

船舶与海洋工程专业规划教材

海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社

船舶与海洋工程专业规划教材

海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍船舶与海洋工程结构物在海洋风、浪、流环境条件作用下水动力性能的模型试验研究方法及相关理论。主要内容包括:海洋油气开发与海洋平台简介;海洋工程水动力模型试验的历史沿革、作用、国内外水池及其主要设施,水动力学基础;模型制作及海洋环境条件模拟的方法和理论;测量仪器的分类、标定及模型测试校验;模型在风、浪、流中的各种试验内容与方法;试验数据的处理与分析;试验研究项目的实施规程;深海平台模型试验技术概述。

本书是我国海洋工程国家重点实验室多年来试验研究工作的总结,同时吸收了国际上的最新研究成果,注重实践能力的培养。可作为高等院校船舶与海洋工程专业的本科生教材和研究生的教学参考用书,也可供海上油气开发部门、船厂、设计研究单位从事海洋工程科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程水动力学试验研究/杨建民,肖龙飞,盛振邦
编著. —上海:上海交通大学出版社,2008
船舶与海洋工程专业规划教材
ISBN978-7-313-05064-9

I. 海... II. ①杨... ②肖... ③盛... III. 海
洋工程—海洋动力学—实验—高等学校—教材 IV.
P731.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 194862 号

海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9 字数:219千字

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

印数:1~2050

ISBN978-7-313-05064-9/P·079 定价:20.00元

版权所有 侵权必究

前 言

人类涉足海上油气开发已有 60 多年的历史,海洋平台的工作水深已由浅海拓展至深水海域。由于对能源的需求和海上油气资源的不断发现,我国和世界各国都十分重视海洋石油资源的开发,与之相应发展了适用于不同水深的各式海洋平台。当前海洋石油的产量已成为全世界石油总产量的重要组成部分,其份额已占 1/3 以上。海洋平台长期在某一海域的油田定点进行油气开采作业,遭受海上千变万化的风浪侵袭。各国石油开发部门或海洋石油公司,要求每一座海洋平台在百年一遇的狂风巨浪侵袭下不致损毁(称为平台的生存海况);在 6~7 级风浪时能够正常生产作业(称为平台的作业海况)。一座海洋平台的投资往往高达几十亿元,使用寿命大致 20~30 年。为了确保海洋平台能长期在海上进行生产作业,新设计的海洋平台,一般都要进行专门的模型试验研究,特别要进行相应于生存海况和作业海况条件时风、浪、流作用下的模型试验,测量海洋平台模型的运动和受力,并预报平台实体在海洋环境条件下的运动和受力,为海洋平台的设计、建造乃至安全生产运营提供科学依据。随着海上油气开采事业的不断发展,海洋工程水动力模型试验技术也随之迅速发展,许多国家在近 20~30 年内相继建造了海洋工程水池以满足模型试验研究的需要。

上海交通大学造船工程系于 1978 年更名为船舶及海洋工程系,在人才培养和科学研究方面从船舶拓展至海洋工程领域。根据我国海洋石油开发的需要,1985 年国家决定在上海交通大学筹建海洋工程国家重点实验室并于 1992 年建成。海洋工程国家重点实验室的建成,使海洋工程学科在人才培养和科学研究等方面迈出了更大的步伐。国内外许多著名单位与实验室合作(或委托)开展了众多海洋油气开发领域的重大项目的研究。在研究的实践中,我们深切感受到“海洋工程水动力学试验研究”已发展成了一门独立的学科分支。为了培养学生在海洋工程领域的科研实践能力,加强分析问题和解决问题的训练,我系于 1999 年开设了“海洋工程水动力学试验研究”课程,以课堂讲授和实验并重的形式进行教学。该课程先后由杨建民教授、肖龙飞副教授、王磊副教授等主讲,至今已有近十年的时间。遗憾的是国内外迄今还没有合适的专著或教材可供参考,这对于实施教学带来诸多不便,为此我们尝试编写一本合适的教材以弥补这方面的空缺。

本书是在杨建民教授、肖龙飞副教授历年所用讲稿的基础上编写而成的。编者在长期的教学实践中,结合实验室众多重大项目的研究工作以及国际船模试验池会议和有关国际学术会议发表的研究成果,充实和完善本书的相关内容。原上海交通大学海洋工程国家重点实验室主任盛振邦教授担任本书编写的顾问和全书的修改定稿。彭涛老师、李欣博士、吕海宁博士、李俊博士、胡志强博士、苏一华博士提供了部分资料,吕海宁博士、苏一华博士精心绘制了许多插图,并与房茂鹏硕士、曾志硕士、童波硕士、王颖博士一起参与打印和编辑书稿,在此一并表示衷心感谢。

全书共分 9 章。第 1 章为总论,简要介绍海洋资源和海洋油气开发概况,我国海疆和海上油气资源、海洋环境条件、海洋平台的种类。第 2 章介绍模型水动力试验研究的历史沿革及其对科技进步的作用,国内外主要海洋工程水池及主要试验设施。上述 2 章主要使读者在总体

上初步了解有关问题的概貌。第3章重点阐述模型试验研究的基础理论,包括:相似理论、海洋环境条件(特别是海浪)的理论描述、浮式海洋平台运动与受力的分析、线性系统响应的频域分析和时域分析方法。余下各章主要结合上海交通大学海洋工程国家重点实验室十多年的工作经验,系统地阐述海洋平台模型(包括锚泊线、立管等)的制作和有关参数的模拟调节;水池中风、浪、流等海洋环境的模拟;各类测试仪器的介绍和标定;模型在静水、规则波和不规则波中的试验;测量数据的采集;试验数据的处理与分析以及试验研究项目的实施规程等有关内容。此外,对于深海平台的试验技术也进行专题介绍,以适应海洋石油开发不断向深海拓展的需要。

《海洋工程水动力学试验研究》是一门专业课程,包含的内容相当广泛,有很强的实践性。上海交通大学海洋工程国家重点实验室作为配套齐全、设施一流的试验研究基地,为本课程贯彻培养学生实践能力和创新精神提供了极为有利的条件。因此,选择本课程的同学,都要结合教学内容,参加海洋平台模型试验的全部实验工作,以便通过本课程的学习,初步具备从事本领域实际工作的研究能力。

本书是高等院校船舶与海洋工程专业的本科生教材和研究生的教学参考用书,也可供海上油气开发部门、船厂、设计研究单位从事海洋工程科技人员参考。

由于本书在海洋工程水动力学试验研究领域首次公开出版,疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正为感。

编者

2007年7月

于上海交通大学海洋工程国家重点实验室

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 海洋开发与海洋工程概述	1
1.2 海洋油气开发简介	2
1.3 我国的海疆和海上油气资源	4
1.4 我国能源的形势和战略	4
1.5 海洋环境条件综述	5
1.6 海上油气开发装备——海洋平台的分类.....	10
第 2 章 海洋工程模型水动力试验研究概述	18
2.1 模型水动力试验研究沿革.....	18
2.2 模型试验对船舶及海洋平台科技进步的作用.....	19
2.3 国外海洋工程水池.....	21
2.4 中国海洋工程国家重点实验室.....	24
2.5 海洋工程水池的主要试验设施.....	27
第 3 章 海洋工程模型试验研究的水动力学基础	31
3.1 相似理论.....	31
3.2 海洋环境条件的理论描述.....	33
3.3 浮体运动的坐标系和六自由度运动.....	40
3.4 浮体所受的海洋环境载荷、流体作用力与系泊力	42
3.5 附加质量、固有周期和阻尼	46
3.6 线性系统的响应关系概述.....	50
第 4 章 模型制作及海洋环境条件模拟	53
4.1 模型缩尺比的选择.....	53
4.2 模型制作及相关参数的模拟.....	54
4.3 模型试验的海洋环境条件.....	63
4.4 风的模拟.....	65
4.5 流的模拟.....	67
4.6 波浪的模拟.....	69
第 5 章 测量仪器的分类、标定及模型测试校验	73
5.1 试验测量仪器的分类.....	73

5.2	试验测量仪器的标定	79
5.3	模型在静水中浮态的观测	82
5.4	静水中浮体模型的单自由度运动衰减试验	83
5.5	浮体及其系泊系统模型在静水中的测试	85
5.6	浮体模型的风、流作用力试验	88
第6章	模型在波浪中的试验	89
6.1	试验前水池的准备事项	89
6.2	模型在规则波中的试验	93
6.3	模型在不规则波中的试验	94
6.4	模型水动力试验的种类	95
6.5	试验数据实时采集系统简介	102
第7章	试验数据的处理与分析	104
7.1	误差分析与数据处理	104
7.2	时域统计分析	106
7.3	频域谱分析	109
7.4	交叉谱分析	111
7.5	规则波试验数据分析	113
7.6	海洋工程水池试验数据处理与分析软件	114
第8章	试验研究项目的实施规程	118
8.1	项目实施的流程框图	118
8.2	技术任务书	118
8.3	总体安排与试验大纲编制	120
8.4	试验准备	122
8.5	水池试验	122
8.6	试验总结	123
第9章	深海平台模型试验技术概述	125
9.1	解决深海平台模型试验技术的途径	125
9.2	混合模型试验技术	127
9.3	混合模型试验技术的可靠性验证	130
参考文献		137

第 1 章 总论

1.1 海洋开发与海洋工程概述

全世界的海洋面积约占地球总面积的 70%，海洋中蕴藏着丰富的自然资源，对人类的生活、经济建设及科学技术发展有极其重要的作用。自古以来，人类就对海洋进行开发利用，但在 20 世纪 50 年代以前，主要限于海上航运、海洋渔业捕捞、海水制盐业以及对海洋科学有限的探索。从 20 世纪下半叶开始，世界上许多沿海国家纷纷划定 200n mile 的专属经济区，竞相开发海洋。人们确信海洋中几乎可以获得陆地上所有的一切资源。因此，21 世纪被称为是海洋的世纪。

1.1.1 海洋资源

海洋中蕴藏的资源种类繁多，粗略说来，大体包括下列四个方面的内容。

(1) 海洋是蛋白质的宝库，水生物是蛋白质的主要来源。蛋白质是人类生活的必需品之一，海洋蛋白质资源的开发对人类的生存与发展非常重要。

(2) 海底蕴藏着各种矿产资源，其中石油、天然气的储量十分丰富。自 20 世纪 60 年代开始，海洋油气开采已成为新兴产业，目前海洋石油产量已占全球总产量的 30% 以上，以后还将逐年增加。锰结核是会年年生长的永久性资源，具有重要的开采价值。据专家预测，海洋中部分金属的蕴藏量较陆地蕴藏量高出的倍数为：锰 4000 倍，钴 5000 倍，镍 1500 倍，铜 150 倍，铁 4 倍。其他矿产资源在海底的蕴藏量也比陆地多。目前人们集中开采的是石油和锰结核。

(3) 海水及其所含的物质本身是宝贵的资源，极具开发价值。例如，海水淡化将为人类提供重要的淡水资源。在海水中可以提取铀和重氢等原子能的重要原料，有专家估计：全世界的海水体积约为 $1.37 \times 10^7 \text{ km}^3$ ，全部海水中的含铀量约 $5 \times 10^9 \text{ t}$ ，含重氢约 $1.99 \times 10^4 \text{ km}^3$ 。制盐则早就是人们对海水资源的利用。

(4) 大量的海洋自然能源如潮汐、海流、波浪等都具有大量的能量可资开发利用。不同深度海水的温差、盐度差等也都可用作发电的资源。

1.1.2 海洋开发

所谓海洋开发，主要是指海洋及其周围环境的资源开发和空间利用，其内涵的深度和广度随着科学技术的进步而不断发展。现时海洋开发的内容，大体可概括为下述五大类。

1. 海洋资源的开发

海洋资源的开发主要为海洋资源和能源的利用。包括：石油、天然气、固体矿物的开采；生物资源，鱼类与其他各种海洋生物的开发利用；自然能源，潮汐、海流、波浪、温差、盐度差发电以及海洋大气风能和太阳能的利用；水资源，海水淡化，海水中化学元素的提取，海水的直接利用等。

2. 海洋运输

海洋运输主要包括:人员、货物、材料、能源、信息等运输或传递。包括:船舶和各种海面上和海水中的交通工具;电缆、光缆的电力输送和通信信号传输;海底管道中输送石油与天然气等。

3. 勘探与测量

勘探与测量包括:有关海洋资料与数据的采集、分析和显示,包括水文、潮汐和海洋学的有关资料;利用各种科技手段探测海洋资源、结构物、特性等并预测其蕴藏量。

4. 海岸带的开发

海岸带的开发包括:利用与发展海岸和沿海水域的活动,如港口、航运和码头的建设;水上游乐场所、人工岛建设、围海造田。海岸带的开发还包括农业、渔业、盐业等。海岸带是人类海洋开发的前沿基地和黄金地带。

5. 海洋环境保护

海洋环境保护主要指防止海洋及其周围地区环境的恶化、变坏或损失等的措施,包括污染控制、侵蚀与沉积的控制、海岸保护与航道疏浚、安全保护、防波堤、防浪墙、船舶避风港的建设等。

1.1.3 海洋工程

海洋工程是为海洋资源开发提供一切手段和装备的总称,其主要内容可分为海洋资源开发技术与设施技术两大部分。

(1) 资源开发技术。主要包括:海洋矿物、石油、天然气的勘探、开采、储运等;海水资源利用技术、淡化提炼、渔捞技术、海洋养殖技术、海洋能利用技术等。

(2) 装备设施技术。主要包括:海洋勘探开发装备技术、救助设备、潜水技术、遥控技术、海洋土木建筑技术、海洋工程船舶技术等。

海洋资源的内涵丰富而广泛,基本上包罗万象。因此海洋工程所涉及的装备和技术内容也十分广泛。它与土木建筑、水利、机械、造船、航海、航空、电力电机、电子、仪器、仪表、计算机、农业、生物、化学、材料、采矿、采油等工程技术密切相关。海洋资源的开发必须与各类科学技术领域有机结合和综合应用,是内容十分广泛的系统工程。由于海洋资源开发的目的和技术不同,其内涵也各有侧重。对于船舶与海洋工程专业而言,现时主要从事的科技领域是各类船舶和海洋油气的钻采平台。

1.2 海洋油气开采简介

海洋底部蕴藏油气资源的地域、储藏量及是否可供开采等都要依靠勘探去查明。从海洋油气勘探到发现油田,再到油气开采的稳定生产,都要经过相当长时间的准备阶段,其主要过程大体包括下列四个阶段。

1. 勘探

其目的是发现海上油气田,分为普查、精查和试钻探三个步骤。

1) 普查

对某一海域利用海洋调查船、勘探船上的各种探测技术(磁场、声波、重力、人工地震)以及

海底地质、地貌的分析,初步调查海域范围内的油气资源及其分布概况。

2) 精查

对普查中认为油气可能比较集中的区域进行细致密集的勘探,通过各种勘探技术、地质、地貌的测量资料的分析,初步估计该区域油气的集中范围和储藏量。

3) 试钻勘探井

对精查中预计油气比较集中的区域利用钻井船或钻井平台试钻勘探井。获得具有工业价值油气流的第一口井称为“发现井”。然后根据地质资料,与“发现井”在同一地质构造的若干处再钻勘探井,这些勘探井称为“评价井”或“探边井”,借以证实在第一口井所发现的油层范围内油气的性质、产量,进而对该区域的储藏量和可开采量作出评价。

2. 油田估产和开采决策

根据精查和试钻探的评价资料,进一步分析和估计油田的范围、油气的贮藏量和可开采量,并进行经济分析和油气开采的可行性分析,作出对该油田是否值得开发的决策。如果决定开发,则需制订该油田的开发方案和选择合理的开采工艺。

3. 采油工程建设

包括:海洋石油平台的设计、建造以及在海上的就位安装;海底油井的设置、采油的成套设备、原油的处理系统;生产人员的配备及工作生活设施;平台在海上生产石油的输送系统(海底输油管道或穿梭油船)等全部采油工程项目。

4. 正式投产

采油工程项目建设完成并经过安装调试,确认各系统在调试后能顺利运作,该油田即可投入正常的油气生产。

海上油田从决定开发到正式投产,一般需要4~5年的时间。由于投资巨大,常采用边开采边扩大的模式,既能早期开采出油,又能逐步扩大生产,尽量减少开发投资的风险。

海洋石油平台是进行海上作业的场所,根据石油钻探和生产的需要,主要分为钻井平台和生产平台。

钻井平台上主要配置钻井设备,包括井架、钻杆、钻头等钻井系统,海底井口设备、封井系统以及控制操作系统等。钻井平台的任务是在海底建造油井,当钻至需要开采的储油层深处,该油井即可完钻,在井口中插入管柱,做好采油的准备工作。固定式钻井平台因不能移动,在钻井任务完成后常改作采油平台。

生产平台又称采油平台,是专门从事海上石油的开采、处理、贮存等生产性的作业平台。主要配置采油设备和油气处理设备。采油设备的井下部分是插入油井储油层(生产层段)的采油管柱。井口设备是由各种高压阀门组成的采油树,采油树上装有油咀以控制井口的液流。采油方法有自喷采油(如油层压力很高)和泵系统采油,其作用是将油气从储油层汇集至井底,并通过管道抽吸至井上。从油井中流出的流体是原油、天然气和污水的混合流体,先经过分离器进行脱水处理。脱水后的原油进入贮油罐并可输送至陆上贮油站;分离出来的污水经污水处理系统达到排放标准后就地排入海中。经过分离器得到的天然气再进行净化处理,达到标准的天然气可输送至陆上的贮气站,小部分废气则通过烟囱就地点火烧掉。

由上述可见,海洋油气开采牵涉的专业面很广,船舶与海洋工程专业的业务范围主要是海洋平台的设计建造,以及与调查、勘探、生产、维护等相关的水面船舶、半潜和深潜器等载体的设计建造。

1.3 我国的海疆和海上油气资源

我国海域辽阔,北起渤海之滨,南达南沙群岛,东南面与太平洋相连,跨越温带、亚热带和热带三大气候带。海区周围与朝鲜半岛、日本、菲律宾、印度尼西亚、马来西亚、新加坡、泰国、柬埔寨、越南等国家相界。海域的总面积约 $4 \times 10^6 \text{ km}^2$,海岸线长约 $1.8 \times 10^4 \text{ km}$,大小岛屿 6000 多个。

渤海是相当封闭的内海,与黄海相邻。其水文、气象受大陆的影响较大。渤海是浅海,水深平均为 18m,最大为 70m。由辽东湾、渤海湾等部分组成,南北长约 300n mile,东西宽约 160n mile,面积约为 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

黄海为半封闭的浅海,位于我国大陆与朝鲜半岛之间,其水文、气象易受大陆的影响。南北长约 470n mile,东西宽约 300n mile,面积约为 $3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。水深平均为 44m,最大水深 140m。

东海为一边缘海,其水文、气象主要受太平洋的影响。南北长约 700n mile,东西宽约 400n mile,面积约为 $7.7 \times 10^5 \text{ km}^2$,水深平均为 370m,最大水深达 2000m 以上,台湾浅滩的水深仅 15m~20m。

渤海、黄海和东海有时总称为东中国海,处中纬度地带,总体上具有温带海的性质。东中国海大部分海域的水深在 200m 以内,大陆架的面积约占 80%。

南海的全称是南中国海,是与太平洋和印度洋相连的边缘海,面积约 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。南海的水深很大,平均水深约为 1140m,最大水深达 5000m 以上。南海中岛屿众多,较为著名的有西沙群岛、南沙群岛、东沙群岛和中沙群岛等。南海西北角有北部湾和暹罗湾,北部湾的水深较浅,约为 100m。

我国海域的油气蕴藏量相当丰富。国土资源部从 1999 年到 2004 年组织实施“新一轮国土资源大调查”,在中国管辖海域全方位进行了油气资源战略性调查。调查结果表明,海域油气资源量可达 $4 \times 10^{10} \text{ t}$ 以上的油当量,是中国 2003 年进口石油总量($9.113 \times 10^7 \text{ t}$)的 430 多倍。其中,南海的石油地质储量估计在 $2.3 \times 10^{10} \text{ t}$ 至 $3 \times 10^{10} \text{ t}$ 之间,是世界四大海洋油气聚集中心之一,有“第二个波斯湾”之称,极具勘探开发潜力。

自 20 世纪 60 年代初开始,我国首先对渤海湾进行油气的勘探与开采。至 20 世纪 80 年代,对黄海、渤海、东海、珠江口海域、南海北部湾、海南岛南侧的海域由近及远进行了油气的勘探与开采。海洋石油的产量迅速增加,1996 年的年产量首次超过 $1 \times 10^7 \text{ t}$,2002 年首次超过 $2 \times 10^7 \text{ t}$,2005 年已达 $4 \times 10^7 \text{ t}$ 。海洋油气已成为我国能源供给的重要组成部分。

半个多世纪来,我国海上油气的开采取得很大的成绩,但主要集中于近海浅水区域,对于远海深水海域尚处于起步阶段。向远海深水区域勘探和开采油气资源,已成为当务之急。

1.4 我国能源的形势和战略

改革开放 20 多年来,我国在国民经济的发展和人民生活水平的提高方面取得了巨大的成就。与此同时,对能源的需求也与日俱增,连续 20 多年的经济高速增长和人民的生活需求,使我国能源的短缺状况日趋明显。新世纪以来,全国许多省市电力供应不足,拉网限电的现象时

有发生,柴油供应也曾一度出现过紧张情况。

我国是世界上能源的生产大国,2003年中国的能源生产是世界第三位,煤产量居世界首位,石油、水电也是名列前茅。但是我国又是世界上的能源消费大国,2003年石油消费总量达到 2.74×10^8 t,超过日本,成为仅次于美国的世界第二大石油消费国。预计到2020年,需求量将达 4×10^8 t,年均递增12%。据国家统计局表明:在2000年以前,我国国民经济平均年增长为9.7%,石油消费年增长为5.77%,而我国石油生产的年增长仅为1.67%,其缺口依靠进口来弥补。我国至1996年已成为石油的净进口国,2003年进口原油 0.91×10^8 t,占国内石油消费总量的33%,是继美国、日本之后的世界第三石油进口大国。2005年我国消耗石油 3.17×10^8 t,进口 1.36×10^8 t,进口依存度达42.9%。2006年1~9月,进口量达到 1.38×10^8 t,已经超过2005年全年进口量。

能源是国家的命脉,关系到我国经济建设和战略安全。国家已经提出了可持续发展走新型工业化的道路,到2020年国民经济总产值要比2000年翻两番,实现全面建成小康社会的目标。但是能源不足将在相当长的时期内成为制约我国国民经济发展的一个重大问题,千方百计增加国内能源生产和降低能源消费,“开源节流”是解决能源短缺的重要措施,但仍然不足以弥补大量的缺口。根据统计资料预测:到2020年,中国的石油缺口约 2.5×10^8 t~ 4×10^8 t,天然气缺口约 8×10^{10} m³,需要依赖从国外进口。实施能源国际化的战略方针是解决我国能源短缺的重要措施之一。

所谓能源国际化的战略措施,就是从世界进口石油和天然气,确保国民经济建设持续发展获得所需的能源。为此,需要建立稳定安全的能源(石油、天然气)供应链,包括:

- (1) 能源供应国(石油、天然气输出国)。
- (2) 能源运输。
- (3) 安全抵达我国(输入国)的能源库。

我国大量进口石油和天然气,将能源链暴露在错综复杂的地缘政治的格局之中,从而对我国的能源安全提出了严峻的挑战,一旦遇到战争、外交或其他紧急情况,我国有可能面临断油、缺油的危险。为此国家实行和平外交方针,寻求、扩大可靠的供应国,以确保石油、天然气的充足货源。同时组建一支强大的油轮船队,承担我国进口石油的运输任务,以确保能源运输的安全。

目前我国石油进口的主要来源是中东地区(伊朗等国家),另外从俄罗斯、非洲和亚太地区也进口了大量石油。除纯粹以贸易方式进口石油外,中国的石油公司以设备、技术等投资形式在中东、非洲的一些国家中联合开采油气资源,从中分得属于我国的石油份额。此外,我国石油公司还采取收购国外石油公司股份等形式进行投资,借以获得属于我国的经济利润和石油份额。

无论是开采我国海域的油气资源,还是和国外联合开采,都是为了缓解我国的能源短缺。海洋油气开发已经成为国家能源战略的重中之重,对国民经济建设、国家安全战略有着十分重要的意义。

1.5 海洋环境条件综述

海洋平台一般是在某一海区定点作业,要受到海洋环境条件的影响。从海洋工程水动力性能研究的角度来说,所谓海洋环境条件,通常是指风、浪、流及水深。

1.5.1 风

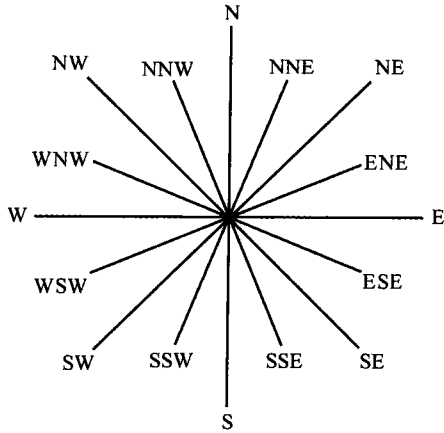


图 1-1 风向方位图

风是常见的自然现象,与人类的生活和生产活动关系密切。风的特征主要是风向与风速。风向是指风吹来的方向,习惯上用 16 个方位来表示,如图 1-1 所示。图中 N 为北、E 为东、S 为南、W 为西、NW 为西北、NNW 为西北偏北、WNW 为西北偏西等。风速是空气在单位时间里流动的距离,一般以 m/s 或 kn(n mile/h)来表示。我国采用国际上通用的蒲氏风级表将风速分为 13 个风级。

海上风速和风向是与大气运动密切相关的自然界随机现象,有所谓季风、寒潮大风、热带风暴、台风、飓风等各种名称。狂风或风暴必然引起海上的巨浪,海洋平台直接受到它的威胁。因此,风是影响海洋工程的重要环境因素之一。

海洋平台所在的作业海区,如有统计资料绘制的风玫瑰图(见图 1-2),则可求得一年中出现大风天数的平均值,以供施工作业参考。为保证海洋平台长期作业的安全性,常以五十年一遇或百年一遇的最大风速作为设计风速。

1.5.2 浪

海面上产生波浪的原因很多。如风作用于海面产生的风浪,月球引力的改变产生的潮汐波,海底火山或地震产生的地震波,船舶行驶产生的船行波等等。通常所说的海浪一般是指风浪。风浪是海面上分布最广、对于船舶航行和海洋平台生产作业影响最大的波浪。因此,这里介绍的浪是指风浪。

由于风是形成海浪最常见的原因,习惯上人们常把浪和风联合在一起。海平面上风的运动形式(风向、风速大小)复杂多样,因而风所引起的海浪在形式上也极为复杂。风浪的大小及其传播方向是紊乱和不规则的,不可能用一个简单的数学公式来描述,所以经常把风浪称为不规则波。对于流体力学中以简单的数学关系来表征的波浪称为规则波。

风在停止作用后海面上仍然存在的波浪,或传播到风区以外的波浪可以认为是接近二因次的规则波,通常称为涌浪,其特点是一个接着一个谐和前进的波浪。大风暴兴起的波浪具有很大的能量,可以传播到风暴区以外很远的海域,逐渐形成规则的涌浪。

海面上形成的波浪除与风速、风向及风的作用时间有关外,还与海域是否开阔、海水的深

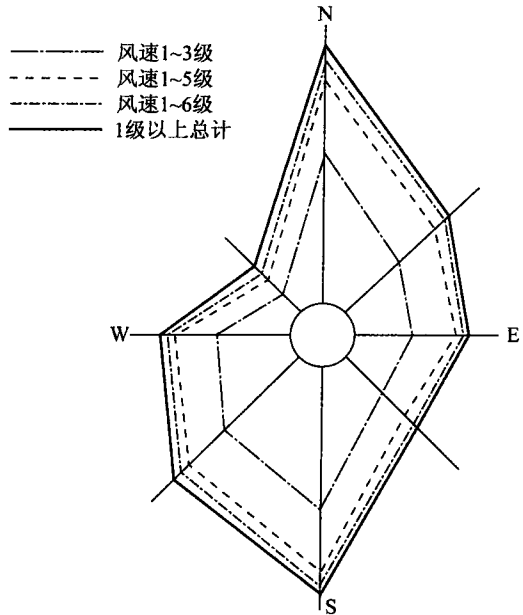


图 1-2 风玫瑰图

浅等因素有关。波浪的特征主要是波长、波高以及传播速度和方向。人们常见的风浪主要有：

(1) 长峰波。由同一方向传播的一系列波浪所组成，为二因次波，有规则波和不规则波两种。涌浪是一排排波峰线很长的波由远处传来，形状整齐，可以认为是规则波，通常海面上所见的都属不规则长峰波。

(2) 混合波。海面上往往既有远方传来的涌浪，又有风在该处产生的波浪，成为两者混杂在一起的混合波。

(3) 短峰波。海面上由于风向的变化或不同方向的风浪叠加在一起，波峰线很短，称为短峰波。短峰波是三因次波。海面上见到一堆一堆的锥形波浪，是短峰波中最为明显的例子，人们称之为三角浪或金字塔浪。

(4) 浅水波和破碎波。远处深海中的波浪向浅水区域传播的过程中，因受水底的影响，波浪的形状不断变化，从深水波变为浅水波。在很浅的水域，波峰会向前翻卷而破碎，称为破碎波。

海浪的威力十分巨大，是影响海洋工程最重要的环境因素。为保证海洋平台长期作业的安全性，常以五十年一遇或百年一遇的最大波浪作为设计的依据。海洋平台所在的作业区域如有统计资料绘制的波浪玫瑰图，则可以估计海洋平台在一年中能够进行生产作业的天数。

各国气象部门或海洋局常以风级、浪级或海况等描述海上风浪的情况，有些还给出了风级和波浪高度的关系。由于海域的情况不同，各种资料常有差异，在具体使用这些资料时应特别予以注意。国际上通用的蒲氏风级表将风划分为 13 级，对于风名、风速、海面特征、浪高等都有一般性的描述(见表 1-1)。我国国家海洋局将海浪分成 10 级，并给出了波浪的名称和浪高范围(见表 1-2)。

表 1-1 蒲氏风级表

风级	风名	风速/(m/s)	海面特征	浪高/m	海面状况
0	无风	0~0.2	海面平静如镜(无浪)	—	平如镜
1	软风	0.3~1.5	海面有波纹，但无白色波峰	0.1	微波
2	轻风	1.6~3.3	波纹虽小，但已明显，波峰透明如玻璃但不碎	0.2	小波
3	微风	3.4~5.4	波较大，波峰开始分裂，泡沫有光，间有白色波浪	0.3	
4	和风	5.5~7.9	小浪，波长较大，往前卷的白碎浪较多，有间断呼啸声	1.0	轻浪
5	劲风	8.0~10.7	中浪，波浪相当大，白碎浪很多，呼啸声不断，有时有浪花溅起	2.0	中浪
6	强风	10.8~13.8	开始成大浪，波浪白沫飞布海面，呼啸声大作，可能有少许浪花溅起	3.0	大浪
7	疾风	13.9~17.1	海面有如波浪堆成，碎浪白泡沫开始成纤维状，随风吹散，飞过几个波峰	4.0	巨浪
8	大风	17.2~20.7	中高浪，波长更大，随风吹起的纤维状更明显，呼啸声更大	5.5	狂浪

(续表)

风级	风名	风速/(m/s)	海面特征	浪高/m	海面状况
9	烈风	20.8~24.4	高浪,泡沫纤维状更浓密,海浪翻卷,泡沫将影响能见度,怒涛	7.0	怒涛
10	狂风	24.5~28.4	大高浪,波浪长形突出,纤维状泡沫更浓密,成片状,海浪颠簸有如槌击,浪花飞起带白色,能见度受影响	9.0	汹涛
11	暴风	28.5~32.6	特高浪,海上的中小型船舶有时可能被浪所蔽,波峰边缘被风吹起泡沫,能见度受影响	11.0	非凡现象
12	飓风	32.7~36.9	空气中充满泡沫和浪花,海面因浪花飞起成白色状态,能见度剧烈降低	14.0	

表 1-2 中国国家海洋局浪级

浪级	名称	浪高/m
0	无浪	0
1	微浪	<0.1
2	小浪	$0.1 \leq \bar{H}_{1/3} < 0.5$
3	轻浪	$0.5 \leq \bar{H}_{1/3} < 1.25$
4	中浪	$1.25 \leq \bar{H}_{1/3} < 2.5$
5	大浪	$2.5 \leq \bar{H}_{1/3} < 4.0$
6	巨浪	$4.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 6.0$
7	狂浪	$6.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 9.0$
8	狂涛	$9.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 14.0$
9	怒涛	$\bar{H}_{1/3} \geq 14.0$

1.5.3 流

海洋中水的流动是一种自然现象。海流是大范围的海水以相对稳定的速度沿水平方向连续的流动,它有一定的流程、宽度、厚度和速度,其特征主要是流向与流速。海流是海洋中主要的动力源之一,和风、浪等要素同时对海洋工程有直接的作用。在设计海洋平台的水下部分时,必须考虑海流引起的载荷。

海流是由各种原因引起海水转移而形成,且与气候、地域等因素密切相关。风海流是因为风在海面吹过使海水产生的流动。潮流是因为潮汐涨落使海水在水平方向上周期性的流动,由外海到内海流向港湾的潮流称为涨潮流,由港湾流向外海的潮流称为落潮流。在海岸、河口、海湾、海峡和港湾等处,由于地形限制,水流速度的最大与最小值相差较大。海洋环流是由大气和海洋相互作用而形成的海流,全世界海洋中最强的环流是墨西哥湾流,其表面流速为3.0m/s,其次为黑潮,表面流速为2.0m/s。陆地上的大江大河水系,因融冰或大量降雨而使

河水猛涨,形成强大的水流流向外海,入海后又继续向外延伸而形成海流。此外,还有暖流和寒流等形成的海流。

海流的情况比较复杂。有的海域水流速度随水深的变化不大,可以近似地以平均流速来表示,而有些海域的水流速度随水深的变化较大,则应考虑水流速度随深度变化的规律。海洋平台在作业海区内海流的分布以及流速、流向的变化,是根据长期积累的统计结果与实测资料相结合为依据进行分析。为了保证海洋平台长期作业的安全起见,常以五十年一遇或百年一遇的最大流速作为设计流速。

1.5.4 水深

水深是指海洋静水面至海底的垂直距离,通常称为海洋平台的工作水深。海洋中浅水区域和深水区域都有丰富的油气资源,因此海洋石油开采的工作水深范围很大,从几十米直到二三千米以上。水深范围的定义随海洋科学技术的进步会发生变化,目前,人们通常把500m以下水深称为浅水,500m~1500m水深称为深水(Deepwater),1500m以上水深称为超深水(Ultra-deepwater)。水深对于海洋平台形式的选择有很大的关系,例如对浅水区域常采用固定式平台,在深水和超深水区域则选用浮式平台。

海底的情况相当复杂,有地形与地貌的特征、海底沉积的特征、泥沙运动规律、海底沉积层的力学性能等。所有这些因素在固定式平台的设计、建造和安装中都应仔细考虑。海底情况对浮式平台的影响较小,但水深对平台的系泊定位系统(锚泊线的长度、悬链线的伸展范围等)有直接的影响。

从海洋平台水动力学研究的角度来说,一般不考虑海底的地形地貌,认为海底是平整的,由此确定平台在风、浪、流作用下的受力,作为平台结构强度计算和设计的依据。

1.5.5 海冰

在寒冷地区海域作业的海洋平台,会遭受海冰侵袭的威胁。海冰对海洋平台的作用力是冰压力,例如:海洋平台被巨大的冰层包围;在潮流和风的作用下大面积的冰层有整体移动趋势,海洋平台会受到挤压;因环境温度变化引起冰层的膨胀,产生挤压海洋平台的膨胀力;自由漂浮的流冰会撞击海洋平台而产生冲击力等。因此,海冰对海洋平台的作用力是寒冷结冰海域所必须考虑的控制载荷。

1.5.6 极限海况和作业海况

海上的风浪情况千变万化,有时风平浪静或风浪很小,有时则狂风巨浪乃至12级以上的台风浪潮。对于海上风浪的划分有多种描述,蒲氏风级表和我国海洋局的浪级表是典型的宏观表示方法。风平浪静或狂风巨浪是海上风浪出现概率很少的特殊情况,多数是介乎两者之间。

恶劣海况对于海洋运输船舶的危害相对较少,它们可以根据气象预报驶离危险区域以躲避狂风巨浪的袭击。对于海洋石油平台则不然,它们长期在某一特定海区油田从事生产作业,必须能经受住最恶劣海况的侵袭而不致损毁。因此,海洋油气开发是高风险的行业。一座海洋平台的初始投资极为昂贵,使用寿命大致为20年至30年。根据海上油气开发及海洋环境条件的特点,对于海洋平台结构及其装备的设计、建造及生产作业必须满足下列两种特殊海洋

环境条件。

(1) 生存条件(Survival Condition):是指保证海洋平台及其设备安全的最苛刻的条件。海洋平台在狂风巨浪的侵袭下,工作人员虽已撤离,但海洋平台本身的结构、锚泊系统必须具有足够的强度,不致被狂风巨浪损毁或冲走。另外,平台上各系统的所有设施能经受住风浪的侵袭而不致损坏,以保证在恶劣海况过后,工作人员返回平台能继续从事生产作业。生存条件所对应的海况称为最大的极限海况(Ultimate Limit State)。通常取海域环境统计资料中平均100年(有时取50年)只出现一次的最恶劣、最危险的海况,简称百年一遇海况。

(2) 工作条件(Operational Condition):是指工作人员和设备能够坚持进行生产作业的条件。海洋平台虽然受到风、浪、流的作用,但平台上的采油系统、油水分离处理系统以及人员生活起居设施系统的各种装备仪器等仍能安全运行,坚持正常生产作业。工作条件所对应的海况是海洋平台能够坚持生产作业的最高海况,简称作业海况(Operation Sea State),大体相当于6~7级海况。

海洋平台水动力性能试验研究特别关注的是上述两种特殊海况。对于平台在百年一遇的恶劣海况下,要测量和预报平台在风、浪、流作用下的运动、载荷、锚链受力等各项数据,作为平台结构、各种系统及锚链等设计和建造的依据。对于平台在给定的作业海况下,同样要测量和预报平台的运动、载荷、锚链受力等各项数据,借以检验、分析和评价各种系统设备能否正常安全运营,工作人员是否能承受晕船等现象而坚持工作。

此外,陆上建造的海洋平台需要拖运至指定海域,然后进行就位、安装并对各系统检测调试后才能投入生产。为了保证上述工作的顺利安全起见,常对在给定的海洋环境条件下进行平台模型拖运和安装的水动力性能试验。海洋平台的拖运和安装通常都是在海面相对平静的季节进行,因而对模型试验所给定的海洋环境条件大体相当于3~4级海况。

1.6 海上油气开发装备——海洋平台的分类

人类对于海上油气的开发是从近海浅水区域开始,以后逐步走向远海深水区域。1887年,在美国墨西哥湾离海岸不远的几米深的海水里,建造了世界上第一座海洋平台,这是海洋石油勘探开发的起步点,也是世界海洋工程产业的起步点。20世纪40年代之前,海洋石油勘探开发处于初始阶段,主要建造木结构海洋平台和人工岛,作业水深小于10m。20世纪50~60年代,海洋石油勘探开发迅速发展,出现了浮式海洋平台,作业海域范围不断扩大,水深不断增加。至20世纪60年代末,作业水深已超过200m,开始向大陆架深水区延伸。20世纪70~80年代,随着海洋平台和钻井技术的发展,作业水深超过500m,成功开发了欧洲北海和美国墨西哥湾大陆架深水区油气资源。20世纪90年代以后,海洋油气勘探开发取得巨大进步,作业水深不断刷新,作业范围已扩展到西非、南美、中国、东南亚、澳大利亚等世界各大洲海域。目前,海洋油气钻井平台的工作水深已超过3000m,生产平台的工作水深也已超过2000m。

海洋平台分为固定式和浮动式两类,固定式平台主要用于浅海区域的油气开采,浮动式平台可用于浅水、深水及超深水海域的油气开采。一般来说,所有开采油气的海洋平台,都配置采油系统、油水分离处理系统和工作人员起居设施系统的各种装备,同时可将处理后的原油由海底输油管道或穿梭油轮运往陆上贮油库储存。