

方华灿 编著

海洋石油工程

(上册)

HAIYANG SHIYOU GONGCHENG
HAIYANG SHIYOU GONGCHENG



石油工业出版社

海洋石油工程

(上册)

方华灿 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从海洋特点出发,系统、全面地论述了海洋石油工程。

本书共7章,分上、下两册出版。本册为上册,主要内容包括海洋石油工程环境与环境载荷、海洋油气钻井与装备、海洋采油(气)工程与装备。

本书可供从事石油工程、海洋石油工程及相关专业的科技人员和管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋石油工程/方华灿编著.

北京:石油工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-5021-7441-5

I. 海…

II. 方…

III. 海上石油开采

IV. TE53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第183694号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:54.25 插页:1

字数:1348千字 印数:1—3000册

定价(上、下册):245.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究



方华灿 简介

中国石油大学(北京)教授,原籍安徽定远,1930年3月9日出生,中共党员。1952年8月毕业于天津北洋大学(今天津大学)机械系。历任清华大学石油系教师;北京石油学院、华东石油学院(自北京迁校山东后更名)机械系副系主任、系主任;1984年起任华东石油学院副院长;1988年学校更名石油大学后任石油大学(华东)副校长;1992年任石油大学(北京)校务委员会副主任;1996年退休;1996—2008年任石油大学(北京)机电工程学院教学专家组组长,2009年任中国石油大学(北京)校级教学专家组组长;现还担任中国石油和石化设备工业协会顾问。曾为本科生及研究生开设了:石油钻井机械、海洋石油钻采装备与结构、机械振动学、海洋石油钻采设备理论基础、可靠性工程等11门课程;曾开展了“海上结构物的安全与可靠性研究”等10余项科研课题,获得了国家科技进步奖二等奖1项,省、部级科技进步奖一、二等奖10项,获中国专利2项;共发表论文约200篇,其中,国外发表40多篇,为SCI和EI等收录近30篇;培养出研究生40余名;出版了《海洋石油钻采设备理论基础》、《海洋石油钢结构的疲劳寿命》、《冰区海上结构物的可靠性分析》、《油气长输管线的安全可靠分析》、《Mechanism Design》、《Design of Mechanical Elements》、《论高等学校的课堂教学》等著作14部;建立了用于海洋石油工程的“模糊概率断裂力学”新学科分支,并于1999年出版了专著《模糊概率断裂力学(海洋工程用)》。1992年被评为国家有突出贡献专家,享受政府津贴。

八十岁来临完成此书编写后感：

教书育人桃李栽，
年华已度八十载，
老骥伏枥献此书，
耄耋尤应壮志在。

农历己丑年仲夏命笔

方华灿

序

方华灿教授,原为石油大学副校长,1930年3月出生。在他80岁来临之际,编写了120万字的《海洋石油工程》专著,分上、下两册由石油工业出版社出版。

最近,听说他的这部长篇著作就要问世,而且是他花了几年心血,执笔耕耘,献给他自己的80寿辰,我感到由衷的高兴。因此,首先我要对他80岁华诞的来临以及他编写的《海洋石油工程》这本著作的即将出版,表示诚挚的祝贺!

方教授自1952年(大学毕业)开始,先后在清华大学石油系、北京石油学院、华东石油学院(迁校山东后更名)、石油大学(1988年更名)任教。他曾先后为本科生及研究生讲授过:石油钻井机械、石油矿场机械、石油钻采机械可靠性设计、海洋石油钻采装备与结构、海洋石油钻采设备理论基础等十几门课程,教学经验丰富,写作能力强。

方华灿教授开始是从事陆上石油矿场机械的教学及科研工作的。他从1964年响应当时石油工业部的“下海”号召,才转为专攻海洋石油钻采装备与结构。可以说,他从事海洋石油教学、科研是比较早的。

四十五年来,方教授在海洋石油工程的教学科研方面做了大量工作。他培养了很多本科生与研究生,仅研究生即近40名。他出版了:《海洋石油钻采设备理论基础》、《海洋石油钢结构的疲劳寿命》、《冰区海上结构物的可靠性分析》、《油气长输管线的安全可靠分析》、《模糊概率断裂力学(海洋工程用)》等专著。他从事的“海上结构物的安全与可靠性研究”等10余项科研课题,获得了国家科技进步奖二等奖1项,省部级科技进步奖一、二等奖10项,并获国家专利2项;共发表论文约200篇,其中,国外发表40多篇,为SCI和EI等收录近30篇。可以说,方华灿教授在海洋石油工程方面硕果累累,教书育人、科研成果“双丰收”。的确,他在海洋石油工程专业领域,有较深的造诣。

方华灿教授写的这本《海洋石油工程》一书,从“海洋石油工程环境与环境载荷(第一章)”这个特点出发,不仅全面论述了:“海洋油气钻井工程与装备(第二章)”、“海洋采油(气)工程与装备(第三章)”、“海底管道工程与管缆工程(第六章)”以及“海洋石油的安全系统工程(第七章)”;而且,还专门阐述了:“深海油气工程中的特殊问题(第四章)”和“滩海石油工程中的特殊问题(第五章)”。全书内容全面、系统、丰富、深入,海洋与石油相结合,工艺与装备相结合,理论与实际相结合。我认为:这本书是有关海洋石油工程方面的一本好教材、好参考书、好科技读物,对教学、科研、生产工作人员都很有用。

方华灿教授已趋耄耋之年,但他仍不忘自己多年从事的海洋石油事业,仍以旺盛的精力,勤于笔耕,坚持数年,写出这本长篇专著。他的这种崇高的敬业精神,他的这种老骥伏枥的顽强意志,他的这种坚持不懈的毅力,他的这种严谨治学的作风,确实使人敬佩。我作为他的老同学、老同行,再次向他致敬,并预祝他生日快乐、健康长寿!

原大庆油田石油会战副指挥兼总工程师
原石油工业部海洋石油勘探局常务副局长兼总工程师
原塔里木石油会战指挥部常务副指挥(正局级)、教授级高级工程师

王炳诚

2009年7月

前 言

中国的海洋石油工业是在 1964 年发现大港油田(当时叫 641 厂)之后,于 1965 年石油工业部决定“下海”才开始的。虽然,中国比世界海洋石油晚开始了 70 多年,但是通过几十年的艰苦奋斗,中国以惊人的速度,在海上油气田勘探开发方面,取得了举世瞩目的丰硕成果。中国已在 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的近海大陆架范围内,找到了渤海、南黄海、东海、南海珠江口、北部湾莺歌海以及台湾浅海等 6 个大型含油气盆地,预计石油资源约有 $(150 \sim 200) \times 10^8 \text{ t}$,天然气资源约为 $14 \times 10^{12} \text{ m}^3$,海洋油气资源十分丰富。

1982 年中国颁布了《中华人民共和国对外合作开采海洋石油资源条例》,并成立了中国海洋石油总公司,中国的海洋石油工业又迈出了新的步伐。这 20 多年来,中国坚持对外合作与自主经营并举的方针,坚持体制创新、技术创新,走国际化发展的道路,在海上油气田开发生产方面,取得了高速度、高效益持续增长的辉煌业绩。石油年产量已从 1982 年的年产量 $8 \times 10^4 \text{ t}$ 发展到 2008 年的年产油气 $4293 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量。以中国海洋石油总公司为例,至 2008 年总资产已达 4285 亿元,净资产已达 2916 亿元,销售额已达 1983 亿元,利润总额 677 亿元,上缴税金 569 亿元,为中国国民经济做出了重大贡献。而且,从中国海洋石油总公司已投产的 20 多个油气田来看,绝大多数可采储量有较大幅度增长,在高速开采的条件下,保持了油气产量的稳定和增长,主要油气田的开发指标均优于设计指标。总之,几十年来海洋石油发展的历史是一部技术创新的历史,它建立起了科学创新体系,掌握了生产与管理的关键技术及其配套技术,培养了一批科技与管理人才,为海洋石油工业今后的进一步发展,奠定了坚实的基础。

我国海洋石油的业绩这样辉煌,海洋石油工程的经验这样丰富,很需要有一本系统、全面地阐述海洋石油工程的科学理论与实践的读物。但是,迄今为止尚未见到。我从 1965 年开始自陆上石油转到海洋石油,一直从事海洋石油工程的教学与科研工作,我觉得我应该尽一份力量,执笔耕耘,写出《海洋石油工程》这本书,来表达我对海洋石油工程几十年来的深厚情结,这就是我决定写这本书的初衷。

海洋石油工程是由钻井、采油、油气集输、油气生产处理以及储存运输等一系列环节组成的系统工程。因此,这本书从系统观点出发,将海洋石油工程作为一个整体,作出了系统、全面的论述。第一章从与陆上不同的风、波浪、海流和海冰等海洋环境的特殊性,论述了海洋石油工程结构承受的海洋环境载荷的计算理论和方法;第二、三两章分别围绕油气钻井和采油(气)工程,着重介绍了具有海洋特色的如拖航就位、浮式钻井、重找井口回接完井和浮式采油(气),海上油气集输等工艺,以及钻柱升沉运动补偿装置,动力定位系统、水下采油系统和海上油气生产处理设施等装备;针对中国发展

海洋石油当务之急,在第四章根据向深海要油气的需要,专门就深水钻井、采油(气)工艺与装备中的特殊问题,如双梯度钻井、张力腿平台等作了介绍;在第五章从加速开发如唐山南堡滩海油田的需要出发,专门介绍了滩海石油工程中的特殊问题,如人工岛及滩海运载工具等;第六章是海底管道与管缆工程,它从与陆上不同方面,对设计与施工中的特殊性,如铺设过程与埋置后的稳定性设计计算以及铺管船装备等作了介绍;第七章对保障海上油气田正常生产的安全问题,专门做了介绍,着重从海洋石油工程结构的安全可靠性分析的计算理论与方法、海上油气田的事故树分析方法以及海洋石油工程中的风险分析理论与方法等方面做了论述。

这本书写作的时间较长,达两年之久。在整个编写过程中,着重考虑了以下几个问题:

第一,石油与海洋的结合问题。客观事物都不是孤立的,而是相互关联的。自然科学的各个门类,也都不是绝对割裂分开的。因此,学科间的交叉渗透受到了普遍的重视。海洋石油工程是一个交叉(边缘)学科,它与海洋、石油、机械、土木等几个学科均有关联,但是主要的是石油学科与海洋学科的结合。因此,《海洋石油工程》作为一本书,必须要解决好海洋与石油的有机结合问题。例如,本书论述海冰激发的振动时,就力图将海洋学科中有关海冰生消、运动与力学中的冰力学和机械学科中的振动理论以及海洋石油工程中平台含锥体结构的减振效能分析和石油工程中对冰激振动的减小措施的要求等有机结合起来,进行阐述。

第二,普遍与特殊的结合问题。客观事物既存在普遍性,又有其特殊性,如果不研究矛盾的特殊性,就无从确定一事物不同于他事物的特殊本质。因此《海洋石油工程》这本书的重要任务就是要揭示海洋石油工程不同于陆上石油工程的特殊本质。这就要求在这本书中,要努力突出海洋的特色。例如本书在介绍钻井工程时,着重阐述与陆上钻井不同的拖航就位等钻前准备工作,海上浮式钻井的作业程序、水下完井的工艺与装备以及海上弃井和重找井口及回接作业等,力图在一般的钻井工程中,突出海洋特色。

第三,工艺与装备的结合问题。一般来说,装备是手段,它从设计到使用以至维修都应该是为工艺服务的,可以说装备若脱离了工艺就失去了目标,失去了服务的对象,“皮之不存,毛将焉附”。因此,将工艺与装备分离开来,各成系统,分别立论,是会带来弊端的。从这点出发,本书编写时力图将海洋石油钻井工艺、采油工艺、管输工艺、油气集输工艺以及海上油气生产处理工艺等与其使用的装备结合起来进行论述。

第四,理论与实际的结合问题。理论是从实际中来的,但是,反过来理论又要为实践服务,检验理论的唯一标准就是实践。因此,如何解决好理论与实际的结合问题,始终是本书编写过程中考虑的一个重要问题。本书在涉及工程中的工艺技术问题,力求与现场人员沟通,尽量使其符合实际应用;在涉及工程装备问题时,努力搜集有关资

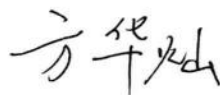
料,尽量使其能与现用的和未来的新产品一致;在涉及理论成果时,尽量使其能学以致用,给出较详尽的应用步骤、方法和应用实例。总之,努力采取措施,力求在理论与实际的结合方面,有所前进。

本书写作时曾引用了如书中所列的一些中外参考文献,这些作者对本书内容的形成,作出了重要贡献,谨向他们致以诚挚的感谢!本书引用的有些资料和研究生的论文等,属于未公开出版的,因而未能列入本书的参考文献中,其中作者有:博士生陈国明、段梦兰、罗延生、岳前进、段忠东等,硕士生有余雄鹰、许发彦、徐兴平、隋信众、赵学年、贾星兰等,谨向他们致以歉意,并表示衷心的感谢。还有一些企业、事业单位,如中国海洋石油总公司及其渤海石油分公司、东海石油分公司、南海西部石油分公司、海洋石油工程股份有限公司等以及中国石油集团经济技术研究院、中海石油(中国)有限公司北京研究中心等,都为本书提供了许多现场经验及各方面的资料,这里,再次向这些单位及余雄鹰高级工程师等有关人员,致以由衷的感谢。

本书得以出版曾得到了中国工程院顾心怿院士和赵国珍教授的评审推荐;曾得到了中国石油大学(北京)领导张来斌、吴小林等教授与其机电工程学院领导张宏、王德国等教授和路秀美、梁伟以及海洋油气研究中心段梦兰教授的大力支持,还得到了中国石油大学(华东)领导仝兴华、齐明侠等教授及其机电工程学院和海洋石油钻采设备研究室等单位以及石油工业出版社何莉编辑等的大力支持,谨向他们诚挚致谢!

本书可供从事石油工程、海洋石油工程及相关专业的科研和工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业的本科生、研究生参考。

本书共七章均由方华灿执笔完成,写作中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正,不吝赐教。



2009年3月

目 录

| | |
|--------------------------------|-------|
| 第一章 海洋石油工程环境与环境载荷 | (1) |
| 第一节 概述 | (2) |
| 第二节 风及风载荷 | (3) |
| 第三节 潮汐和海流及海流力 | (9) |
| 第四节 海浪及随机海浪谱 | (18) |
| 第五节 海浪的波动理论与波浪力 | (38) |
| 第六节 海冰与冰载荷 | (72) |
| 第七节 海啸与地震力 | (97) |
| 第二章 海洋油气钻井工程与装备 | (106) |
| 第一节 海洋油气钻井平台(船) | (106) |
| 第二节 海洋油气钻井的井口及井口装置 | (147) |
| 第三节 海洋油气钻井前期主要准备工作 | (171) |
| 第四节 海洋油气钻井的作业程序 | (180) |
| 第五节 海洋油气钻井的完井作业 | (197) |
| 第六节 海洋油气钻井的弃井与回接 | (212) |
| 第七节 中国海洋钻井新技术 | (222) |
| 第八节 海上钻井用钻机 | (227) |
| 第三章 海洋采油(气)工程与装备 | (254) |
| 第一节 海上油气的集输与生产 | (254) |
| 第二节 海上油气田的生产设施 | (276) |
| 第三节 海上采油(气)工艺与装备 | (321) |
| 第四节 海上修井作业与装备 | (354) |
| 第五节 连续油管技术与装备 | (369) |

第一章 海洋石油工程环境与环境载荷

通常将海水深度在 2000 ~ 3000m 以内称作海,而将水深超过 3000m 称为洋,统称海洋,洋是海洋的中心部分,它约占海洋总面积的 89%。现代海洋中的海水总体积约 $13.7 \times 10^8 \text{m}^3$,占地球总水量的 97%,全世界海洋总面积占地球表面积 $5.11 \times 10^8 \text{km}^2$ 的 70.9%。海洋中资源丰富,其中石油及天然气资源就是海洋中蕴藏着的重要战略资源之一。海洋中蕴藏着丰富的油气资源。目前,世界上已在海上发现了油气田 1600 多个,仅其中已投产的 200 多个油气田,年产量即达到 $12 \times 10^8 \text{t}$,约占世界石油总产量的 1/3。

中国既是一个陆地大国,也是一个海洋大国,海岸线长逾 18000km,还有海南岛、台湾等岛屿的海岸线 2300km,按联合国海洋法公约,属中国管辖的海域约有 $488 \times 10^4 \text{km}^2$ 。中国在所属各海域的油气储藏量大约 $(40 \sim 50) \times 10^8 \text{t}$ 。大陆架是陆地在海中的延续,中国的渤海、黄海和东海的大陆架极其宽阔,经初步普查已发现 300 多个可供勘探的沉积盆地,面积约 $450 \times 10^4 \text{km}^2$,其中海相沉积层面积约 $250 \times 10^4 \text{km}^2$ 。中国近海已发现的大型含油气盆地有 10 个,即渤海盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、东海盆地、台湾西部盆地、南海珠江口盆地、琉东南盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地和台湾浅滩盆地等,在这些盆地已探明各种类型的储油构造约 400 个,初步估算石油储量约 $22 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气储量约 $480 \times 10^8 \text{m}^3$ 。据统计,这些海底石油资源储量约占全国石油储量的 10% ~ 14%,而天然气的海底储量约占全国天然气储量的 25% ~ 34%。

中国从 20 世纪 50 年代末期,才开始由陆地上发展到海上的油气研究、勘探工作,但是进展迅速,到 2002 年底已完成全部海域的油气调查和主要盆地的油气资源评价工作。已采集地震测线 $235 \times 10^4 \text{km}$ (其中,三维 $153 \times 10^4 \text{km}$,二维 $82 \times 10^4 \text{km}$),已完成预探井和评价井 817 口 (其中,预探井 513 口,评价井 304 口),已发现地质成功构造 207 个 (指有油气显示的),已发现油气田 52 个。截止到 2005 年,中国已在海上建成并开发生产的油气田共 29 个,另有停止开发的油气田 3 个,这些开发生产的油气田,年产石油 $1880 \times 10^4 \text{t}$,累积产油 $13133 \times 10^4 \text{t}$,年产天然气 $42 \times 10^8 \text{m}^3$,累积天然气产量为 $245 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

海上从油气的勘探开始,包括勘探、开发、生产,一直到将油、气运送到岸上的各个环节,组成了海洋石油工程。海洋石油工程所处的客观环境有着相当大的差异。它除了与陆地一样承受天气的影响外,还要承受海洋环境的特殊影响,诸如海浪、海流、海冰以及台风、季风等综合作用,条件恶劣。

海洋石油工程在海洋环境的恶劣条件下进行,其工程结构如钻井平台、采油平台、浮动生产平台、生产储油轮、单点系泊装置以及海底管道和管缆等,无论是在施工过程中,还是在服役期间,都要经受来自海洋环境的风、波浪、海流、海冰,甚至于地震、海啸等的载荷的作用。这些海洋环境载荷有时会产生巨大的破坏力,以至影响海洋石油工程的海上正常作业和海上油气田的正常生产。例如,海上飓风的风载荷作用于海洋平台上,严重地影响着平台的安全,1979

年11月25日中国“渤海二号”钻井平台就是因风载荷的作用,在井位迁移的拖航过程中倾覆的;而1983年12月25日,美国阿科公司租用的“爪哇海”号钻井浮船在中国南海作业时,也是因受台风袭击而翻沉的。再如,波浪载荷作用于海上平台,危害性也很大,1980年8月,巨浪摧毁了墨西哥湾的4座钻井平台,1989年11月,美国的“海浪峰”号钻井浮船曾被巨大海浪掀翻,据截止到1989年的统计,全球的海洋钻井平台及船已有50多座被海浪吞没。还有,海冰的冰载荷的破坏力也不容忽视。中国渤海属于冰区,每年冬季约有三个半月的结冰期,冬季最低气温 -22°C ,最大风速达 32m/s ,大约每十年有一次重或常冰情出现,渤海海域冰厚一般为 $20\sim 40\text{cm}$,有时达 $40\sim 60\text{cm}$,甚至高达 80cm 。中国渤海在海洋石油工程结构承受冰载荷的作用方面,曾有过深刻的经验教训。例如,老“二号”采油平台由生活平台、设备平台和生产平台组成。在1969年渤海历史上的大冰封年份,自1969年2月至3月8日先是生活平台被海冰推翻,以后设备平台及生产平台终于在3月8日全被冰推翻,再有1974年渤海的烽火台被冰推倒以及1979年的自升式钻井平台的桩腿之一被冰载作用而折断的严重事故,均说明了冰载对工程结构的严重影响。

综合上述,不难看出,研究海洋石油工程环境及环境载荷的必要性与重要性。因此,本书第一章拟就这个问题,依次分别介绍风及风载荷,潮汐、海流及海流力,海浪、波浪力,海冰及冰载荷以及地震力与其和波浪力的组合等问题。

第一节 概 述

一、海洋石油工程环境

1. 自然环境条件

海洋石油工程在其建设期间可能遭遇到的自然环境条件主要有:风、浪、潮、流、地震及海啸等,此外,还包括有雨雪、雾、霜、温度、地基土壤、海水腐蚀以及海生物附着等。

2. 设计环境条件

1) 工作环境条件

它是指海洋石油工程在建设期间以及建成投产运行期间,所经常出现的自然环境条件。但应指出,工作环境条件的选定应以工程的正常施工作业和正常生产运行为标准。

2) 极端环境条件

它是指海洋石油工程在建成投产后的使用年限内,极少出现的极端恶劣的自然环境条件。但极端环境条件的选定应以保证工程的安全为标准。

3. 重视期

这里的重视期是指极端环境条件再次重新出现的时间的长短。对于海洋石油工程来说,一般以不小于50年为宜。但是,这50年的重视期不包括地震,是指除地震以外的极端环境条件。另外,对于海洋石油工程中的一些小型结构物,例如小型无人驻守井口平台等,其重视期可取为结构物的设计使用期限的 $2\sim 3$ 倍,但不宜小于30年。

二、海洋环境载荷

海洋环境载荷是指海洋自然环境所施加给海洋石油工程的载荷。

1. 海洋石油工程承受的载荷的分类

海洋石油工程所承受的载荷总体上可分为三类：

(1) 环境载荷。

即指主要山风、浪、流、冰和地震等海洋自然环境条件所引起的载荷。

(2) 使用载荷。

它是指海洋石油工程在服役期间所受到的除环境载荷以外的其他载荷，一般包括有：

- ① 固定载荷，如由于自重引起的静载荷；
- ② 活载荷，即可增加或减少的重物的静载荷；
- ③ 动力载荷。

(3) 施工载荷。

这里是指在海洋石油工程施工作业期间所受到的载荷。它常常是特殊的临时性的载荷。

2. 海洋环境载荷的组合

所谓载荷的组合是指来自海洋自然环境条件的各种载荷的叠加，对海洋石油工程来说，一般是按可能出现的最不利的情况进行组合，但组合地震载荷除外，因为它是偶然出现的载荷。

进行载荷组合时，应具体情况具体分析如下：

(1) 不同阶段区别对待。

如海洋石油工程的施工阶段及建成投产后的使用期间，它们可能出现的最不利的海洋自然环境条件是不相同的，因而应按实际情况组合。

(2) 不同对象区别对待。

海洋石油工程的不同设计项目，其载荷组合也有所不同。如整个人工岛的设计和固定采油平台的一根桩腿的局部构件设计，它们考虑的海洋环境载荷的组合，也应有所不同。

第二节 风及风载荷

大气作用于地球表面单位面积上的力，叫做大气压力，简称气压。由于气压在水平方向上分布的不均匀性，而产生的空气从高压区向低压区的运动称为风。气压在水平方向上的分布不均匀一般是由于气温的水平差异导致空气密度变化以及某一地区空气的流入大于流出等原因造成。

一、风的特征

风的特征通常是用风向和风速两个量来表示。

1. 风速

风速是空气在单位时间内所流过的距离，一般以 m/s 或 km/h 作为单位。根据风速的大小常将其划分成 12 级，称为蒲福 (Beaufort) 风级表，后来又补充了几级，即成为通用的风级表，如表 1-1 所示。

表 1-1 通用风级表

| 风级 | 风名 | 海面状况 | 海面波高, m | | 相当风速 | | |
|----|----|------|---------|-------|----------|-----------|-----------|
| | | | 一般 | 最高 | n mile/h | km/h | m/s |
| 0 | 无风 | 平如镜 | — | — | <1 | <1 | 0 |
| 1 | 无风 | 微波 | 0.1 | 0.1 | 1~3 | 1~5 | 0.3~1.5 |
| 2 | 轻风 | 小波 | 0.2 | 0.3 | 4~6 | 6~11 | 1.6~3.3 |
| 3 | 微风 | 小波 | 0.3 | 1.0 | 7~10 | 12~19 | 3.4~5.4 |
| 4 | 和风 | 轻浪 | 1.0 | 1.5 | 11~16 | 20~28 | 5.5~7.9 |
| 5 | 清风 | 中浪 | 2.0 | 2.5 | 17~21 | 29~38 | 8.0~10.7 |
| 6 | 强风 | 大浪 | 3.0 | 4.0 | 22~27 | 39~49 | 10.8~13.8 |
| 7 | 疾风 | 巨浪 | 4.0 | 5.5 | 28~33 | 50~61 | 13.9~17.1 |
| 8 | 大风 | 狂浪 | 5.5 | 7.5 | 34~40 | 62~74 | 17.2~20.7 |
| 9 | 烈风 | | 7.0 | 10.0 | 41~47 | 75~88 | 20.8~24.4 |
| 10 | 狂风 | 狂涛 | 9.0 | 12.5 | 48~55 | 89~102 | 24.5~28.4 |
| 11 | 暴风 | 非凡现象 | 11.0 | 16.0 | 56~63 | 103~117 | 28.5~32.6 |
| 12 | 飓风 | | 14.0 | >16.0 | 64~71 | 118~133 | 32.7~36.9 |
| 13 | | | 72~80 | | 134~149 | 37.0~41.4 | |
| 14 | | | 81~89 | | 150~166 | 41.5~46.1 | |
| 15 | | | 90~99 | | 167~183 | 46.2~50.9 | |
| 16 | | | 100~108 | | 184~201 | 51.0~56.0 | |
| 17 | | | 109~118 | | 202~220 | 56.1~61.2 | |

注: 1 n mile = 1852m。

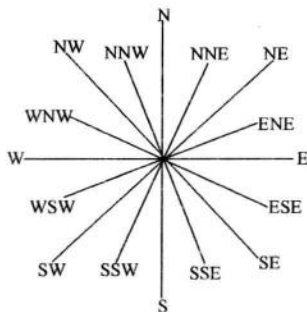


图 1-1 风向的方位图

2. 风向

风向是指风的来向。在气象上用 16 个方位来表示,即: N (北)、NNE (东北偏北)、NE (东北)、ENE (东北偏东)、E (东)、ESE (东南偏东)、SE (东南)、SSE (东南偏南)、S (南)、SSW (西南偏南)、SW (西南)、WSW (西南偏西)、W (西)、WNW (西北偏西)、NW (西北)、NNW (西北偏北),如图 1-1 所示。

3. 风玫瑰图

用图表示出风向、风速(风的强度)以及在某个地区这种风出现的频次的百分比,叫做风玫瑰图,如图 1-2 所示。

(1) 风向。在风玫瑰图的图上画出 16 条等分的直径,每条直径代表风向的 16 个方位之一,如图 1-2 所示,但图 1-2 中只给出了 8 个方位。

(2) 风的强度。沿风玫瑰图上的圆的 16 条直径上的矩形宽度代表风的强度,风的强度可以用风速的大小来表示,也可以用蒲氏风力等级来表示。矩形宽度表达风的强度的比例尺,如图 1-2 的下面所给出的比例尺,代表不同的蒲氏风级,自零至 17 级。矩形长度代表风速,用数字给出海面上 10m 高处的风速(m/s),标注在图中矩形右侧。

(3) 风出现的频次的百分比。风玫瑰图上的等间隔的同心圆即可代表风出现的频次的百

分比,自圆心开始,每个间隔为5%,如图1-2中用数字5、10、15、20给出了4个同心圆上的风出现频率的百分比,而在靠圆心的第一个同心圆内侧所注出的数字,则分别为相应8条直径上的8个方位上风出现频率的百分比。

二、设计风速

按照规定的设计规范标准,而得到的观测的风速值,即称为设计风速。

1. 标准规定的观测处的高度

通常设计风速的观测处的高度均规定为海平面以上10m高度。因此,若观测处为距海平面任意高度 Z 时,则应将观测所得平均风速 \bar{u}_z ,换算成距海平面10m处的平均风速 \bar{u}_{10} 。换算时,一般可应用下列两个公式之一。

(1)对数换算公式:

$$\bar{u}_z = \bar{u}_{10} \left[1 + \frac{(C_{10})^{\frac{1}{2}}}{K} \ln \frac{Z}{10} \right] \quad (1-1)$$

(2)指数换算公式:

$$\bar{u}_z = \bar{u}_c \left[\frac{Z}{Z_c} \right]^\alpha \quad (1-2)$$

式中 K ——参数,一般取 $K=0.4$;

C_{10} ——系数,通常取 $C_{10} = (0.80 + 0.114\bar{u}_{10}) \times 10^{-3}$;

α ——指数,对于开阔海面可取 $\alpha=0.16$;

Z_c ——所观测到的平均风速接近为一个常数时,观测处距海平面的高度,一般可取 $Z_c=300\text{m}$ 。

2. 标准规定的观测的时距(时间间隔)

1) 时距

所谓时距即指观测一次的时间的长短,在规范中对于海洋石油工程有下列两种标准:

(1)时距1min,主要在设计海洋石油工程的局部构件时采用,观测的平均风速以 \bar{u}_1 表示。

(2)时距10min,主要在设计海洋石油工程的总体时应用,其所观测出的平均风速以 \bar{u}_{10} 所示。

2) 平均风速

由于观测风速是在一定的时距内进行的,而在此时距内,风速的大小是变化的,故观测所得无论是 \bar{u}_1 还是 \bar{u}_{10} 都是平均值,设此平均值统称为 \bar{u} ,则:

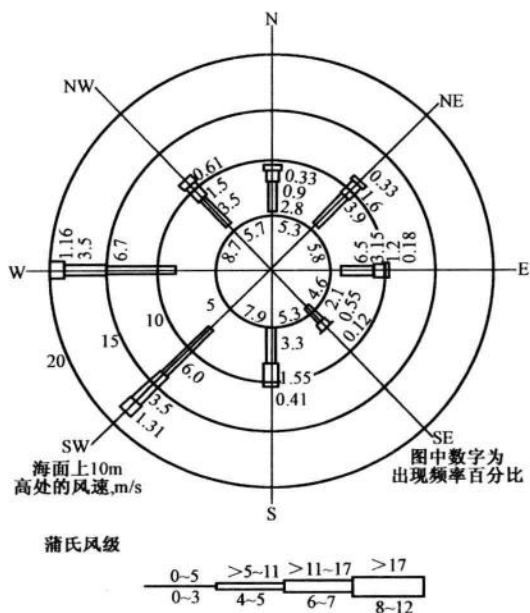


图 1-2 风玫瑰图

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} u dt \quad (1-3)$$

式中 T ——时距；

t_0 ——时距之半；

u ——某一瞬时 dt 时的风速。

3. 标准规定的观测次数

中国对风速的观测次数有以下两种情况：

(1) 定时观测。

一般可分为每日 3 次、4 次以及 24 次不等。

(2) 自动观测。

即自动记录观测值，这种情况是昼夜连续进行。

4. 标准规定的最大平均风速

按照规定的观测时距及观测次数，取不同次数的风速平均值的最大者，则为最大平均风速。显然，若规定的观测次数越多，则定时观测所得的最大平均风速值越接近自动记录观测所得的最大风速值。

5. 标准规定的最大持续风速

对于海洋石油工程中的海洋石油平台结构，按照中国船级社的技术规范，规定设计风速采用一定时距的最大持续风速，即某一风速持续的时间达到时距的规定者，且在长期自动记录观测中为最大值，则取为最大持续风速。通常若缺乏长期自动记录风速观测数据时，则需将较长时间的每日定时观测 4 次的 2min 的最大持续风速值，换算成为年自动记录观测的 10min 最大持续风速值，再经数理统计而求得设计风速。

6. 标准规定的陆上海上设计风速的换算

当缺乏海上长期风速观测数据时，可用邻近陆上的长期风速观测数据，乘以风速增大系数，来代替海上风速值，这个增大系数即海上风速与陆上风速的比值，如表 1-2 所示。

表 1-2 海陆风速关系

| 海面距海岸距离, km | 海上风速与沿海陆上风速比 |
|-------------|---------------|
| 2 以内 | < 1. 10 |
| 2 ~ 30 | 1. 10 ~ 1. 14 |
| 30 ~ 50 | 1. 14 ~ 1. 22 |
| 50 ~ 100 | 1. 22 ~ 1. 30 |
| 100 以外 | 根据实测或调查资料确定 |

三、风压

对于某一风速(平均风速)，垂直于该风向平面上所受到的压强(N/m^2)，即为相应于该风速的风压。风压是海洋石油工程设计中的基本依据之一。设计中必须考虑包括风压在内的水平推移力以及对固定端产生的倾覆力矩。