

# 深海油气工程

*SHENHAI YOUQI GONGCHENG*

余建星 编著



# 深海油气工程

余建星 编著



## 内容概要

本书着重介绍了海洋油气开发工程的相关知识,较系统地阐述了海洋结构物响应的理论、方法。重点论述了深海浮式平台的动力响应、张力腿平台的动力响应以及风暴自存状态下 Spar 平台的计算。另外,对半潜式平台和 FPSO(浮式生产储油装置)也有相应的介绍。这些内容,结合国外最新型海洋平台的具体情况,围绕深海石油工程这一主题,提供了比较系统的知识。

本书注重将深海石油工程的工程实际与理论相结合,力求深入浅出、通俗易懂,可作为海洋与船舶工程专业学生的教材,也可为相关工程技术人员提供参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

深海油气工程/余建星编著. —天津:天津大学出版社,  
2010. 11

ISBN 978 - 7 - 5618 - 3219 - 6

I. ①深… II. ①余… III. ①海上油气田-石油工程  
IV. ①TE5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 202120 号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742

网 址 www.tjup.com

印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm×260mm

印 张 12.25

字 数 306 千

版 次 2010 年 11 月第 1 版

印 次 2010 年 11 月第 1 次

定 价 22.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 前 言

21 世纪是海洋能源开发的新世纪。深海油气作为未来工业的源泉,决定了国民经济的发展命脉。尤其是近年来,随着全球经济发展日益加快,国际能源供需矛盾不断突出,深海油气勘探与开采已经成为了全球新能源开发的热点,海洋工程装备也成为支撑海洋开发和国防建设的战略性新兴产业。

与陆上石油工程和近海石油工程相比,深水海洋工程是一项具有高风险、高成本、高难度特点的综合性系统工程。深海油气工程的装备和技术是否先进,直接决定海洋油气资源开发水平的高低。我国拥有储量丰富的深海油气资源区,但是由于深海油气工程的先进设备和关键技术还未成熟,目前深海油气开发尚处于初级阶段。因此,深入系统地研究深海油气工程的装备和技术,加快深海油气勘探开采步伐,对于保证我国经济可持续发展具有重要意义,而且势在必行,刻不容缓。深海油气工程已经成为一门具有前瞻性和迫切性的重要学科。

本书在反映天津大学近年来完成的国家自然科学基金项目、国家 863 项目和国家重大专项取得的成果的基础上,汇集了国内外有关专著和论文的成果,较系统地论述了深海油气工程的基本理论和基本方法。

为了适应深海石油工程技术研究发展的需要,同时也满足船舶与海洋工程专业学生以及相关工程技术人员的学习需求,本书在论述海洋油气开发工程的相关知识以及海洋结构物响应的理论、方法的基础上,重点阐述了深海浮式平台的运动响应,并且深入地介绍了张力腿平台、Spar 平台、半潜式平台和 FPSO(浮式生产储油装置)。全书围绕深海油气工程这一主题,通过具体实例计算,深入浅出地将理论与工程实际相结合,便于读者学习参考。

深海油气工程是一门复杂且涉及诸多领域的学科,鉴于篇幅有限,本书不可能涵盖各个方面。未涉及的其他相关问题,请参阅国内外已出版的专著。如果本书能对我国深海油气工程领域的发展有所促进或是对相关专业人员的学习有所帮助的话,我将感到无限欣慰。由于水平有限、时间仓促,书中难免有缺点错误,热诚希望广大读者批评指正。

本书可作为船舶与海洋工程专业研究生和高年级本科生的教材,也可作为从事海洋工程、船舶工程设计研究人员的参考书。

全书由余建星执笔,李华、郭钰、吴洪娟和王尔芳等同学参加了编写和校对工作。

天津大学董艳秋教授作为本书的主审,对本书的初稿提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

余建星

2010 年 8 月于天津大学

# 目 录

第 1 章 概述	( 1 )
第 2 章 海洋环境	( 2 )
2.1 海洋环境概述	( 2 )
2.2 深海环境特性	( 12 )
参考文献	( 23 )
第 3 章 环境载荷与平台响应	( 24 )
3.1 概述	( 24 )
3.2 波浪载荷理论	( 28 )
3.3 浮式平台的环境载荷响应	( 46 )
第 4 章 深海浮式平台运动响应	( 53 )
4.1 浮式平台在波流联合作用下的动力响应	( 53 )
4.2 系泊系统动力耦合分析方法	( 59 )
4.3 深海立管与涡激振动	( 64 )
4.4 深海(水动力)模型实验	( 75 )
参考文献	( 85 )
第 5 章 张力腿平台	( 86 )
5.1 张力腿平台(TLP)简介	( 86 )
5.2 张力腿平台的发展	( 87 )
5.3 张力腿平台主要结构形式和特点	( 87 )
5.4 张力腿平台的建造与安装	( 88 )
5.5 张力腿平台的设计、分析	( 89 )
5.6 张力腿涡激振动	( 93 )
5.7 张力腿平台运动响应	( 97 )
5.8 算例	( 98 )
参考文献	( 103 )
第 6 章 Spar 平台	( 104 )
6.1 Spar 平台的总体结构	( 104 )
6.2 Spar 平台的不同形式及其特点	( 105 )
6.3 桁架式 Spar 平台气隙响应研究	( 108 )
6.4 桁架式 Spar 平台结构强度与疲劳分析	( 112 )
6.5 桁架式 Spar 平台的运动分析	( 116 )
参考文献	( 124 )
第 7 章 半潜式平台	( 126 )
7.1 半潜式平台的发展	( 126 )
7.2 半潜式平台的工作原理和结构特点	( 127 )

## 目 录

---

7.3	深水半潜式钻井平台锚泊技术 .....	(128)
7.4	半潜式平台的设计、分析 .....	(132)
7.5	半潜式海洋平台整体结构的三维可靠性分析 .....	(134)
7.6	半潜式平台结构的疲劳失效概率计算研究 .....	(138)
7.7	深水半潜式钻井平台波浪载荷预报与结构强度评估 .....	(140)
	参考文献 .....	(143)
<b>第 8 章</b>	<b>浮式生产储油装置</b> .....	<b>(144)</b>
8.1	概述 .....	(144)
8.2	FPSO 设计关键技术 .....	(152)
8.3	FPSO 资产管理简介 .....	(161)
	参考文献 .....	(178)
<b>第 9 章</b>	<b>深海平台风险评估方法</b> .....	<b>(179)</b>
9.1	概述 .....	(179)
9.2	风险评估理论 .....	(180)
9.3	设备风险评估与控制 .....	(183)
9.4	深海平台结构风险评估 .....	(186)
9.5	深海平台火灾、爆炸风险评估 .....	(187)
	参考文献 .....	(189)

# 第 1 章 概 述

石油是国家重要的战略资源,石油工业是国民经济的基础工业。因此,石油开发产业强大与否,事关各国经济的发展与国家的安全。也正因此缘由,世界各国之间的石油战争从未间断,而且大有日益升温之势。更重要的是,随着人口急剧膨胀,石油开采量快速增长,导致陆地石油资源日益枯竭,环境不断恶化。面对这种状况,越来越多的人把目光投向海洋。

21 世纪是海洋资源开发的新世纪,世界各国把开发海洋、发展海洋经济和海洋产业作为国家发展的战略目标。2006—2010 年全球浅海钻井投资额可达 1 950 亿美元,深海钻井投资可达 650 亿美元。估计 2006 年全球海上油气开发总支出为 2 000 亿美元左右。由于吸引的资金陆续到位,预计在 2010 年全球海上油气开发总支出将达到 2 500 亿美元左右。发达国家已拉开了加速海洋开发和竞争的帷幕,海洋成为国际竞争的重要领域。

我国是一个拥有十几亿人口的大国,随着人口的增多与经济的发展,石油的需求量正在急剧膨胀,我国要奠定大国地位,发展民族经济,就不得不卷入这场石油之战,所以开采海洋能源已迫在眉睫。我国既是一个大陆国家,也是一个海洋国家,大陆海岸线长达 18 000 多千米,管辖的海域达 300 万  $\text{km}^2$ ,有着丰富的海洋资源,这就为我国海洋石油的开发奠定了良好的天然基础。海底盆地是海洋油气的天生摇篮(根据法律解释,海洋石油包括原油、天然气两部分),中国海域有 50 多个海底盆地,其中 20 多个已经通过勘探证实和技术远景评价,被认为属含油气构造。另外,还有 16 个在中国主权管辖海域而非争议地区的盆地被确认为有机质丰度更高、各类储集层发育更好、沉积岩厚度更大的大油气区。根据 2005 年国土资源部、国家发改委联合组织的第三次石油资源评价的初步结果,目前我国海洋石油资源量为 246 亿 t,其价值相当于 3 万多亿美元(约 20 万亿元人民币),可满足中国近百年的能源需求。

随着石油需求的膨胀与我国海洋石油开采技术的发展,我国的石油开采业已由浅海逐渐向深海发展。深水海洋工程是动态的,以海洋石油工业为先导,具有高投资、高风险、高回报特点的综合性和系统工程,它具有高科技含量大、创新性强等特点。与近海工程相比,由于深水作业的不断增多,固定式平台由于自重和工程造价随水深变化而大幅增加,也已不适应深海开发需要。近年来国际上适用于深海资源开发的深海平台主要有张力腿平台(TLP)、Spar 平台、浮式生产储油装置(FPSO)和半潜式平台(Semi-submersible)。

深海石油开发已经成为今后全球石油战略的重要前沿阵地,而中国海域,特别是水深 300 m 以上、井深 2 000 m 以上的海域深水区,是世界上最有前景而又未大规模开采的油气资源区。可以预见,深海油气资源开发作为未来我国海洋石油开发的主战场,对保证我国经济的可持续发展具有重要的战略意义,也为我国的海洋工程科学研究提供了用武之地。海洋油气资源开发向深海发展已成为必然趋势,因此,深海平台技术是一个具有前瞻性和迫切性的重要课题。



## 第2章 海洋环境

全世界海洋总面积约 36 000 万  $\text{km}^2$ , 占地球表面积的 70.8%。海洋的平均深度是 3 800 m, 最深处达 11 524 m。大约 52% 的海洋深度在 2 000~6 000 m 之间。8.4% 的海洋水深不超过 1 000 m, 水深不超过 200 m 的海域占世界海洋总面积的 5.3%, 在那里分布着世界上大部分的近海石油平台。

### 2.1 海洋环境概述

#### 2.1.1 海水物理特性

海水中含有多种已知元素, 主要有氯、钠、硫酸盐、镁和钾等。海水中可溶物的总量称为盐度, 盐度是每千克海水中所含全部固体的克数, 海水的平均盐度为 3.5%。盐度是通过测量海水的电传导性来确定的。

温度是决定海水密度的主要参数, 海水密度是单位体积海水的质量。密度是盐度、温度、压力(深度)的函数。

敞开式海水的密度为 1 021.00~1 070.00  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 盐度为 3.5%。当海水温度为 10℃ 时, 1 个标准大气压<sup>①</sup>下海水密度为 1 026.95  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在气象学和海洋工程中, 恒定值的线称为等值线, 常见的等值线有等温线、等盐度线、等密度线和等深线。勘察结果表达在绘有等温线、等盐度线、等密度线和等深线的横截面图上, 用来反映水域海水的物理特征。

所溶解的氧和营养物(磷酸盐、硝酸盐、硅酸盐、等离子)都是重要的海水特征。然而这些成分不是固定不变的, 随着海水从一个地方流动到另一个地方, 生物过程会改变这些成分浓度。相反, 在海平面下的盐度、温度、密度则是固定不变的, 因此海水密度可用这些特征参数来描述。

声速是海水的另一个特征, 它是盐度、温度和深度的函数。因为在海洋中可见度受到限制, 电磁波又以极快的速度被吸收, 因而声波就被广泛用来“看”海洋表面以下、海底和其他海洋特征。水声测深仪、侧扫描声纳、搜索声纳、地震测量仪等都是依据声音在海洋中的传播速度而设计制作的。在盐度为 3.485%、温度为 0℃ 的海水中, 声的传播速度为 1 445 m/s, 比在空气中传播更快。

在海水中, 可见光被吸收得相当快, 它是海水升温的主要热源。在最干净的海水里, 10 m 深处只剩下 22% 的光, 而在 100 m 深处只剩下 0.5% 的光。在混浊的沿海水中, 在 2 m 深处只剩下 8% 的光线, 而在 10 m 深处就没有任何光线了。在干净的海水中, 蓝光和绿光穿透最深, 红光和黄光被吸收得最快; 在沿海的混浊水中, 绿光和黄光穿透最深。

<sup>①</sup> 1atm(标准大气压)=101.325 Pa



### 2.1.2 环境载荷概述

在深海浮式平台的设计和分析中,需要将建造、运输、安装和生产每个阶段的设计工况与设计环境相结合,并要给出相应的允许应力和安全系数。各国设计规范中,对环境载荷均提出了明确要求。

作用于海洋结构物的环境载荷主要是风、波浪、流、海冰、地震等会引起平台运动和系泊系统的载荷。

①风——在深水平台设计中风是不可忽略的,通常使用稳定风和代表风振荡的风谱来表示。其主要参数为平均风速、平均风向、风谱密度函数。

②波浪——风成浪是海洋平台环境力的主要来源。这样的波浪在形状上是不规则的,波高和波长是随时间变化的,有可能从一个方向或几个方向同时接近平台。由于海表面的任意特性,通常根据几个波浪统计参量描述海况,如有效波高、谱峰周期、谱形状和方向性。其他有效参数可由这些参数推导出。

③流——包括风成流、洋环流。在深水中,流可能对系统产生很大的载荷。

④地震——对于有地震活动的区域,应该考虑地震加速度。对立管平台设计,垂直加速度和水平加速度是重要的。当关注立管平台区域的地震活动时,应该获得适宜的地面的加速度—时间历程。由于立管平台预张力的响应,垂向地面运动比水平地面运动更加重要。

⑤潮汐和水位——潮汐包括天文潮、风暴潮和压差潮;每个设计工况中必须考虑设计高水位和设计低水位。潮位的范围影响需求的腱预张力。

⑥其他环境载荷——包括冰、海生物、波浪冲击力、事故载荷、火灾和爆炸载荷等。此外,对于深海环境所特有的畸形波、深海环流也应在资料可获得的情况下加以考虑。

### 2.1.3 海浪、海流和风

#### 1. 海浪

海浪是海洋结构物遭受的主要载荷之一。波浪力随着波高的增加而增大。当波振动周期与结构物自振周期接近时,可造成结构物的严重破坏。波浪力一般按照频率带有以下四种分类方法(见图2-1),以评估对系统的影响。

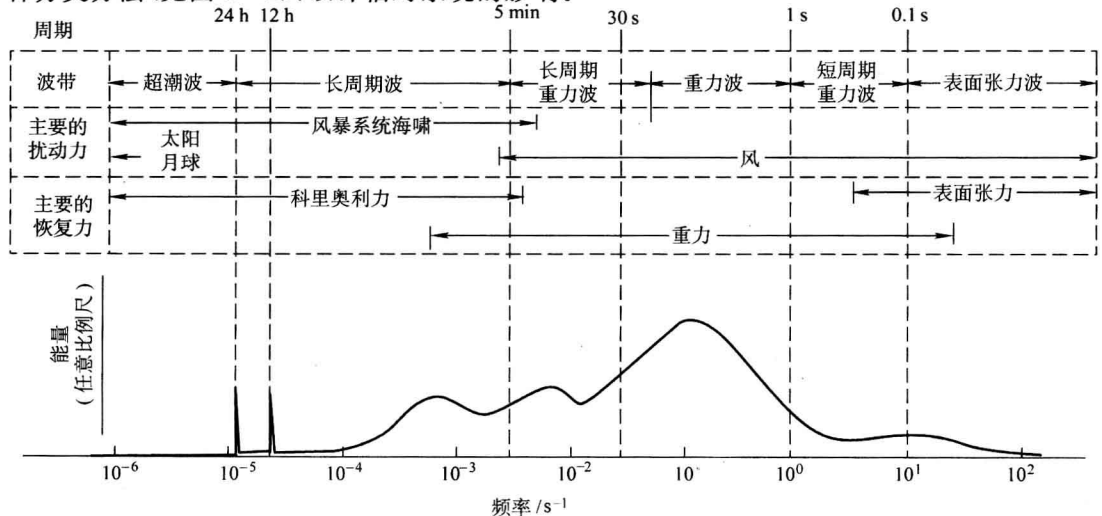


图2-1 海洋波动的分类

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。通常所说的海浪一般是指风浪。风浪是海面上分布最广、对海洋平台生产作业影响最大的波浪。这里介绍的波浪是指由风引起的重力波,包括风浪和涌浪。

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系在一起。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,所以通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。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、海水的深度等因素有关。波浪的特征主要是波长、波高以及传播速度和方向。常见的风浪主要有长峰波、混合波、短峰波、浅水波和破碎波。

海浪的威力十分巨大,是影响海洋结构物最重要的环境因素。为保证海洋平台上作业的安全性,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,则可以估计出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,在具体使用时应特别注意。国家海洋预报台在对海况进行描述时(一般用于沿海),对有必要发出警告的具有危险性的海况,从低到高分为海浪较大、浪高涌大、海况恶劣、海浪巨大。这是习惯性用语,没有严格界限。表 2-1 列出了国际标准海况等级。

表 2-1 国际标准海况表

海况等级	海面状况名称	浪高范围/m	海面征状
0	平静—镜面	0	海面光滑如镜或仅有涌浪存在
1	平静—微波	0~0.1	波纹或涌浪和波纹同时存在
2	平缓的微波	0.1~0.5	波浪很小波峰开始破裂,浪花不显白色而呈玻璃色
3	小波	0.5~1.25	波浪不大,但很触目,波峰破裂,其中有些地方形成白色浪花——白浪
4	中等波浪	1.25~2.5	波浪具有明显的形状,到处形成白浪
5	强浪	2.5~4	出现高大的波峰,浪花占了波峰上很大面积,风开始削去波峰上的浪花
6	超强浪	4~6	波峰上被风削去的浪花,开始沿着波浪斜面伸长成带状,有时波峰出现风暴波的长波形状
7	巨浪	6~9	风削去的浪花带布满了波浪斜面,并有些地方到达波谷,波峰上布满了浪花层
8	超强巨浪	9~14	稠密的浪花布满了波浪斜面,海面变成白色,只有波谷内某些地方没有浪花
9	异常波浪	>14	整个海面布满了稠密的浪花层,空气中充满了水滴和飞沫,能见度显著降低

## 2. 风

## 1) 概述

作为一种重要的环境因素,风对海洋结构物既有直接作用,也有间接影响。风力可以直接作用在海洋建筑物上,例如海洋石油平台的上部构件,或作用在船舶上,然后传给岸壁结构。海面风场对海水的运动有巨大的影响,特别与表层海流的变化、海浪的发展和传播以及风暴水位涨落的程度等有着密切关系。一次强大的风暴和它引起的巨浪,往往是造成海洋结构物破坏的主要原因。风力的计算,已成为海洋结构物设计中不可缺少的部分。为了利用良好的天气进行施工、作业,同时也便于钻井船、预制沉箱的拖航等,必须了解工作海区的大风规律及特点,并通过分析强风向和常风向、统计大风口数、绘制风玫瑰图等方法,进一步掌握风对建筑物的影响。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2-2)。

表2-2 蒲氏风级表

描述风力术语	蒲氏风级	平均风速/(km/h)	地面状态	海面状态
无风	0	<2	烟直向上升	海面平静如镜
轻微	1	2~6	烟能表示风向,但风向标则不动	波纹柔和,状似鱼鳞,浪头不起白沫
	2	7~12	人面感觉有风,树叶微响,风向标会转动	小形微波,相隔很短但已较显著,波峰似玻璃而不破碎
和缓	3	13~19	树叶及微枝摇动不息,旌旗展开	微波较大,波峰开始破碎,白沫状似玻璃,中间有白头浪
	4	20~30	能吹起地面灰尘和纸张,树的小枝摇动	小浪,形状开始拖长,白头浪较为频密
轻劲	5	31~40	有叶的小树摇摆,内陆的水面有微波	中浪,形状显著拖长,白头浪更多,间有浪花飞溅
强风	6	41~51	大树枝摇动,电线呼呼有声,举伞困难	大浪开始出现,周围都是较大的白头浪,浪花较多
	7	52~62	全树摇动,迎风步行感觉不便	海浪堆栈,碎浪生成之白沫随风吹成条纹
烈风	8	63~75	微枝折毁,人行向前感觉阻力甚大	将达高浪阶段,波峰开始破碎,成为浪花,条纹更觉显著
	9	76~87	建筑物有小损坏	高浪,白沫随风吹成浓厚条纹状,波涛汹涌,浪花飞溅,影响能见度
暴风	10	88~103	陆上少见,可使树木拔起或使建筑物损坏严重	非常高浪,出现拖长的倒悬浪峰;大片泡沫随风吹成浓厚白色条纹,海面白茫茫一片,波涛互相冲击,能见度受到影响
	11	104~117	内陆很少见,会引起广泛损坏	波涛澎湃,浪高足以遮掩中型船只;长片白沫随风摆布,遍罩海面,能见度受到影响
颶风	12	≥118	内陆很少见,会引起广泛损坏	海面空气中充满浪花白沫,巨浪如江河倒泻,遍海皆白,能见度大受影响

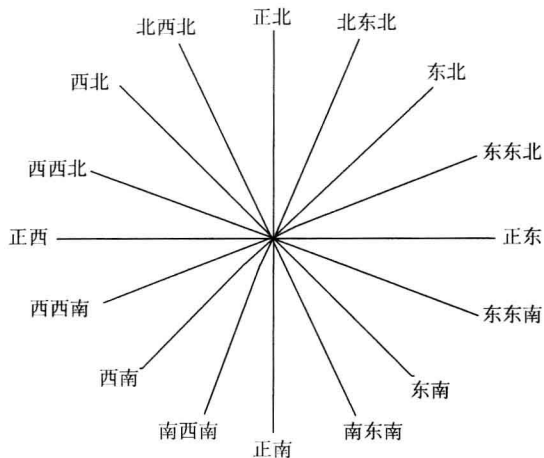


图 2-2 风向图

海洋平台所在的作业海区,如有统计资料绘制的风玫瑰图(如图 2-3),则可求得一年中出现大风天数的平均值,以供施工作业人员参考。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。

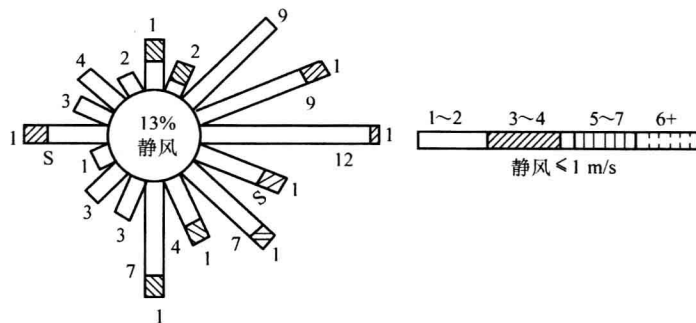


图 2-3 风玫瑰图

风速和风向是随空间和时间不断变化的。对于大型海洋结构物,在 1 h 持续时间量级上的风的统计性质(如风速的平均值和标准偏差)在水平面内并无变化,但在高度方向上有变化(剖面系数)。在长持续时间内,存在具有高平均风速的较短持续时间(阵风系数)。因此,只有限定风的高程和持续时间,风速值才有意义。参考值  $v_H$  是在高程  $H$  为 10 m (33 ft<sup>①</sup>)处的 1 h 的平均风速。

### 3) 风对平台运动响应的影响

在最新的风浪数值模型中,包括一阶和二阶波浪载荷,同时考虑风载荷的作用。研究表明,风对平台纵荡响应的影响强烈依赖于入射波的大小。当波浪控制区(overwater fetcosh)不大时,也就是说波浪较小且风力很大时,风将决定整个纵荡响应,但是,对于大的波浪,情况恰恰相反。这是因为在高海况时,水动力阻尼很大,将减小平台对风的动力响应。因此,在设计海况下,由于一阶波浪响应非常大,风所导致动力响应的重要性可以忽略。有研究表明,风的影响强烈依赖于风速和海况的组合。对于理想的风速和海况组合,与仅考虑波浪影响相比,平台纵荡响应将增大 30% 至 100%。

①: 1 ft = 0.304 8 m。

## 2) 风的性质

风的主要特征为风向和风速。风向是指风吹来的方向,通常用 16 个方位来表示(见图 2-2)。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。我国采用的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、飆风等各种名称。狂风和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,风是影响海洋平台安全及正常作业的重要环境因素之一。

风对平台的影响中还包括了显著的升沉响应。低频和波频的纵荡响应都将增大升沉响应。此外,由于平均风导致的平台平均偏移,将使升沉显著增大。当对平台进行甲板下波浪冲击可靠性分析时,应考虑风对升沉增大的影响,因为这将导致严重的筋腱张力的产生。

对于立管平台,筋腱张力的动力特性本质上不受风的影响,然而,筋腱张力的平均变化却受风控制。筋腱弯曲应力强烈依赖于平台的纵荡运动,因此风将对筋腱弯曲应力产生显著的影响。

#### 4) 风况的选择

设计中的风况应是按照收集到的风资料,利用合适的方法得出的。它应该和假定的其他环境参数同时发生的联合概率保持一致。张力腿平台在横荡、纵荡、艏摇的状态下固有周期较长,很容易被风谱下的能量所激励。全部风谱的效应,包括持续风和波动风,需要加以考虑,以确定风对平台载荷和响应的激励作用。

#### 5) 风载荷计算参数

目前,还没有建立可靠的风速随持续时间及高程的变化的谱形状,因此,尚不能建立确定的关系。下面的关系式给出了设计中使用的风参数的合理数值。

##### (1) 平均垂向分布

在高程  $z$  处 1 h 的平均风速的平均垂向分布可以由下式近似确定:

$$v_z = v_H (z/H)^{0.125} \quad (2-1)$$

##### (2) 阵风系数

阵风系数  $G(t, z)$  可规定为:

$$G(t, z) \equiv v(t, z)/v_z = 1 + g(t)I(z) \quad (2-2)$$

式中:  $I(z)$  为紊流强度;  $t$  为阵风作用时间;  $g(t)$  为系数。

系数  $g(t)$  可由下式算出:

$$g(t) = 3.0 + \ln[(3/t)^{0.6}] \quad (t \leq 60 \text{ s}) \quad (2-3)$$

##### (3) 紊流强度

紊流强度是对 1 h 以上平均风速正则化的风速的标准差,可由下式近似得到:

$$I(z) \equiv \sigma(z)/v_z = \begin{cases} 0.15(z/z_s)^{-0.125} & (z \leq z_s) \\ 0.15(z/z_s)^{-0.275} & (z > z_s) \end{cases} \quad (2-4)$$

式中:  $z_s$  是表面层厚度,  $z_s = 20 \text{ m}$ 。

##### (4) 风谱

与波浪一样,风速波动频率分布也可用一个谱来表示,由于观测得到的风谱具有极大的可变性,所以还没有普遍接受的谱形。在缺乏指定数据的情况下,建议使用下式所确定的谱形:

$$\frac{S_{uu}(f)}{\sigma(z)^2} = \frac{f/f_p}{[1 + 1.5f/f_p]^{5/3}} \quad (2-5)$$

式中:  $S_{uu}(f)$  为高程  $z$  处的谱能密度;  $f$  为频率, Hz;  $\sigma(z)$  为风速的标准差,例如,  $\sigma(z) = I(z)v_z$ 。

实测风谱表明,  $f_p$  的值在一个很大范围内变化,下式为平均值:

$$f_p z/v_z = 0.025 \quad (2-6)$$

由于实测谱的  $f_p$  范围很大,所以对平台敏感性分析时,  $f_p$  的取值范围应为:

$$0.01 \leq f_p z/v_z \leq 0.10 \quad (2-7)$$

半潜式平台和张力腿平台的运动响应,特别是平台最大偏移,对这个参数非常敏感。应当注意,由于式(2-5)给出的是衰减的谱, $f_p$ 的位置并不是在风谱能量峰值处。

#### (5)空间相关性

阵风具有与其持续时间相关的三维空间特性。例如,由于与3 s阵风相关的距离短,因此相对于15 s阵风来说,对平台上部结构的影响范围较小。计算单个杆件最大的静风载时,采用3 s阵风;对于水平方向上尺寸不超过50 m的结构的最大总风载的计算,宜采用5 s阵风;计算更大结构上的总静风载荷,宜采用15 s阵风。对最大的波浪力伴随风的情况,总的静风载荷宜采用1 min的持续风速。对动力风载进行频域分析时,可以保守地认为在整个上部结构的所有范围内都与紊流相关。

不同特性的风可以用两部分来描述:一部分是持续风( $v_z$ ),另一部分是阵风( $u$ )。所以整个风速

$$\mathbf{u} = v_z + \mathbf{u}' \quad (2-8)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为瞬时风速和方向; $\mathbf{u}'$ 为持续风的瞬时风速和方向的变化。

#### (6)确定风力的各项因素

①作用于海洋平台的瞬时风力可以通过汇总水面上每个杆件受到的瞬时风力计算出来。这个力应采用适当的方法计算,例如:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A |v_z + \mathbf{u}' - \dot{x}| (v_z + \mathbf{u}' - \dot{x}) \quad (2-9)$$

式中: $F$ 为风力; $\rho_a$ 为空气的质量密度; $C_s$ 为形状系数(可能含有遮蔽系数); $A$ 为物体迎风面积; $\dot{x}$ 为结构杆件所遭受的瞬时风速; $z$ 为杆件中心的标高。

②对风接近结构的任何角度,平面结构的风力应假设垂直作用于表面上,而垂直圆柱形物体的风力应假设是作用在风的方向上。不是在垂直位置上的圆柱形物体的风力,应采用合适的公式计算,以考虑风向相对于物体的方位。对于不与风向垂直的建筑物的侧面和其他平面,也应采用合适的计算式计算,以考虑风向和平面之间的偏斜度。

③作用于结构上总的风力,也可以利用结构整个的迎风面积乘以通过模型实验或其他适宜方法得到的合适的系数来计算。

④使用风谱时,通常是将谱和频域计算进行力的线性化:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A v_z^2 + \rho_a C_s A v_z u' \quad (2-10)$$

式中:第一部分是常数或稳定的力值,其中 $v_z$ 应与生成风谱的平均风速相对应;第二部分在波动速度下是线性的。由于通常高阶项较小,在上述近似的算式中被忽略,它在稳定载荷中占的比例很小。

#### (7)波动风力

波动风力可以通过时域或频域计算得出。在时域计算时,总的风力可以利用式(2-9),将一系列时间中的瞬时风力汇总求得。在频域计算时,通过式(2-10)和风谱得到的风力谱如下:

$$S_{ff}(f) = \chi^2(f) S_{uu}(f) (\rho_a C_s A v_z)^2 \quad (2-11)$$

式中: $S_{ff}$ 为风力谱; $\chi$ 为空气动力导纳函数; $S_{uu}$ 为阵风谱(见式(2-5))。

## (8)形状系数和遮蔽系数

对于垂直作用于投影面上的风力形状系数建议采用表2-3。

表2-3 垂直作用于投影面上的风力形状系数

形状系数	受风物体
1.5	梁
1.5	建筑物的侧面
0.5	圆柱形构件
1.0	平台总投影面积(应该被模型实验所确认)

当第二个物体到第一个物体的距离近到它并不受到全部风的作用时,可以考虑用遮蔽系数。

## (9)空气动力导纳

①当两个位置点距离增加时,这两处测量到的阵风表明没有关联。当结构的侧向尺寸较大时,利用空气动力导纳系数可以对阵风力值进行折减。Simiu 和 Scanlan(1978)对横向阵风关系发表的数据可以用来确定空气动力导纳系数。空气动力导纳系数对风力公式修正如下:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A v_z^2 + \rho_a C_s A v_z u' \quad (2-12)$$

②空气动力导纳系数依赖于频率,对高频的风其数值较小,从0到1.0不等。对低频振动的风,或不能有效建立低值的高频风,取值1.0是保守并适合的。

## 3. 海流

## 1)海流的产生

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地流动。它有一定的流程、宽度、厚度和速度,其特征主要是流向和流速。海流是海洋中主要动力源之一,和风、浪等要素同样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地流动,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、海峡和港湾处,由于地形限制,水流速度的最大值与最小值相差较大。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3.0 m/s,其次为黑潮,表面流速为2.0 m/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,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。



海水在不停地运动,在许多情况下受扰动的影响。水流的一般运动是由风的机械作用和不均匀的热作用所产生的。其他的力,如科氏力(Coriolis,复合向心力)和离心力也影响水流流速,重力则引起潮流。

## 2) 流速和流向

表面流速通常接近 1 kn 或稍小,但也可能超过 5 kn。更高的值就性质上来说就是潮流,大部分情况发生在近海岸。有时在接近水面处发生速度高达 6 kn 的非潮流,由风暴或飚风引起。也有特殊情况,例如发生在墨西哥的湾流和赤道潜流。深海流速在数值上较小(0.02~0.2 kn,即 1~10 cm/s)。垂流通常比水平流数值上小 1~3 个数量级。在一些沿海和河口位置,垂流与水平流的差别小于 1 个数量级,因而不能忽略。许多流速计仅测水平流速,但一些更新的仪器可测量流速的 3 个分量。

流速可被直接或间接测量。直接法测量海流本身,间接法通过测量一些介质的特性来推知流速。直接测量流速的方法通常称为拉格朗日法或欧拉法,即通过测量物体作为时间函数的连续的位置来确定流速的大小和方向。

## 3) 流的主要设计参数

### (1) 设计流速

设计流速应取为在平台作业海区可能出现的最大流速值,包括潮流流速、风暴涌流速和风成流流速,应考虑作业海区流速的垂向分布。在波浪存在时,应对无波浪时的流速垂向分布进行修正,以使瞬时波面处的流速保持不变,建议按图 2-4 进行修改,图中  $h$  为静水水深。

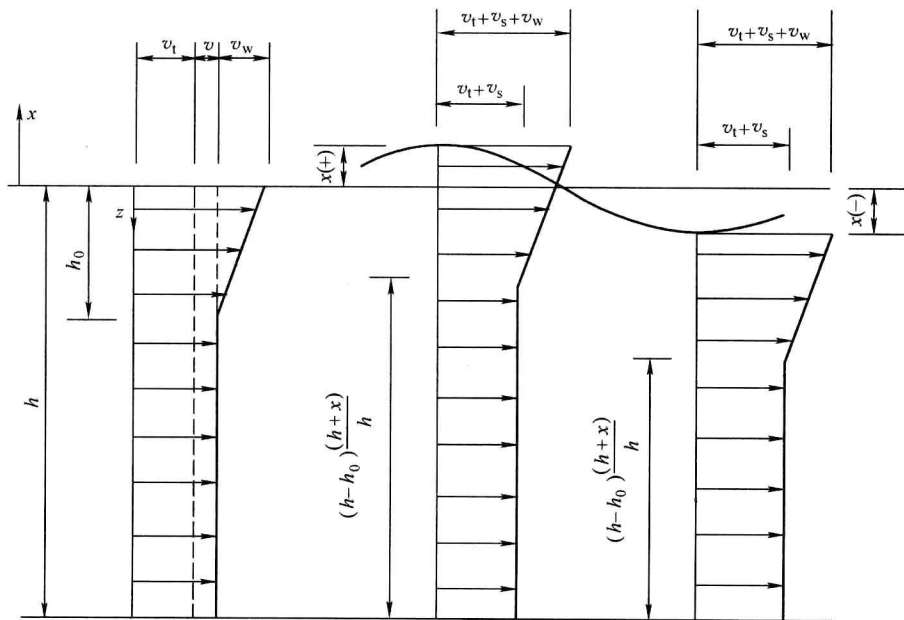


图 2-4 设计流速示意图

当  $z \leq h_0$  时,

$$v = v_t + v_s + v_w [(h_0 - z)/h_0] \text{ (m/s)}$$

当  $z > h_0$  时,

$$v = v_t + v_s \text{ (m/s)}$$

式中:  $v$  为设计海流流速;  $v_t$  为潮流流速;  $v_s$  为风暴涌流速;  $v_w$  为风成流流速;  $h_0$  为风成流

的参考水深;  $z$  为水质点在静水面以下的垂直距离。

### (2) 流的拖曳力

在不考虑波浪导致水流运动前提下,流对非流线形的圆柱形物体的拖曳力和流速的平方成比例。流引起的那部分拖曳力,作用方向是构件轴的法向。拖曳力系数应该建立在适宜的经验数值的基础上。拖曳力可按下式计算:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A v^2 \quad (2-13)$$

式中:  $F_D$  为垂直于构件轴向上的拖曳力(单位长度的);  $\rho_w$  为水密度;  $C_D$  为拖曳力系数;  $A$  为垂直于构件轴向上的投影面积;  $v$  为垂直于构件轴向上的流速。

### (3) 涡激振动

①当流稳定或接近稳定时流经非流线形物体,都将产生旋涡的泄放。泄放时旋涡会导致升力,如在流向法线上的力。通常这种升力的特性在不断变换,随机地分布覆盖在整个物体上。这种形成网状的力,数值很小或不会产生影响。但当该物体具有了振动的能力,并且正在泄放的旋涡达到或接近该物体的某一自然频率时,该物体将可能被激振而使振动幅度加剧。当流以不规则流速流经物体坚固表面的一部分时,与波浪激振相类似。

②涡旋泄放的频率可以按下式计算:

$$f = Sr \frac{v}{d} \quad (2-14)$$

式中:  $f$  为涡旋泄放频率;  $Sr$  为斯特劳哈尔(Strouhal)数;  $d$  为构件直径;  $v$  为垂直于构件轴的局部流速。

斯特劳哈尔数随雷诺数而变化,但对于张力腿平台的腿柱、支撑和立管所对应的雷诺数的范围,斯特劳哈尔数通常取 0.2。

③对涡旋泄放敏感的张力腿平台,由于腿柱的涡旋泄放,其响应会影响到支撑、立管和船体的艏摇。同样,塔和柱状构件易受风涡旋泄放的影响。

④涡激振动是一个水弹性现象,其振幅不服从于常规的力作用下振动分析的预测结果。实际上,其振幅与被称作“折减阻尼”的非尺度参数有关。

#### 4. 设计中风浪参数的几种选取方法

海洋平台长期作业于复杂海况之中,海洋环境条件设计标准的选取成为决定平台安全、结构形式和工程造价的关键因素之一。面对诸多自然因素的作用,我国现有《海洋工程设计规范》采用的标准没能考虑多种环境因素联合出现的概率,往往过高估计环境设计条件,造成投资成本的增高,甚至使得部分边际油田难以开采。

20世纪80年代以来,海洋工程界逐步认可了基于联合概率的设计标准。例如,被国际标准化组织(ISO)认可的标准 API-RP2A-LRFD(1995),在定义极端条件风速、波高和海流载荷时,给出以下三种定义:

①重现期为 100 年的波高及相应的“风速和海流”;

②风速、波高和流速的“任何合理组合”,其结果得到百年一遇的组合平台响应,如基底剪力或倾覆力矩;

③将百年一遇的风速、百年一遇的流速以及百年一遇的波高进行组合。

其中,定义③是推算要素设计标准的传统方法,即单因素设计法,它往往过于保守;定义①中的“相应”一词的意义较模糊;定义②中“任何合理组合”使得不同设计者有不同的理解,