

海洋工程概论

HAIYANG GONGCHENG GAILUN

孙丽萍 聂武 编著



哈尔滨工程大学出版社

海洋工程概论

孙丽萍 聂 武 编著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程概论/孙丽萍,聂武编著—哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2000.2

ISBN 7-81073-006-1

I.海… II.①孙…②聂… III.海洋工程—概论 IV.P

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 76122 号

内 容 简 介

本书是一本关于海洋工程领域的概论性著作。内容包括海洋环境浅识、海上油气勘探与生产装置、海洋平台设计与制造、海洋发电和大洋锰结核开发。书中着重从总体的角度概貌性阐述了海洋工程中的常用装置和设计要求,并辅以相关实例说明。

本书可作为船舶与海洋工程专业及相关专业本科生教材,并可供从事海洋工程领域的工程技术人员、院校师生阅读和参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
东北农业大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 8.5 字数 180 千字
2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月第 1 次印刷
印数:1~1000 册
定价:10.00 元

前 言

浩瀚的海洋蕴藏着丰富的油气资源,深海中还有锰结核、热液矿等稀有矿藏。同时海浪、潮汐又为人类提供了可重复利用的潮汐发电、波浪发电、温差发电等“绿色”能源。因此,21 世纪将是人类开发海洋资源并取得更大成绩的新世纪。

本书的目的是通过学习本课程使学生对海洋水文地理环境有一概貌性的认识,并较系统地掌握海上油气勘探、开发、生产、运输主要环节中的海洋石油钻井平台、生产平台、系泊装置的总体性能、结构形式及主要特点。本书还着重介绍了海洋平台设计步骤、方法及海洋工程结构设计中须考虑的特殊问题;同时还阐述了海洋平台建造、装配、探伤和下水等工艺过程。针对蓬勃兴起的海洋能利用和大洋锰结核开发,还简要介绍了波浪力发电和潮汐发电的原理和装置、大洋锰结核的开发前景和可能的开采方式;最后介绍了世界上主要船级社。

全书共七章,其中一、二、三、七章由孙丽萍编写,四、五、六章由聂武编写。

本书是应船舶与海洋工程专业本科教学需要而编写的。在编写过程中得到了有关同行和校教材管理部门的大力支持,在此表示衷心感谢。

作 者

2000 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 海洋工程的过去与发展	1
1.2 我国的海洋石油工业	2
1.3 海洋工程研究的对象和范围	4
2 海洋环境	6
2.1 海底地貌	6
2.2 风	7
2.3 海浪	9
2.4 海流	14
2.5 海冰	15
3 海洋石油钻探与生产装置	19
3.1 概述	19
3.2 钻探装置——钻井平台	26
3.3 生产装置——采油平台	41
3.4 单点系泊系统	53
3.5 早期生产系统	58
3.6 海洋工程特种工程船	60
4 海洋平台设计	67
4.1 平台结构的设计步骤和方法	69
4.2 设计中应考虑的几个问题	72
4.3 设计载荷	73
4.4 结构分析及局部详细设计	78
4.5 腐蚀与防腐蚀	83
5 海洋平台建造	92
5.1 海洋平台建造的一般原则	92
5.2 焊接工艺	95
5.3 焊缝的无损探伤	96
5.4 海洋工程材料	101
5.5 下水与海上安装	102
5.6 日常维护保养	104
5.7 平台的入级及海事保险	104
6 海洋发电	109
6.1 波力发电	109

6.2 潮汐发电 112

7 大洋锰结核的开发 116

7.1 大洋锰结核的储量、分布及开发前景 116

7.2 深海锰结核的开采方法 118

7.3 潜水器的海底调查系统 124

附录..... 125

参考文献..... 127

1 绪 论

1.1 海洋工程的过去与发展

海洋工程(Ocean Engineering),从其所指的建筑物角度来看,实际上包括了两类建筑物:沿岸结构物(Coastal Structures)和近海结构物(Offshore Structures)

沿岸结构物是指水工建筑物,如防波堤,海底隧道等;近海结构物指与海上石油勘探及生产有关的海上石油钻井平台、生产平台,贮油罐以及未来可能出现的各种结构物。通常所说的 Offshore 是指水深 200m 以内的浅大陆架区域。

海上采油的历史可以上溯至 19 世纪。在一篇名为“Man, Oil and Sea”的文章中介绍了美国人开发近海石油的过程。有位大胆的投资家,从岸边有天然气贮藏的现象断定海滨有贮藏石油的可能性,购买了一块海滨区域的土地。由码头向水中构筑平台,终于在加州的圣巴巴拉海峡完成了世界上第一口水上钻井的钻井平台。其实它距海岸线不过 150m,还谈不上 Offshore,而且还是木质的。一直到二次大战前,美国的近海石油开发才发展到水深 3~4.5m,距海岸线 1.6km 的木质平台。

真正的 Offshore Structure 当推战后在路易斯安娜州建造的钢质导管架平台,离海岸约 8km,水深 4.3m。虽然这座平台从岸上仍可以凭肉眼看到,但离海岸这么远还是第一次。这座平台高出平均潮位 5.8m,首次在平台上使用滑道供移动井架之用,可以在不同位置上钻井。该平台建成于 1949 年,遗憾的是该平台钻出的井是口干井。然而,此时近海平台的结构已发展到一定程度,由木质发展为钢质,由单桩发展为群桩,且出现了斜撑。到 60 年代末,美国有上千家工厂为石油产业服务,使海上采油初具规模。目前美国近海钻井数约占全世界钻井数的一半,海上石油年产原油达一亿多吨。自 60 年代起,英国、挪威、法国等国都大量采用美国近海石油开发技术,使本国海上石油开发事业取得了迅速发展。特别是英国和挪威,通过于 60 年代中期开始的仔细勘查,在作好开发准备的基础上,不惜耗资数百亿,于 70 年代起就全面引进美国技术,包括引进设备材料、聘请专家、联合设计、联合建造,用以开发近海石油,从而迅速武装了自己。据有关方面公布的数字说明,在设备自给率上,英国已达到 73%,挪威也达到了 54%。在北海油田开发以前,英、挪两国都是石油进口国,但现在都是石油、天然气的出口国。英国石油产量现在一亿吨以上,不但自给,尚可部分出口。挪威的油气出口也占全国出口总额的 32%。

70 年代以来,由于科学技术的进步,使 200m 水深范围的勘探、开采技术进入了成熟阶段。而美国现已能在 320m 以下水深的海域开发油田,钻井最大深度达 1 000m。现在世界上拥有近 1 万座固定平台在海上从事石油开采,790 多座移动式钻井平台或钻井船在从事石油勘探,约 430 个海上油气田投入生产。

海上石油的开发,不仅给产油国带来了经济上的繁荣,而且也有力地推动了产油国其它工业的发展。例如,英国和挪威首先改组了他们有相当基础的造船工业。在挪威,除了特殊船舶,他们宁可向中国、日本、韩国订购或加工一般船舶,而把大多数造船厂转向建造海上平台。而英国造船公司亦称,除了保留一定的军舰建造能力外,主要船厂都转向建造海上平台。

海上平台的建造是复杂的,技术要求很高,设计建造周期比一般船舶长。它相当把陆地上四五个大工厂紧缩重叠地放置在一个面积不过四五千平方米的平台,日日月月受海水的腐蚀,风、浪、流的冲击,保持正常生产二三十年。而平台本身除了作为支撑的导管架或桩腿外,成千上万的各种设备按工程系统叠放在平台甲板上。因此建造与安装平台的技术,涉及到机械、造船、电子、冶金、石油等工业部门,利用了先进的科学技术成果,如导航定位、水下技术等,所以海洋石油工业投资高,风险大。与陆地石油生产相比,海上石油生产成本相当高。如北海地区石油平均生产投资为中东地区石油生产投资的 20 多倍。

1.2 我国的海洋石油工业

我国海域辽阔,海岸线长达 18 000 多公里,海域面积 472.7 万平方公里,大陆架面积为 130 多平方公里。从 60 年代初期开始,我国就开始了海洋石油资源的勘探工作,先后发现了渤海、南黄海、东海、珠江口、莺歌海、北部湾六个大型含油气的地质盆地,见图 1.1。海洋石油资源总量约 450 亿吨,天然气资源储量约 14 万亿立方米,分别占全国油气资源总量的

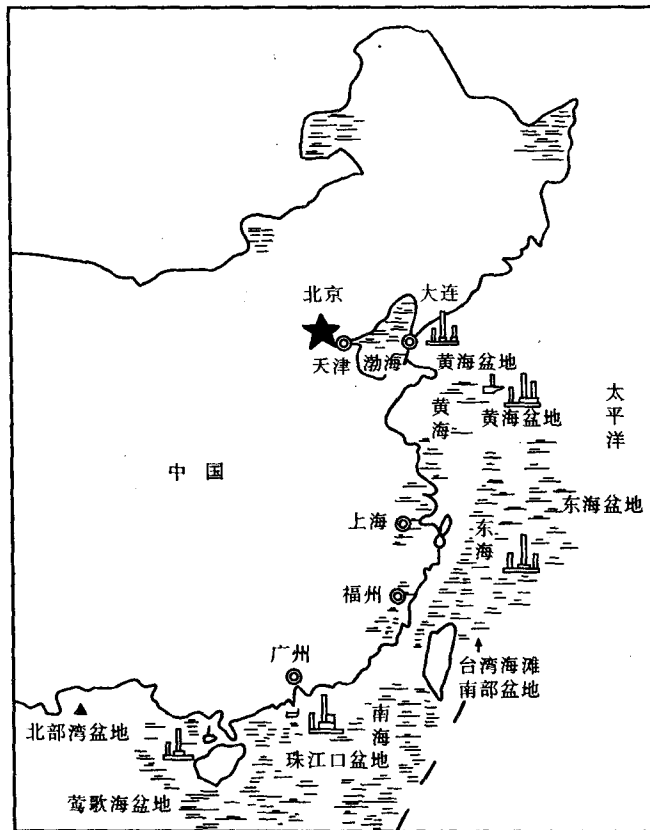


图 1.1 中国近海石油资源示意图

57%和 33%。自改革开放以来,由于采取中外合作的方式进行勘探与开采,大大加快了我国海上石油事业的发展,海洋石油的产量年年大幅度增长,在 1990 年就突破了 100 万吨大关,1994 年的原油产量达到了 647 万吨,天然气产量达到了 3.7 亿立方米。1998 年原油产

量达到了 1631 万吨,天然气 38 亿立方米,我国在 2000 年的目标是 400 万桶/天,全球在 2000 年海洋原油日产量将达到 2 600 万桶,天然气年产量将达到 6 580 亿立方米。

由于中国沿海大陆架是世界上最后一批面积大,易于开采而尚未勘探开发的地区之一。而且水深在 120m 以内的水域占很大一部分,作业条件优于北海油田(其作业水深在 100~300m),已引起全世界海洋石油界的注目。1979 年以来,经我国政府批准,利用外资,同国外联合开发,已先后与日本、法国、美国、英国等国的石油公司签定了在渤海、南海的北部湾、莺歌海、珠江口盆地的合作勘探开发合同。我国目前的勘探开发仍处于起步阶段。从已发现的油田情况来看,多属中、小型的边缘油田。因而,用于开发边缘油田的早期生产系统有很大的发展前景。但也应该认识到,我国海洋石油开发工程面临四个方面的挑战:

1. 我国近海石油地质条件较为复杂,如渤海油田的近岸滩涂地区。
2. 原油性质特殊,轻、中、重三种油质中,中质与重质油储量可能会多些。
3. 国际油价起伏不定,不时处于疲软状态。
4. 海况条件比中东等地区差,台风、海冰、地震影响较大。

与英、美、日本、挪威等先进国家相比,我国的海洋石油工程仍有些差距,表现在:

1. 平台设计

自升式、半潜式平台的设计已有些经验。对导管架式的平台,尤其是深水导管架平台以及早期生产系统的设计还刚刚开始,缺乏经验。

2. 平台材料

平台用的新钢种,如 Z 向钢、32, 36, 42 公斤级平台用合金钢,国内尚处于研制试用阶段,目前有些材料还依赖进口。

3. 平台设备及仪器仪表系统

平台设备及仪器在海上使用环境下与陆地油田环境大不一样。我国虽有成熟的陆地采油经验和设备仪表,但海洋平台所需的各种钻井、采油、防爆、消防、救生、通讯等设备,自动控制和仪器仪表系统,尚处于技术引进和研制提高阶段。

4. 平台的制造工艺

平台用钢种特殊,板材较厚,焊接、探伤要求高,加工精度要求亦高。这方面我们实际经验还不丰富。

5. 海上施工安装

国内目前海上施工作业船舶比较少。如大型起重船、打桩船、打捞船、下水驳等。

尽管如此,我国的海洋石油工业起步并不晚,只是发展缓慢。但近年来,特别是 80 年代以来,我国通过多种途径,包括派出去、请进来的办法,在海洋工程方面的教学、科研、设计建造和海上施工等方面已经取得了较大成绩,并已形成了一支生产和科研的基础力量。如渤海海洋工程设计公司自从改革开放以来,先后为渤海石油的勘探开发设计建造了 11 座钻井平台,7 座采油平台,1 艘自升式钻井船,1 座单点系泊储油系统及 3 艘工程船舶。在与日方合作完成 CB-A/B 平台(即埕北油田 A、B 两平台)的设计建造之后,为开发渤海油田又单独完成了 BZ28-1(渤中 28-1)、BZ342/4 油田的工程设计及 SZ36-1(绥中 36-1)油田的工程概念设计。这些项目均得到了美国船级社(ABS)、挪威船级社(DnV)及中国船舶检验局(ZC)的人级证书或审查批准。图 1.2 为渤海油田的石油分布图。

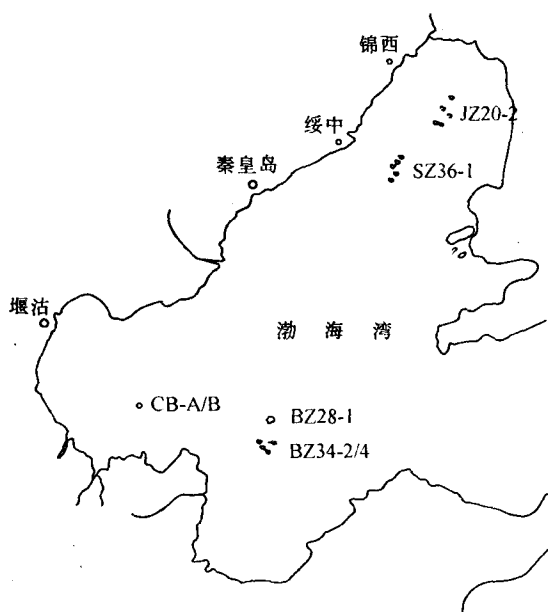


图 1.2 我国渤海石油分布

1.3 海洋工程研究的对象和范围

从广义上说,所有涉及或与海洋环境有关的工程都可以归入海洋工程研究的范围,如我们经常谈论的海洋平台、系泊系统、海底管线以及其它开发海洋资源的设备和工程建筑,如海浪能源转换系统。这种系统要求有效地承受海浪与系泊力,如浮子式波力发电装置,岸式波力发电装置。开发海洋能的另一类装置称为海洋热能转换系统(OTEC),其原理是利用海水中的温度梯度。从水动力学的观点看,其结构主要是一条能定位的驳船下面坠一条刚性或软柔性长管。此外,还有深海采矿系统。其主要结构物为一采矿船、水下采矿设备和一条连接两者的立管(riser),立管结构见图 1.3。

1.3.1 研究范围

1. 海洋环境动力学

海洋环境复杂,有时很险恶。世界上每年都有大量船舶失事遇难的报道,而海洋平台的翻沉事故也不乏其例。因此海洋工程结构物要经受得住在使用年限内可以估计得到的最大风力和最大波浪力。因此海洋气象、水文的观测和预报很重要。各海区的风、浪、流特征也不相同,规律也不同。在纬度高及极地海域,还存在着海冰问题。因此,海洋环境动力

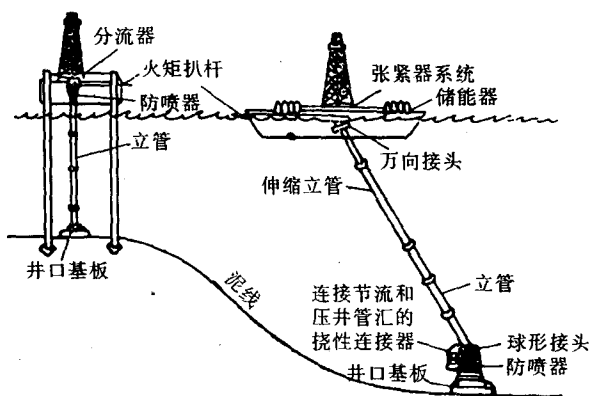


图 1.3 立管系统简图

学是海洋工程发展当中变得越来越重要的一门科学,它不但研究风、浪、流的客观规律,还要研究近岸波浪机理。海洋环境动力学是关于海洋环境的长期、范围广泛的实测和统计分析的科学。

2. 海洋工程结构物设计研究

移动与固定式平台结构所受的外力为周围环境的作用即风、浪、流。而固定式平台还要考虑能否与海底有效地附着。所以海底基础的物理力学性能——即土力学亦为一研究方向。此外,合理的设计计算方法,固定式平台的抗地震研究也很重要。

浮动海洋工程结构物的系泊技术,无论是多点系泊还是单点系泊都有着不少问题。

海洋工程结构物的静力与动力强度分析也是长期以来不断研究的课题。

设计基准研究也是当前迫切的任务。设计基准包括:结构设计与建造规范,稳性与抗沉性标准,防爆等安全标准。设计环境载荷具有地址性(site specific)强的特点,而我国的海洋工程结构设计处于起步阶段,不得不参照国际上一些权威机构的设计规范与标准进行。因而研究制定出适合我国大陆架沿海油田的平台设计规范是重要的课题。

3. 海上施工技术

由于海洋工程结构物的构造复杂,体积、重量都十分庞大,从工厂到海上安装地点,定位、组装都是十分复杂的工艺建造过程。而且工程完毕后还存在拆除和清理航道的问题,随之而来的是需要大量大功率的特种工作船和装备,一系列的特殊工艺问题将出现,可分为:

海工结构的制造与安装工艺,如钢结构的导管架平台的组装,重力式平台钢筋混凝土桩腿与模块间的连接加固技术;水下切割、焊接、水下爆破技术;潜水技术,包括使用水下机器人完成水下观测、搜索、取样、施工维修等。

1.3.2 海洋工程与船舶工程的关系

从广义上说船舶工程是海洋工程的一个分支。两者明显的差别在于,船舶工程是以船舶的航运活动为主要对象的工程技术问题。海洋工程则以一定时期固定于某一水域进行其专业活动如以钻探、采油为对象的工程技术问题。大部分工程船舶属于海洋工程范围。海洋工程必须考虑结构物在大风浪中的安全性,考虑风、浪、流的作用,要考虑某一重复周期或称为50年、100年一遇的气象水文条件。如果是移动式的海洋工程结构,部分外载荷、稳性等计算与船舶工程一样考虑。但如果是固定式的海洋工程结构,直接固着于海底,则地震、海底构造以及土力学、海流冲刷的影响都要考虑。与船舶工程不同的还有,所有的海工结构都要做动态外载荷的响应分析与疲劳强度以及疲劳寿命的计算。

2 海洋环境

2.1 海底地貌

随着科学技术的进步与发展,人类对海底地貌的认识不断深入。目前已经能够用仪器对海底地貌进行面状连续扫描并记录下来。从地质构造观点看,在大陆与大洋之间,有一个接触区,通常称为过渡带或大陆边缘。

在地球上的许多区域,大陆与大洋之间的过渡带,包括大陆架、大陆坡和大陆裙,如图2.1所示。图中(a)表示结构简单的,如大西洋型,(b)表示结构复杂的,如太平洋型。

结构简单的,大陆架、大陆坡和大陆裙三部分组成大陆台阶,其外面就是大洋底。

结构复杂的,除了大陆台阶外,还带有一系列的边缘海盆,海盆外缘有弧形列岛的岛弧以及岛弧脚下的深海沟等,其外面才是大洋底。

2.1.1 大陆架

大陆架是被海水淹没的大陆部分,深度一般在200m以内。是目前钻探与开采海底石油活动最活跃的区域。大陆架一般分为表层、盖层和基底层。表层主要分布着来自大陆的松散沉积物,盖层主要为半固结与固结的沉积岩层;基底层主要为结晶岩石。大陆架是由侵蚀作用、海积作用、陆架地壳的垂直运动和冰期海退作用四种因素形成的。

2.1.2 大陆坡

大陆坡从大陆架外缘开始,至深度在1 800~2 000m之间的区域,坡度较陡,主要沉积着陆源物质。

2.1.3 大陆裙

它是位于大陆坡脚下的坡麓带,它的坡度平缓,深度约为2 000~4 000m。大陆裙是一个重要的堆积区,由数千米的沉积物构成。它主要分布在大西洋型的过渡带上,而在太平洋里,基本上没有大陆裙发育,在大陆坡脚下主要是深海沟。

具有生油条件的海区主要分布在大陆架、大陆坡水域。其中藏油量最大的为大陆架,其次为大陆坡。此外,在复杂过渡带的海盆与岛弧水域的第三纪沉积盆地,亦具有含油气的良好前景,如我国的莺歌海、北部湾、珠江口外就属于这类地质构造。过渡带的许多盆地都是油气储集的有利地区。

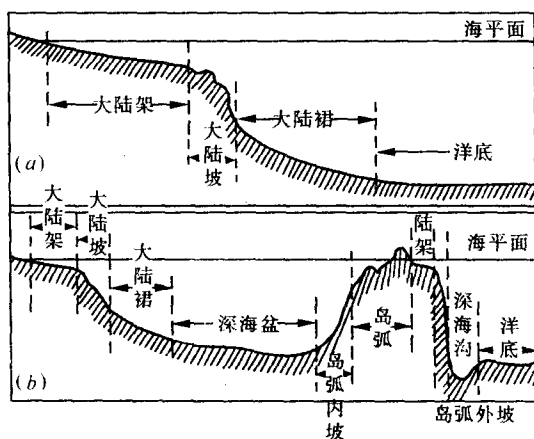


图2.1 海底地貌

2.2 风

风对人类的生产和生活有着重大的关系。风可以作为一种自然资源,为人类的生产和生活提供动力资源。另一方面,大风和风暴又是一种带有巨大破坏性的自然现象,风又是产生海浪的重要因素。所以风对多种多样的海工结构的影响是十分严重的,因为平台、钻井船及海上油罐等设备直接承受风载荷的作用。一些浮式海洋工程结构物的稳性和安全性也与所受风力密切相关。风是影响海洋工程的重要环境因素之一。

自然界的风按其循环可分为大规模风系、中规模风系与小规模风系。大规模风系是由地球自转引起的大气环流。如自南北纬 30°附近吹入赤道低压带的东信风(trades)。中规模风系,有在东南亚显著的季节风,由于低气压和高气压的存在而产生的台风等。小规模风系,有由于海陆间气温差,白天由海向陆、夜晚由陆吹向海的海风与陆风。

自然风的风向与风速是随时间、地点变化而变化的。这种变化历时有几秒钟的、几小时的或几天的。距地面 5~10m 高度处的风速,约为不受地面影响的几公里高空处风速的 1/3。在海上此数变为约 2/3。此关系一般可表示为

$$\frac{u_z}{u_{z0}} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^n \quad (2.1)$$

式中 u_z 为高度 Z 处的风速; u_{z0} 为高度 Z_0 处的风速。 n 为取决于地面情况的常数,在平坦地面或海面取 $n = 1/7$ 。式(2.1)式的关系曲线见图 2.2。

于是,海上无遮蔽时的风速通常比陆上的大,使用陆上的风速资料设计外海结构时必须加大。这个比例系数随风向与观测点而异。在海风情况下,外海风速为海岸附近风速的 1.1~1.3 倍,在陆风情况下为 1.1~1.8 倍。

2.2.1 我国海域的主要风系

1. 季风是由于海洋与陆地同一季节里温度的增加与冷却程度不同而形成的,称为季风。冬季风从陆地吹向海洋,夏季风从海洋吹向陆地,冬、夏两季风交替变换是季风的特点。我国的季风,10 月起至次年 3 月间盛行偏北风,6 月以后则盛行偏南风。

2. 寒潮大风是由于巨大的高压冷气团南侵,造成温度剧烈下降,伴随霜冻与大风的现象,我国的寒潮大风主要集中在 11 月至次年 2 月。

3. 台风是热带地区海洋上空的热带气旋在适当条件下猛烈发展形成的急速旋转的气流运动。台风中心,即风眼地区风速接近于零。台

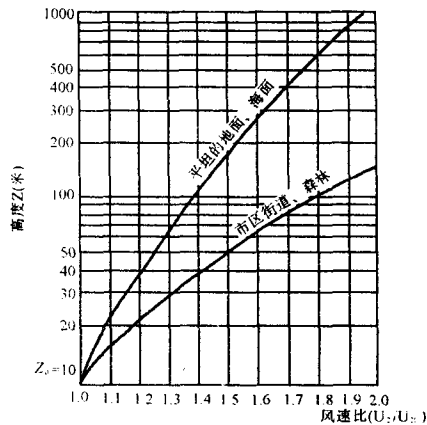


图 2.2 风速与高度的关系
(基准高度 $z_0 = 10$ 米)

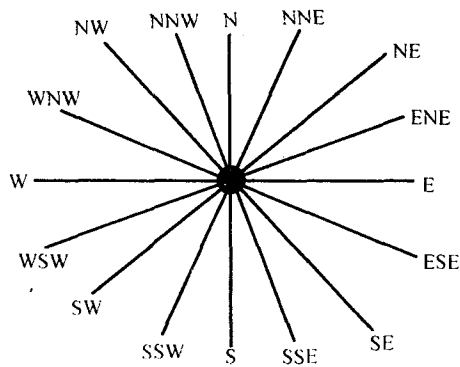


图 2.3 风向方位图

风中心以一定速度向前移动。

2.2.2 风速风向资料的统计分析

风的特征主要是风向与风速。风向是指风吹来的方向,在气象上用 16 个方位表示,如图 2.3 所示。图中文字表示如下:N 为北,E 为东,S 为南,W 为西,WNW 为西北偏西,NW 为西北,NNW 为西北偏北,等等。风速是空气在单位时间里流过的距离,一般以米/秒或节(海里/时)表示。国际上通用的蒲福风级表将风速分为 13 个风级。风速可达 100~200m/s 的龙卷风等,由于不是经常发生的,影响范围也小,没有列入表中。

表 2.1 蒲氏风级表

风级	风名	海面最大浪高(m)	海面状况	相应风速		(m/s)
				(kn)	(km/h)	
0	无	/	平如镜	<1	<1	0~0.2
1	软风	0.1	微波	1~3	1~5	0.3~1.5
2	轻风	0.3	小波	4~6	6~11	1.6~3.2
3	微风	1.0		7~10	12~19	3.4~5.4
4	和风	1.5	轻浪	11~16	20~28	5.5~7.9
5	劲风	2.5	中浪	17~21	29~38	8.0~10.7
6	强风	4.0	大浪	22~27	39~49	10.8~13.8
7	疾风	5.5	巨浪	28~33	50~61	13.9~17.1
8	大风	7.5	狂浪	34~40	62~74	17.2~20.7
9	烈风	10.0		41~47	75~88	20.8~24.4
10	狂风	12.5	狂涛	48~55	89~102	24.5~28.4
11	暴风	16.0	非凡现象	56~63	103~117	28.5~32.6
12	飓风	/		64~71	118~132	32.7~36.9

由于海洋工程一般多为定点作业,即使移动式钻井平台与钻井船,也要在一个钻井区工作一段时间,所以对某一固定海域进行风速、风向等风的特征进行统计分析是必需的。这些风况资料的表达方式有以下两种方法。

1. 风玫瑰图。用以表示风在某方向的强弱和次数,因其形状类似玫瑰而得名,见图 2.4。

风玫瑰图的绘制方法是:先绘出风向方位极坐标图,一般是 16 个方向,把风速范围的频率在各风向方位上以频率比例尺标出频率点,把同风速范围的各风向方位频率点直线连接,就得出风玫瑰图。图中哪个风向、风速出现的频率最大即为定常风向,而出现的风速最大的即为强风向。在海洋工程设计时,为保证泊位稳态,不仅应考虑强风向,而且对船舶停靠泊位也要考虑定常风向的影响。除以频率为标尺绘制的风玫瑰图外还有按各风向的平均风速、最大风速等值绘制的风玫瑰图。

2. 风速资料的多年分布资料与统计

为确定可能出现最大风载荷时的风况条件,需要对多年风速记录中的每年的最大风速值予以统计分析,统计时将风速自小至大分档排列,统计出每档内相应风速出现次数占总观测数的百分数,得出统计直方图,再计算出相应的概率分布函数。

海洋工程的设计常需了解具有一定概率的最大风速,并以某一重复期的风速特征值作为设计标准。在海洋工程中常以 50 年一遇的年最大风速或 100 年一遇的年最大风速作为

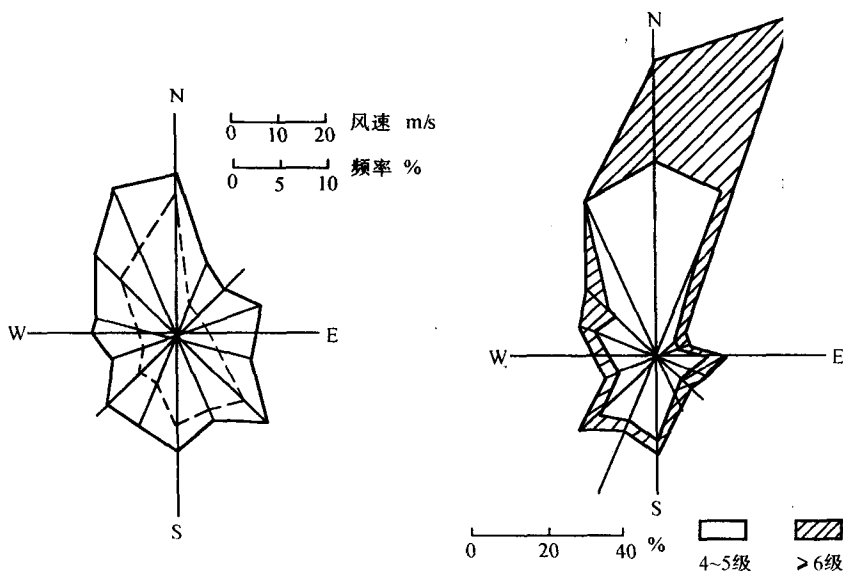


图 2.4 风玫瑰图

设计风速。所谓 50 年一遇或 100 年一遇,并非在 50 年或 100 年内会出现一次,不能保证在 50 年或 100 年内的绝对安全。

年最大风速受很多因素的影响,是随机变量。目前世界各国对最大风速的标准尚不统一。所谓标准,包括设计风速的再现期与风速资料的取值,其中风速资料的取值又包括风速观测距地面的标准高度与观测的标准次数和时距等。美国对海洋工程一般采用再现期为 100 年一遇的半分钟或一分钟的平均最大风速,英国采用 50 年一遇三秒钟瞬时最大风速。

2.3 海浪

处在各种海区的海洋工程结构,随时受到海浪的直接威胁。海浪的威力十分巨大,巨浪能把石油生产平台推倒,把万吨大船推上半空。有时波高虽不大,但当波浪周期与建筑物的固有周期相近时,因共振作用,使建筑物造成毁坏;即使轻微的波浪,因常年累月地连续作用,波浪力也会给建筑物以冲刷而使之损坏。因此为了保证海洋工程结构物的安全,必须了解与研究海浪。

海浪是静水面受到外力作用后,水质点离开平衡位置作往复运动,并向一定方向传播的自然现象。引起海浪的外力有风、地震、太阳月球的作用力、重力等。而由风引起的浪,在海浪研究中,占有主要地位。

风吹皱了平静的水面,产生了涟漪。当风速足够大时,能量传播的结果将使表面张力波变为重力波。能量的供给方式有风对波浪剖面的直接推动、摩擦力、压力涡动等。在波浪成长的开始阶段,波高与波长同时增大,后来仅波长增大。波浪的大小取决于平均风速、风区或风程(风吹过水面的距离)和风时(风吹过的持续时间)。形成后的波浪,有可能被顶风、涡动、破碎等原因消耗其能量而逐渐消失。波浪的能量产生与消耗的作用过程可以同时存在。在一定的风速下,风作用的时间(即风时)和风吹过的海区(即风区)都足够长时,波浪要素达到极限状态。

2.3.1 波浪要素

造波水槽(图 2.5)的一端有周期性的造波板,使水面上下运动形成周期性的波浪传播出去,造波板如单纯作前后往复运动,则产生正弦波。波浪的最高点叫波峰,最低点叫波谷。浮在水面的物体,当波峰到达时与波浪一起边前进边升高,波谷到达时则边后退边下降,亦即漂浮物体不随着波浪前进,而是呈近似圆形的周期性运动。漂浮物体的最高位置与最低

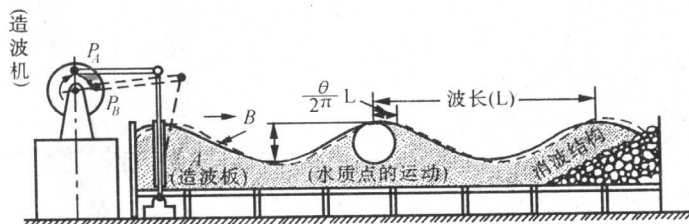


图 2.5 造波水槽和波浪要素

位置之差,亦即由波谷到波峰的高度,叫做波高。漂浮物体从最高位置经过最低位置再返回到最高位置所需的时间叫做周期。一个周期内波浪前进的距离或峰到峰、谷到谷的距离叫做波长。波浪的传播速度即波速 C ,利用波长 L 和周期 T 可表示如下

$$C = L/T$$

波速与漂浮物体或水质点的速度是不一样的。

由于波浪按其波速行进,如起始时间或起始点不同,即使同一时期的波浪,其峰和谷的位置亦是不同的。这种相对位置的差别叫做超前或滞后,图 2.5 表示造波机的转轮位置和波形的关系,转轮位于 P_A 位置时的波形为 A (实线),转化旋转 θ 角后相当于 P_B 位置的波形为 B (点线)。由于 P_B 比 P_A 前进了 $\theta/2\pi$, B 波也比 A 波超前 $\frac{\theta}{2\pi}L$ 。同样, P_A 前边相应的波形滞后了。这种超前或滞后叫做相位 θ ,用弧度或度来度量。

2.3.2 海洋的波浪

1. 波浪的表示方法

由波高、周期和相位等不同的两个以上的波所合成的波叫做合成波。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,且波浪的行进方向亦即波向也不完全是同一个方向。这样复杂的海洋波浪,可用统计分布或波谱来表示,但在海洋结构的设计中一般愿采用其特征值。作为特征值的有,最大波高 $H_{\max}$ 和最大周期 $T_{\max}$ 以及有效波高 (significant wave height) $H_{\frac{1}{3}}$ 和有效周期 (significant period) $T_{\frac{1}{3}}$ 。最大波高和最大周期是取观测期间的最大波或是取累积频率为 50 年一遇或 100 年一遇的最大波,亦即波浪重现期为 50 年或 100 年等的最大波高和周期。有效波高和有效周期,是把波浪观测资料按大小排列,从大的方面取出波数的 $1/3$ 个波高和周期的平均值,具有这样概念的波叫做有效波 (significant wave),因为它与目测值相接近,故被广泛应用。用与有效波相同的考虑方法,从观测资料中取出前 $1/10$ 个大波平均而得到的波,叫做 $1/10$ 大波。

波浪可以按周期的大小,区分为不同类型的波动,见图 2.6。

图 2.6 中还绘出了海浪能量的周期分布。由图可以看出周期最小的波为毛细波,波长仅为 1.7cm ,波高不超过 $1\sim 2\text{mm}$,对海洋工程结构物无实际意义。最长周期的波为潮流,是由于太阳、月亮对地球的相互作用引起的。在各类波动中,能量最强,波动振幅最大的是

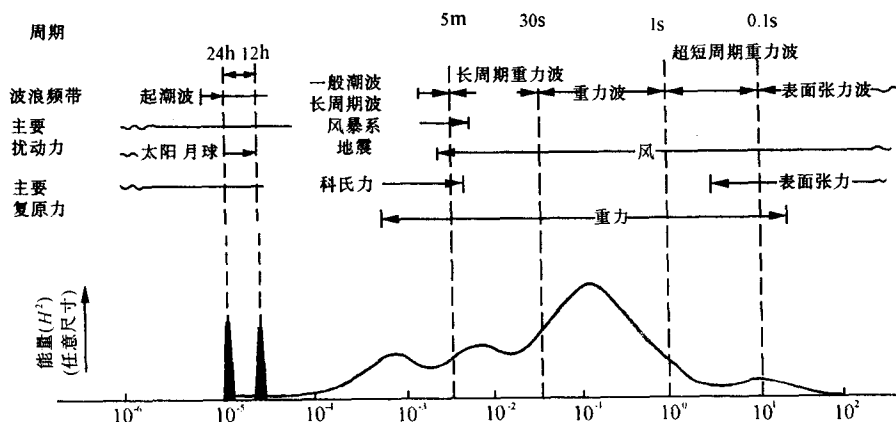


图 2.6 波浪按周期的分布和能量分布

由风引起的重力波,其中又可区分为风浪和涌浪。风浪由当地风场流动激起,周期一般不超过 10~12s,但波高可以高达 30m 以上。涌浪为远离风源的重力波,其周期也不会超过 30s。由风浪或涌浪诱导的载荷,常常是结构物设计的主要控制载荷。

2. 几种波浪的定义

为对波浪进行深入研究,从理论上人们对不同性质的波浪进行了定义。

(1)微幅波——线性波浪理论。是对自然界海面上的波浪进行了简化的最简单的波动。满足线性波浪理论的波动面是水面呈简谐形式的起伏运动。水质点的运动是以平衡位置为圆心的圆周运动,即以圆频率 ω 作简谐振动。从理论上说是不计波动自由表面引起的非线性影响,所以称为线性波。其波动方程为:

$$\eta = A \cos kx$$

或

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

式中 k 为波数,即

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad L \text{—— 波长}$$

此波浪理论中,水质点水平运动速度为:

$$u(x, t) = A\omega \frac{\text{ch}[k(z+d)]}{\text{sh}kd} \cos(kx - \omega t)$$

则水平加速度为:

$$\dot{u}(x, t) = A\omega^2 \frac{\text{ch}[k(z+d)]}{\text{sh}kd} \sin(kx - \omega t)$$

式中 d 为水深, z 为距水面深度

(2)斯托克斯(stokes)波——非线性波浪理论。这是波形如摆线的一种有限振幅波动,与正弦波相比,波峰较陡,波谷较平坦。其波形不是简谐曲线,且对于横轴是不对称的,通过质点振动中心的平面高于对应的静止水面。波速与波幅大小有关,波幅与波长之比愈大,波速愈大。质点的轨迹接近于圆,但不封闭,每经一周期后沿波浪传播方向有一小段水平的净位移,沿此方向产生一定的水流。质点沿其轨迹运动时,压力是变化的,除自由表面与水底