

海洋工程 环境条件 及其荷载

HAIYANGGONGCHENG
HUANTINGTIAOJIAN
JIQIHELAI

孙意卿 编著



上海交通大学出版社

341101

海洋工程环境条件及其荷载

孙意卿 编著



上海交通大学出版社

内 容 提 要

随着海上油、气等资源的逐步开发和海上交通运输业的不断发展，对海洋工程环境条件及其荷载的分析研究也日益受到人们的重视。

本书主要论述与近海工程建筑物(包括固定式和浮动式)有关的海洋水文、气象(风、海浪、海面高程、海流、泥沙和海冰)等环境现象的物理特征、形成机理以及它们对海洋工程建筑物的作用，介绍了环境荷载分析的基本原理和方法。全书共分七章，反映了该领域内基本理论的要点，侧重于各种理论在工程中的实际应用。

本书对海洋工程、船舶工程、港口工程、水文气象等专业的师生和科研、设计人员均具有参考或借鉴作用。

海洋工程环境条件及其荷载

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：上海交通大学印刷厂

开本：850×1168(毫米)1/32

印张：10.875 插页：(2页)

字数：280000

版次：1989年12月 第1版

印次：1989年12月 第1次

印数：1—860

科目：207-306

ISBN7-313-00481-8/P·73

定价：2.45元

前 言

近数十年来，由于海上油、气资源的不断发现、海上交通运输业中的系靠码头逐渐向外海、深水海域推进以及海上军事活动的近代化发展等客观形势，使国内外学术界、工程界对海洋工程环境条件及其荷载的研究给予了高度的重视，并取得了相应的研究成果。

由于海上水文、气象及地质等方面的环境条件比较复杂，为了建造安全、可靠和耐用的海上采、储、运等各类海洋工程建筑物需要花费较高的投资，从而形成海上油、气产品的单价高于陆上产品。为降低海上油、气产品的成本，减少海洋工程建筑物的建造、维修费用，一些技术先进的国家都已致力于海上建筑物结构新型式研究及工程设计方法的改进：即对海洋工程的环境条件、环境荷载、工程总投资与结构物的可靠度进行综合的优化分析、以逐步代替传统的设计方法。鉴于海洋工程环境现象及其诱导的环境荷载都具有随机过程的特性，所以为实现设计方法的改进，首先就要用概率论中分析问题的方法去揭示诸多随机环境现象中的内在规律，以便为结构物优化设计提供基础性的资料。

回顾国际范围内海上石油、天然气工业发展的历史，海上石油作业平台结构物的工作水深是由浅海至深水迅速地发展着的过程，例如 1947 年美国在墨西哥湾建造第一座固定平台的水深才 4m，1955 年工作平台的水深可达到 30m，而到 70 年代，海上固定平台已经屹立在水深为 150m 的浩瀚大洋之中，而如今固定平台的水深已可达 310m，平台周围环境中的海浪高度已近 15m，如美国在 1978 年于墨西哥湾的密西西比海区建造的 Can Yon 平台就是其中一例。一般说来，海上平台的工作水深越大，海上环境条件就越复杂，诸多环境因素中，海浪对工程的影响也就更为

突出，工程建筑物的建造费用也会显著增加。工程结构物的型式不同，工程造价递增的趋势会有明显区别。图 0.1 列举了几种型式的固定平台造价与工作水深的变化趋势。

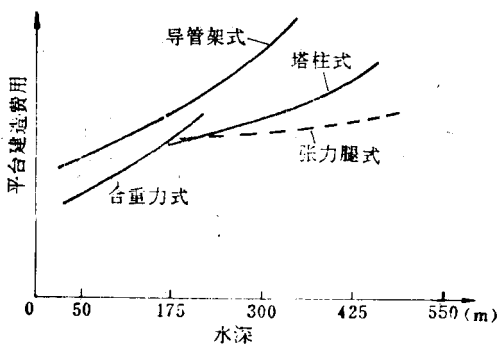


图 0.1 平台建造费用与型式

海域水深不同，建筑物的结构型式不同，海洋环境对结构物荷载的分析方法也会有所差别，而建筑物的建造费用大体说来总是与海洋环境荷载成正比的。本书把环境条件及由此而诱导的环境荷载联系在一起讨论和分析，更显示出它们在海洋工程结构物的设计和建造中的重要地位。图 0.1 反映了水深因素对工程造价的影响。除此之外，海域的地理位置，海底泥沙及地基性能等因素对工程的选址、建筑物的安全性等都会有程度不同的影响。限于篇幅，本书不包括地基性能方面的环境条件。

从国内外公布的资料中可以发现，在水深大于 300 米的海域建造海上固定式结构物所需要的费用是相当昂贵的，工程投资随水深而陡增。为克服上述弊端，各类海上浮式结构物被广为应用。浮式结构物的特点是建造费用较低、可以多次移位、重复使用，因而它在海上边际性油田、海港码头工程中都有较多的应用。由于海上浮式结构物在海浪作用下运动及外力的分析手段比较复杂，所以以往本科教材中涉及较少，随着计算机的普及和发展，目前

已形成了一些可以为工程设计界采纳的数值计算方法，将此内容中的基本原理和应用方法列入本科生的教材，将有利于逐步实现海洋工程设计工作的现代化。

本书第一章介绍了我国近海海域特点、海洋工程环境学的内容、学习本门课程的意义等；第二章为风及风荷载；第三章为海浪及其荷载，由于海浪是诸多环境现象中比较重要、而且复杂、又是工程界、学术界关心、研究最多的一类环境现象，所以，篇幅较多；第四章为水面高程，包括天文因素引起的潮汐现象及非天文因素引起的风暴潮和海啸；第五章为海流及泥沙运动；第六章为海冰及冰荷载；因为多种海洋工程环境条件设计要素的确定，都要涉及到各环境条件的长期（多年）分布规律，所以书中把长期分布的有关理论及使用方法另立一章，作为本书的第七章。

刘应中教授对本书的编写给以指导和仔细审阅，在此表示深切的谢意。

孙意卿

1989年10月

目 录

第一章 绪论

- § 1.1 我国海域概况·····(1)
- § 1.2 海洋工程环境学的内容·····(2)
- § 1.3 研究海洋工程环境条件的意义·····(4)
- § 1.4 海洋工程环境条件分析内容·····(6)

第二章 风

- § 2.1 风的成因及风系·····(11)
- § 2.2 大气运动方程及柯氏加速度·····(14)
- § 2.3 风速的计算·····(18)
- § 2.4 实测风速资料的统计分析与表达·····(30)
- § 2.5 风的紊动性与阵发性·····(34)
- § 2.6 风对建筑物的作用力·····(41)

第三章 海浪

- § 3.1 海浪的生成与发展机理·····(53)
- § 3.2 作为随机过程的海浪·····(59)
- § 3.3 波浪理论概述·····(99)
- § 3.4 利用风况资料推算海浪·····(114)
- § 3.5 波浪进入浅水区后的变形·····(127)
- § 3.6 波浪对建筑物的作用力·····(141)

第四章 水面高程变化

- § 4.1 潮汐·····(193)
- § 4.2 风暴潮·····(220)
- § 4.3 海啸及其他长周期水位变化现象·····(227)
- § 4.4 设计水位·····(231)
- § 4.5 我国沿海的潮汐现象·····(235)

第五章 海流及泥沙运动

- § 5.1 潮流····· (239)
- § 5.2 风漂流····· (246)
- § 5.3 我国海流····· (250)
- § 5.4 海流的实测分析····· (255)
- § 5.5 海流作用力····· (257)
- § 5.6 泥沙运动····· (258)

第六章 海冰

- § 6.1 海冰分类、冰的结构及物理特性····· (272)
- § 6.2 我国冰情····· (278)
- § 6.3 海冰的力学性能····· (281)
- § 6.4 海冰对建筑物的作用力····· (287)

第七章 长期分布

- § 7.1 概述····· (295)
- § 7.2 龚贝尔极值分布····· (299)
- § 7.3 皮尔逊Ⅲ型分布····· (312)
- § 7.4 韦布尔分布····· (322)
- § 7.5 对数正态分布····· (326)
- § 7.6 重现期 T_R 、遭遇概率 E_c 及生存期 L ····· (331)

- 参考文献····· (335)

第一章 绪 论

§ 1.1 我国海域概况

我国海域辽阔，北起渤海之滨，南达南沙群岛，跨越温带、亚热带及热带三大气候带，海岸线绵延长达 18,000 多 km。

我国的渤海、黄海和东海有时总称为东中国海，它的东面以朝鲜海峡与日本海分界，东南面的琉球群岛与太平洋隔开，西南伸至台湾海峡的北界（福建省的平潭至台湾省的富贵角）面积共约 118.6 万余 km^2 。东中国海地处中纬地带，具有温带海的性质，海洋状况的季节变化很大，尤其是北部海域和沿岸区域。

海域的水深情况：除了东南部有一狭长的西南-东北向的水域水深为 2000m 以上外，大部分地区水深都在 200m 以内，大陆架面积占整个海域面积的 80% 以上。东中国海所属的三个海区，渤海、黄海和东海中渤海的面积最小，水深最浅，平均约 20m。渤海海峡深度大多在 60m 以内。黄海的平均水深为 40m，大多不超过 60m，但中心部分地区，水深高于 80m 以上。东海的水深较大，平均为 349m，最深处在石垣岛附近，深为 2,719m。

在我国大陆的南面海域，西濒中印半岛，它的东南部通过巴士海峡、苏禄海、爪哇海和太平洋相通。面积约 270 万 km^2 ，统称该海域为南中国海或南海。该海域水深较大，平均为 1140m，中间深，四周浅，形成锅形的南海盆地。我国因石油生产工业的需要又分南海西部和东部，二者间以珠江口为界，北部湾位于南中国海的西北角，深度约为 100m。

在东中国海和南中国海之间有一个台湾海峡，深度大多在 100m 以内，西南部较浅，并有一个小于 20m 水深的台湾堆。

据中外地质学家估测和分析，我国海域蕴藏着丰富的油气资

源，早在 60 年代，我国就开始了渤海湾海底石油的勘探工作，20 余年来已相继开发了多个油田。80 年代初，我国又开始了南海油田的开发，多年来的生产形势，前景是十分良好的。为了提高我国勘探和生产海中石油和天然气的的能力，有关科学技术和生产部门正大力开展为开发海洋所需要的一系列科学研究工作。而海洋工程环境条件及其诱导的环境荷载的研究是其中的重要组成部分之一。

§ 1.2 海洋工程环境学的内容

与海洋工程有关的环境现象其内容是相当广泛的，例如气象学中的气温、气压、风等因素；海洋水文中的海浪、潮汐、海流、海啸、风暴潮、海冰等现象；海岸地理地貌及海底地基的本构特征及力学性能，海底泥沙的运移，海岸的变迁等，都属于海洋工程的物理环境。除此以外，海洋结构物的腐蚀现象属海洋工程的化学环境；结构物水下部分的海生物附着现象则属海洋生物学的研究范畴。为突出要点，本书主要讨论海洋物理环境学中结构与荷载及耐固性有关的环境现象。适当涉及海生附着物厚度对环境荷载的影响和金属结构腐蚀速度对结构强度的影响等。

图 1.1 形象地概括了海洋工程环境学的研究内容。

风、海浪、海流及海冰是诱导海洋工程结构物环境荷载的主要动力因素，本书将分章讨论它们的形成机理、预报方法及荷载分析的基本原理，由于这些环境现象都是随时间及空间不规则变化着的随机过程，所以不仅要研究一场风暴过程掀起的不规则海浪与结构物相互作用的短期过程，而且还要分析它们的多年变化规律（长期分布规律），这可以为结构物设计的优化分析提供必要的环境资料，并进一步确定各项环境条件的设计参数。因为多项环境现象都要进行长期分布的分析，为避免各章之间的重复，本书将长期分布的基本原理和分析方法另立一章。

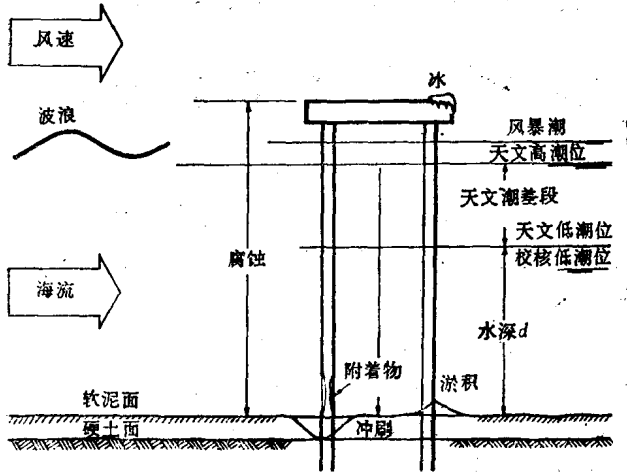


图 1.1 结构物的环境条件

固定式海洋结构物底部的泥沙冲淤现象，可能使结构物底部形成冲刷坑，使结构物前沿水深加大，甚至导致结构物可靠度的降低。因此，就要对泥沙启动及其运移的基本原理作适量的介绍。海底泥沙运动虽然对海上结构物有不可忽视的影响，但是，迄今为止，国内外成熟的研究成果公布得不多，这说明该领域尚有许多值得进一步研究的问题。

海上结构物的腐蚀及海生物的附着现象，属于海洋化学和海洋生物学的范畴，但是作为海洋工程结构物的设计工程师，必须关心这些现象的发展趋势及对结构物的危害程度，据国外某些实测资料公布，在结构物的潮位变化段，钢结构的腐蚀深度为每年 $0.51\sim 0.76\text{mm}$ ，水下段及大气段的腐蚀深度每年平均为 0.25mm 左右。为了减缓腐蚀速度，海洋工程金属结构物的电气阴极防腐设施已成为海洋工程设计中的一个不可缺少的部分。它要求海洋环境工程师提供准确的潮位变化资料，要求结构工程师们在腐蚀严重段采取结构局部加强措施。水下海生物的附着，使结构物构件的糙度增加，尺度加大，可能导致环境荷载的增加，在

工程结构物的设计阶段必须对这些现象引起注意。

§ 1.3 研究海洋工程环境条件的意义

一般说来，海洋工程结构物是一些长期设置或系泊于某特定海域、能从事生产作业的装置或建筑物。它们与运输船舶的差别在于后者遇恶劣天气可以驶离现场以躲避狂风恶浪的袭击，但是海洋工程结构物则必须保持在海中。对于每年仅可能出现数天的恶劣天气，生产平台可以暂停生产作业，但结构物必须保持基本的安全。所以能否比较准确地预报海上水文、气象等物理环境条件的强度、出现的概率以及所诱导的荷载，对海洋结构物安全度的影响是十分重要的。

据统计，在1955年至1981年间，世界上海洋石油钻井装置所发生的特大事故已有47起，总的经济损失达四亿美元以上。究其原因，主要是对有关海域的自然环境条件及地质条件的资料收集和分析不足所造成。例如1964年位于东阿拉斯加库克湾的两座海上钻井平台被海冰所摧毁，1969年位于渤海湾内的一个海洋平台也遭同样的厄运。1980年我国的“渤海二号”在拖航时翻沉，1982年在加拿大近海油田，发生了世界上最大的半潜式钻井平台“海上徘徊者”的翻沉事件。这些海上事故的实例，有力地说明研究海洋环境条件，掌握海洋水文气象变化规律的重要性和紧迫性。

从另一方面看，海洋环境条件和载荷的合理确定对海洋结构物的建造投资和经济效益来讲也是举足轻重的。以渤海某油田的一座平台的设计为例，由于设计波高从8m增加到10m，平台的用钢量就由原来的二千余吨增加到三千余吨，从而大大增加了工程的投资费用。又如在某一采油平台的设计中，取同一设计波高，波周期取14s及20s时，后者的水平波浪力为前者的一倍左右，二者的倾复力矩也有30%的差别。

海洋工程结构物的安全性和经济性是衡量工程设计的两个重要指标，二者必须综合平衡。近代工程设计中已逐步应用工程可靠度及危险度分析的设计方法，它们的立足点是概率分析法。在设计时，既要海洋环境条件及荷载进行概率分析，又要对某一结构物的抵抗外荷载的能力进行概率分析（其中包括钢材的屈服应力、结构物的结点强度、地基的承载能力以及其他多种不确定因素）。图 1.2 为某一海上平台的荷载长期分布及该平台结构抵抗能力的长期分布，两线之间的距离即为安全度参数 K 。关于结构

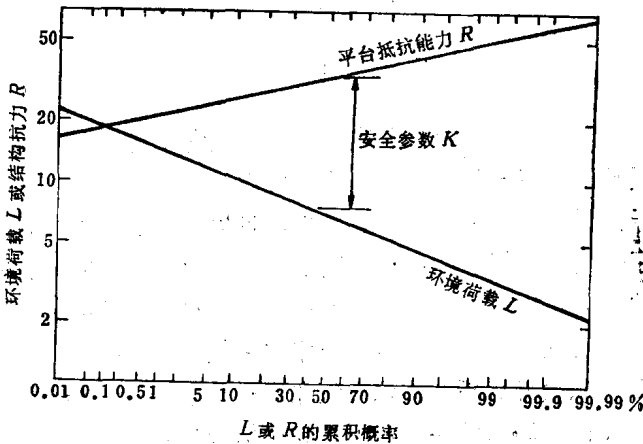


图 1.2 海洋结构物可靠度分析

物抵抗能力 R 的长期分布规律等是结构力学及地基基础学的研究内容，通过海洋工程环境条件的研究，若能比较完整地提供诸种海洋工程环境条件、环境荷载的长期分布规律的研究成果，则对我国海洋工程结构物在设计工作中进行工程可靠度和危险度的分析起着积极的作用。

为加快开发我国海上的油、气资源，促进海上运输业的发展，合理确定海洋工程结构物的投资费用，以降低海上产品和作业的成本，这就要求海洋工程的工程师们具有经济决策的基本知识，并且掌握海洋环境条件与工程总投资的关系。图 1.3 为某工

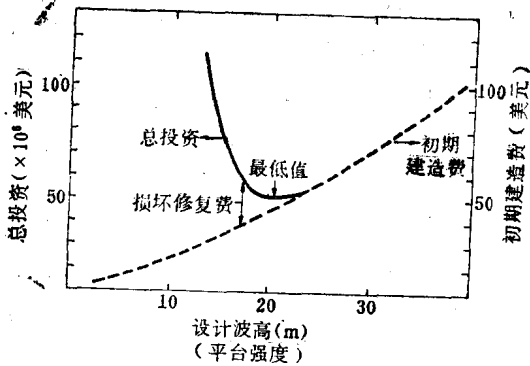


图 1.3 设计波高与投资优化分析

程设计波高与造价的关系（虚线）及其总投资（实线）优化分析图，它反映了合理选择设计波高的重要性。

鉴于海洋工程环境研究的重要性，世界上一些技术发达的国家，为了适应北海等大油田的开发之需，对海洋科学的研究投入了大量的人力和物力。如英国和挪威为了在风浪险恶的北海大陆架开采海底石油，增设了许多海上水文和气象观测系统。它们为广泛搜集，积累并分析北海水文气象资料作了大量工作。

在国家海洋局的统一部署下，我国沿海也设置了一些观测气象及海洋水文的观测台站，积累和分析我国海洋现场的实测资料，这将对我国的海洋开发起到积极的推动作用。

§ 1.4 海洋工程环境条件分析内容

海洋工程结构物在建造、组装和整个使用期间，除分析风、浪、流、潮汐、地震、冰况外，视需要情况再适当分析雾、雨、温度及地基土壤、海水腐蚀，海生物附着等现象。按设计基准要求，环境条件分析又可分为工作环境条件及极端环境条件。工作环境条件是指结构物在建造，拖运安装期间或使用期间经常出现

的环境条件，极端环境条件是指海洋工程结构物在整个使用年限内，极少出现的环境条件。

现举例说明海洋环境条件分析的主要内容。

某工程为一钢质导管架结构，导管架的水下部分已在陆地船台上焊接成型，首先要选择合适的季节、日期，将其驳运至距海岸线外 200km 的海域，然后在海上组合作业平台的上部结构（例如钻井平台的钻机，井架及缆车等设备）。按设计任务，要求该海洋工程建筑物在海上从事钻探作业约 2 年，然后再作为海上采油的生产平台在海上工作 30 年。

由于该海洋工程建筑物在不同阶段有不同的用途，它要求设计人员提供明确的海洋环境条件。

拖运条件 分析导管架从船台驳运至指定海域，沿途可能遭遇的海况、风况、海流的方向及海流速度对拖运速度的影响，为了避开可能遭遇的不利海况，合理确定导管架驳运的季节和时间（是否需要趁潮离岸等）。

海上组装导管架平台上部结构的海洋环境条件 即组装期间海上可能遇到的不利风况，波浪情况，雾况，海流大小和方向及海面连续平静天数的相应概率。

钻探作业条件 除分析相应的波况、风况及海流情况外，还需对该海域的海浪谱及风谱作出应有的分析，以供进一步分析海洋平台在钻探作业时平台结构的动力响应。

长周期内的极端环境条件 生产平台工作期的 30 年内，可能遇到的极端恶劣的环境条件（如狂风，巨浪），以作为海洋建筑物设计中确定控制荷载的依据。除此以外，还必须提供在这 30 年内可能安全作业生产的总天数及其相应的概率。

由此可见，海洋工程环境条件及其荷载所涉及的主要内容，是与海洋气象学有关的风况，海面气压；与海洋水文学有关的海上波浪，它的频谱特征，短期分布，潮汐现象及潮位分析（包括非天文因素引起的海面升高现象），海流，海底泥沙运动，海

冰，以及以上诸海洋动力因素诱导的海洋环境荷载和它们的多年变化规律（长期分布）等。

第二章 风

风对人类的生产活动和生活关系密切。风作为一种自然资源，曾为人类早期生产活动提供原动力。技术发达的荷兰，在工业发展初期以风车作为原动力而闻名于世。但是大风和风暴又是一种给人类带来巨大破坏力的自然现象，历史上因风而造成灾难的记载是屡见不鲜的。

近几十年来，各种类型的海洋工程建筑物随着海洋开发和海上运输业的兴盛而不断涌现。海上采油平台或钻井船都有高耸的井架，码头工作平台上也有尖突的塔架，它们都直接承受风荷载的作用。因风荷载引起的对建筑物底部的风倾力矩会对建筑物的设计施加重要的影响。一些浮动式海上建筑物(包括各种船舶)，由于风对它们上部结构的作用力所引起的风倾力矩，常常是导致浮体失稳的主要动力因素。

海面上的大风，除了能引起风荷载以外，它还能使海岸带的海面升高(风涌现象)，大风掀起的海浪、大浪诱导的对建筑物的波浪力，通常是建筑物设计的控制荷载。倘如大风的风载与大浪的荷载同时施加于海上建筑物，再伴之以风所涌起的极高海面，必然会给海洋工程结构物带来严重的威胁。为了使海工建筑物有足够能力抵御风带来的威胁，就需要了解风的形成机理，它的强度特征及其随空间和时间的变化规律。

风是空气在水平方向的运动，由于海面广阔、没有树丛和山丘的遮掩作用，所以同样的天气形势，海面上的风速要比陆地上大。再则由于地球表面的摩阻效应，高空的风速又比地球表面的风速大。工程中都以风速表示风的强度，并按风速大小分级，又称风力。国际上统一的风力分级表(又称蒲氏分级表)如表2.1所示。天然风的风速不会是恒定的，它总是在平均风速值上下呈