是呈 1/50~1/1000 平

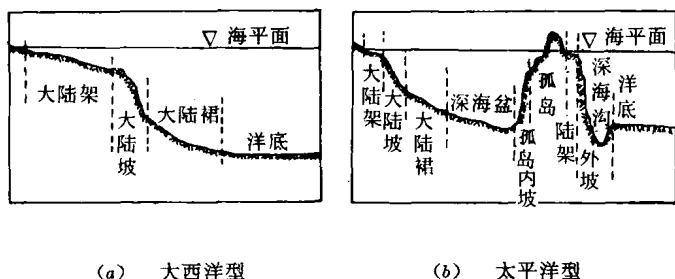


图 1-1

缓倾斜的大陆架海隆。在大陆架有相当于陆上溪谷的海谷，大陆架与大陆坡之间有边缘海台地。大洋盆地与大陆架海隆相连，包括平坦的深海平原，形似丘陵的深海丘和深海海隆。大洋盆底上有孤独耸立的海山。太平洋中海山山顶受波浪影响多遭侵蚀，形成平顶海山或称海底平顶山。中央海岭是海底的大山脉。

由于大陆架离海岸最近，坡度平缓，水深较浅，又有较为丰富的油气田资源，因而是目前人类开发海洋活动最为频繁的区域。表 1-2 为有关大陆架的基本参数，图 1-2 为根据人工地震测出的大陆架基底形状的两个典型剖面。各层的物质构成为：

表 1-2 大陆架基本参数

大陆架		最大宽度 (km)	平均宽度 (km)	外缘最大深度 (m)	平均深度 (m)	平均坡角
中国	黄海、东海	1360		140	45	0°02'
大陆架	南海	278 (珠江口外)		150—200	50~70	<0°05'
世界大陆架		>1300	75	600	60	0°07'

I) 表层：松散沉积物，由来自陆地的碎屑及原地和异地产生的海成碎屑物（包括生物碎屑和岩石碎屑）构成。在一些地区有可见基岩出露。

II) 盖层：半固结岩石，为带有众多层理的陆架表层松散沉积物，往下过渡为半固结和固结沉积岩层。其厚度因地而异，从

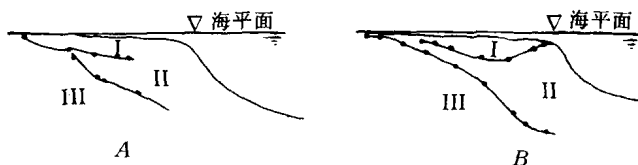


图 1-2

几百米到 5 公里（波斯湾）甚至 15 公里（墨西哥湾）不等。

Ⅲ）基底层：结晶岩石，是古老的陆架基底层，与盖层一般有明显的不整合，有着与相邻陆地同样的岩层，往往是相邻陆地岩层的延续。基底层又分结晶基底，褶皱基底和大陆盖层基底。

3. 海风、海浪和海流

1) 海风 一般来说，在海上无遮蔽时的风速通常比陆上的要大，使用陆上的风速资料设计外海结构物时必须加大一个比例。参考《美国海岸保护规则设计手册》^[5]大致可取表 1-3 给出的比例系数。风速与高度的关系可参考图 1-3 所示的曲线（图中取基准高度 $z_0 = 10\text{m}$ ）。

表 1-3 内陆、外海的风速与海岸风速的比例

观 测 点	内陆	海岸	外海
风向			
海 → 陆	0.8	1.0	1.2
陆 → 海	—	1.0	1.4

2) 海浪 海洋波浪是由具有多种波高、周期和相位等的波浪组成的合成波，波浪的行进方向（波向）也不完全相同，对这种复杂的海洋波浪，一般用统计分布或波谱表示。在海洋结构物设计中则往往采用最大波高 $H_{\max}$ 和最大周期 $T_{\max}$ 及有效波高 $H_{1/3}$ 和有效周期 $T_{1/3}$ 等特征值。最大波高和最大周期一般用于描述观测期间的最大波或是取累积频率为 50 年或 100 年一遇的最大波。

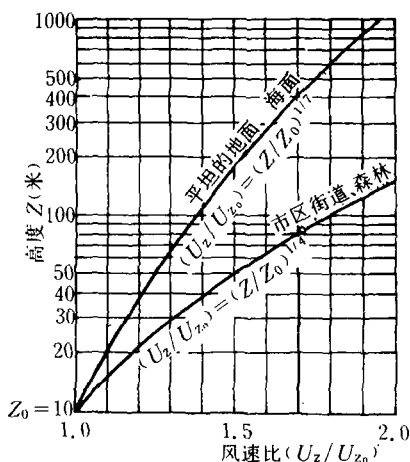


图 1-3

有效波高和有效周期则是把波浪观测资料按大小排列，从大的方面取出 $1/3$ 个波数的波高和周期的平均值。因为它与目测值相近，故被广泛采用。与之相似，从观测资料中取出前 $1/10$ 个大波平均而得到的波，称为 $1/10$ 大波。

3) 海流和潮流 在海洋中方向近乎一定的水流称海流。有时，海流在一星期左右就改变方向，或因季节不同而沿完全相反方向流动，但海流不象潮流那样随天体运行而规则地改变流向。海流是由环绕地球的大气环流所造成的顺流，并受地球自转产生的柯氏力、大陆岸及局部海水密度差的影响。如海流的两岸强化现象（即在大洋的西测窄而强，在东测则宽而弱）就是由于地球由西向东的运转及大洋西海岸的存在而引起的。海流有很多种，如由风吹形成的漂流，由海水密度差形成的密度流，由海中压力坡降力与柯氏力形成的地转流等等。由于海流的存在使周围海水产生的流动称补偿流。我国东部海洋中的黑潮，是世界上主要的海流之一，也是海流两岸强化的典型例子，其流速达 $1 \sim 5 \text{ kn}$ ，流量达 $30\,000\,000 \sim 50\,000\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，流动深度为 $200 \sim 400 \text{ m}$ ，在我国台

湾以东洋面，其宽度约为 100~200km。

潮流与海流不同，它是由潮汐引起的。潮汐的起因是月亮、太阳及其它行星作用于地球的万有引力。故潮流有明显的周期性，其周期约为 12 小时 25 分。潮流在海峡与水道中的流速较大，最高可达 10kn 左右。

§ 1.2 海洋结构物

1. 海洋结构物的定义

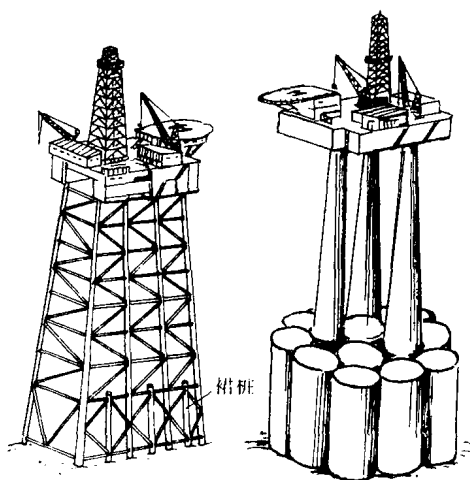
从广义上说，因海洋开发需要而建造的结构物都是海洋结构物。由于海洋开发本身的含义就相当广泛，因此，堤岸、海底隧道、深水港口、石油钻井平台、海洋贮油罐、海上机场、海上城市、海底管线、各种船舶等等，都属于海洋结构物。但是，由于港口工程与船舶工程等作为独立的学科分支已经得到充分的发展，本书所讨论的海洋结构物将是狭义的离岸工程结构物，其中包括各类固定式、移动式海上平台结构、深潜耐压壳结构及各类柔性构件（如缆索、海洋管道、立管等），这些海洋结构物与陆上结构或船舶结构相比，具有明显的特殊性，因此，海洋工程结构力学在工程结构力学领域占有独立的地位。

2. 海洋工程结构物分类

海洋工程结构物种类丰富，形式各异。从结构力学分析的角度出发，可以按结构形式的特点将它们分成固定式结构、移动式（漂浮式）结构、顺应式结构和线状结构等四大类。

1) 固定式结构 固定式结构以各类固定式海洋平台为主，一般有导管架式平台和重力式平台两种类型，如图 1-4 所示。导管架式平台是由各种管件构成的空间桁架或刚架结构，打桩船将管桩穿过平台空心立柱打入海底土层，桩腿深度一般为 50~100m 左右。因此，导管架式平台适用于作业区海底为软土的情况。若海底为硬土，无法打桩，则可采用重力式平台。重力式平台一般用

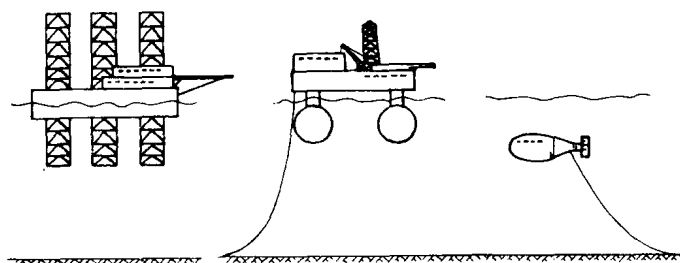
水泥建造，它依靠自身重量站立于海床上。显然，固定式平台尽管有良好的定位性能，但却受水深的限制。若在深水海域采用这类固定式平台，其结构将庞大无比。世界上最大的导管架式平台工作水深 300 多米。建造时耗用钢材近 6 万吨。一般而言，固定式平台适用于工作水深在 100 米以内的场合。此外，固定式平台机动性较差，一般不适宜用作钻探平台或早期试生产平台。



(a) 导管架式平台 (b) 重力式平台

图 1-4

2) 移动式结构 移动式结构分漂浮式、半潜式、潜水式三类，如图 1-5 所示。在海洋工程结构中，潜水式移动结构



(a) 漂浮式 (b) 半潜式 (c) 潜水式
(自升式平台处于漂浮状态)

图 1-5

以各类深潜器为主，漂浮式结构主要指各类钻井船。半潜式平台

的出现晚于固定式平台，是海洋开发向深水海域发展的产物。半潜式平台工作时漂浮于水面，依靠锚、缆、索等系泊装置定位，因此适应水深较大的工作环境。为了使平台在风、浪、流等作用下的运动不超过作业所允许的限度，半潜式平台水线面较小，其排水量集中在水下的浮体上。自升式平台在移动位置时为漂浮式结构（图 1-5（a）），而在工作时依靠桩腿着底定位，与固定式平台相似。自升式平台定位时，灌满水的平台依靠巨大的齿轮齿条机构沿桩腿爬高，桩腿同时伸向海底，直至在平台巨大的自重力作用下插入海底固定于较硬的土层上。移动时，将水排空的平台桩腿向水下爬行，平台所受浮力迅速增大，最后将桩腿从海底收起，这时，平台漂浮于水面，依靠拖轮或本身的动力在水面移动位置。由于移动式平台机动性较好，一般常用于作业点经常变换的钻探工作。

3) 顺应式结构 顺应式平台结构介乎可动与固定之间，它在固定的基础上，允许平台在有限的范围内运动。目前常见的顺应式结构有牵索塔式平台和张力腿式平台，如图 1-6 所示。

牵索塔式平台固定于海底后，通过各个方向布置的牵索来限制塔身的摆动幅度。在牵索靠近海底部分，吊有重块，而后才与锚连接（图 1-6（a）），这样便构成了所谓的双重约束锚泊系统。在正常工况下，重块沉在海底，牵索中的张力便可限制塔身的测向运动幅度。在恶劣的海况下，塔身摆动幅度增大，重块被牵索拖离海底，这时，整个系统通过重块的摆动来吸收外载的能量，而不致使牵索内的张力过高。一般认为，牵索塔式平台适用于水深 600m 左右的海域。

张力腿式平台的垂向构件固定于海底，其水中的上部结构设计得十分丰满，因此，整个结构所受的浮力远大于结构本身的重量，使所有水下的垂向构件均处于受拉状态，故称为张力腿。当平台在外载作用下发生测移时，张力腿中的内力增大，使结构的运动受到限制。一般认为，张力腿式平台可适用于水深接近 1000m