



高等院校石油天然气类规划教材

海洋工程环境

陈建民 朱红钧 纪大伟 © 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

海洋工程环境

陈建民 朱红钧 纪大伟 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对海洋工程环境涉及的专业知识作了系统介绍,重点描述了风、海浪、潮汐、海流、海冰、地震、海啸和风暴潮的运动特征与规律,介绍了风速统计分布计算方法、线性波理论、有限振幅波理论、随机波浪理论、流致涡激振动理论和海岸泥沙运动理论,给出了对海洋工程结构物的发生作用的风载荷、波浪载荷、海流载荷、冰载荷和地震载荷的计算方法。

本书是高等院校船舶与海洋工程专业、海洋油气工程专业及相关专业的教材或参考书,并可供从事船舶工程、海洋工程、航海与港航管理、海洋工程与开发、海洋环境保护与管理的科技人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程环境/陈建民,朱红钧,纪大伟主编.

北京:石油工业出版社,2016.1

(高等院校石油天然气类规划教材)

ISBN 978-7-5183-1029-6

I. 海…

II. ①陈…②朱…③纪…

III. 海洋工程—海洋环境—高等学校—教材

IV. X145

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 301809 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:320 千字

定价:26.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《海洋工程环境》编写人员

主 编：陈建民 中国石油大学(华东)

朱红钧 西南石油大学

纪大伟 东北石油大学

参 编：(按姓氏笔画排序)

包兴先 中国石油大学(华东)

朱忠喜 长江大学

李昌良 中国石油大学(华东)

张 亚 中国石油大学(华东)

张 敬 中国石油大学(华东)

单丹丹 东北石油大学

赵金省 西安石油大学

前 言

21世纪将是海洋科学与技术飞速发展的世纪。为了解决日益突出的人口、资源与环境问题,我国已把开发海洋资源、发展海洋经济作为国家的发展战略目标。无论是海洋油气与矿产资源、海洋生物与海水资源,还是海洋运输与空间的开发利用,皆依赖于海洋工程的发展。

由于海洋工程结构复杂、体积庞大、造价昂贵,在建造与使用过程中一直遭受海浪、潮汐、风暴潮、海流、风的作用,有些地区还会受到海冰、地震、海啸等恶劣条件的影响。深入了解海洋工程环境条件的发生和发展规律,为海洋工程提供规划、设计、施工、营运等方面的客观数据,是保证结构安全、降低成本、高效营运的重要前提。

为了适应我国海洋工程工业发展的需要和高等教育改革的要求,我国许多石油高校相继增设了面向石油行业的船舶与海洋工程和海洋油气工程本科专业。为了满足这两个专业的海洋工程环境课程教学需要,2012年4月全国海洋油气工程专业教学与教材规划研讨会将《海洋工程环境》列为行业规划教材,2013年11月2日石油工业出版社召开了《海洋工程环境》教材的编写大纲研讨会,确定了本教材的编写内容和编写分工。

本书是以中国石油大学(华东)陈建民、张亚主编的《海洋工程环境》校内教材和西南石油大学朱红钧主编的《海洋环境与荷载》校内教材为基础,结合各位参加编写教师多年的教学经验编写而成。全书本着理论与实际相结合、少而精和覆盖面广的原则,尽量考虑船舶与海洋工程和海洋油气工程领域对海洋环境理论与知识的需要,围绕海洋工程所处环境条件,系统地论述了它们的主要特性,使读者对海洋工程环境问题有一个比较全面的了解,有助于读者从事海洋工程的研究、规划、设计和建造工作,力求为我国海洋石油工程事业的发展尽一份绵薄之力。

本书由中国石油大学(华东)、西南石油大学、东北石油大学、长江大学和西安石油大学联合编写。第一章由陈建民编写,第二章由朱红钧、张敬编写,第三章由纪大伟编写,第四章由纪大伟、李昌良编写,第五章由包兴先编写,第六章和第七

试读结束: 需要全本请在线购买: www.ertongbook.com — 1 —

章由朱红钧编写,第八章由单丹丹、纪大伟编写,第九章由朱忠喜编写,第十章由张亚编写,第十一章由赵金省编写。全书由陈建民统稿、定稿。

在本书出版过程中,姚金江、栾道坤、贺正兴、高革梅、孔祥英、王少磊、吴建完成了部分初稿的文字录入工作,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2015年9月

... 2015年9月 ... 编者 ... 2015年9月 ...

目 录

第一章 绪论	1
第一节 海洋工程与海洋环境概述	1
第二节 海洋工程环境研究的内容、意义和方法	2
习题	4
第二章 风及风载荷	5
第一节 风的描述	5
第二节 风的受力	8
第三节 风的类型	12
第四节 风速的分布	15
第五节 风载荷	21
习题	26
第三章 波浪理论	28
第一节 波浪的要素和分类	28
第二节 波浪运动的基本方程	31
第三节 线性波理论	35
第四节 有限振幅波	47
第五节 近岸波浪传播的变形	55
习题	60
第四章 随机波浪理论	62
第一节 随机波浪概述	62
第二节 随机波浪的统计特征	63
第三节 设计波	71
第四节 海浪谱	73
习题	77
第五章 波浪载荷	78
第一节 波浪概述	78
第二节 小尺度结构物上的波浪力	79
第三节 大尺度结构物上的波浪力	90
习题	98

第六章 潮汐	99
第一节 潮汐概述	99
第二节 潮汐理论	102
第三节 潮位特征值	109
习题	113
第七章 海流及海流载荷	115
第一节 海流概述	115
第二节 海流观测和资料分析	116
第三节 海流运动方程	120
第四节 作用在结构物上的海流载荷	126
第五节 流致涡激振动	127
习题	133
第八章 海冰与冰载荷	134
第一节 海冰概述	134
第二节 海冰的观测	142
第三节 海冰载荷的计算	143
习题	148
第九章 地震、海啸与风暴潮	149
第一节 地震	149
第二节 海啸	155
第三节 风暴潮	161
习题	165
第十章 泥沙运动	166
第一节 泥沙来源与泥沙特征	166
第二节 海岸泥沙运动	172
第三节 海洋工程泥沙问题研究方法	182
习题	184
第十一章 海洋环境保护	186
第一节 海洋环境问题	186
第二节 海洋环境保护法规	190
习题	194
参考文献	195

第一章 绪 论

地球表面海洋面积占 71%，而陆地面积只占 29%。随着人类文明的快速发展，陆地资源面临枯竭。相比之下，人类对海洋资源的开发利用还相当有限。面对人口、资源与环境三大问题，人类把解决问题的希望寄托于海洋。

第一节 海洋工程与海洋环境概述

一、海洋工程概述

海洋工程是指以开发、利用、保护、恢复海洋资源为目的，并且工程主体位于海岸线向海一侧的新建、改建、扩建工程。海洋工程可分为海岸工程、近海工程和深海工程 3 类。

1. 海岸工程

海洋工程始于为海岸带开发服务的海岸工程。地中海沿岸国家在公元前 1000 年已开始航海和筑港；中国早在公元前 306—前 200 年就在沿海一带建设港口，东汉（公元 25—220 年）时开始在东南沿海兴建海岸防护工程；荷兰在中世纪初期也开始建造海堤，并进而围垦海涂，与海争地。长期以来，随着航海事业的发展和生产建设需要的增长，海岸工程得到了很大发展。但“海岸工程”这个术语到 20 世纪 50 年代才首次出现，随着海洋工程水文学、海岸动力学和海岸动力地貌学以及其他有关学科的形成和发展，海岸工程学也逐步形成一门系统的技术学科。

海岸工程主要包括海岸防护工程、围海工程、海港工程、河口治理工程、海上疏浚工程、沿海渔业设施工程、环境保护设施工程、盐田、海水淡化、海上娱乐及运动、景观开发工程，海上堤坝工程，海上和海底物资储藏设施、跨海桥梁、海底隧道工程等。

2. 近海工程

从 20 世纪后半期开始，世界人口和经济迅速膨胀，对蛋白质、能源的需求量也急剧增加，随着大陆架海域石油与天然气的开采，以及海洋资源开发和空间利用规模不断扩大，与之相适应的近海工程成为近 30 年来发展最迅速的工程之一。其主要标志是出现了钻探与开采石油和天然气的海上平台，作业范围已由水深 10m 以内的近岸水域扩展到了水深 300m 的大陆架水域。

近海工程主要包括大陆架较浅水域的海上平台、人工岛等的建设工程，海底管道、海底电（光）缆工程，海洋矿产资源勘探开发及其附属工程，大陆架较深水域的建设工程。例如，自升式平台、浮式储油库、浮式炼油厂、浮式飞机场等项建设工程，大型海水养殖场、人工鱼礁工程，海上潮汐电站、波浪电站、温差电站等海洋能源开发利用工程。

3. 深海工程

随着全球深海技术的蓬勃发展，海底采矿由近岸浅海向较深的海域发展，现已能在水深超过 3000m 的海域钻井采油，在水深超过 6000m 的大洋进行钻探，在水深 4000m 的洋底采集锰

结核。海洋潜水技术发展也很快,已能进行饱和潜水,载人潜水器下潜深度可达 10000m 以上,还出现了进行潜水作业的海洋机器人,从而开启了深海工程快速发展的大通道。

深海工程包括无人深潜的潜水器和遥控的海底采矿设施等建设工程。目前用于深海石油开采的装备主要有钻井船、浮船式平台、半潜式平台、深海水下油气开发设备、海底水合物开发装备、大洋锰结核开发装置等。2012 年 7 月,中国研制的“蛟龙”号深海载人潜水器在马里亚纳海沟试验海区创造了下潜 7062m 的中国载人深潜纪录。

二、海洋环境概述

地球上连成一片的辽阔水域称为海洋环境,包括海水、溶解和悬浮于水中的物质、海底沉积物,以及生活于海洋中的生物。因此,海洋环境是一个非常复杂的系统。人类并不生活在海洋上,但海洋却是人类消费和生产不可缺少的物质与能量源泉。随着科学和技术的发展,人类开发海洋资源的规模越来越大,对海洋的依赖程度越来越高,同时海洋对人类的影响也日益增大。在古代,人类只能在沿海捕鱼、制盐和航行,主要是向海洋索取食物。现在,人类不仅在近海捕鱼,还发展了远洋渔业;不仅捕捞鱼类,而且还发展了各种海产养殖业;不仅在沿岸制盐,还发展了海洋采矿事业,如在海上开采石油。此外,还进行了海洋中各种可利用能源的开发,如利用潮汐发电等。海洋已成为人类生产活动非常频繁的区域。20 世纪中叶以来,海洋事业发展极为迅速,已有近百个国家在海上进行石油和天然气的钻探与开采,每年通过海洋运输的石油超过 20×10^8 t。随着海洋事业的发展,海洋环境也受到人类活动的影响和污染。海洋环境研究工作的主要任务之一,是探索保护海洋生态系统的途径和方法。

海洋是地球上水循环的起点,海水受热蒸发,水蒸气升到空中,再以凝结成雨的形式返回陆地,使陆地上有降水和径流。陆地上有了水,生物才得到进化和发展。海洋对地球上的气候起着调节作用,使气温变化缓和。所以说,海洋环境对陆地环境的形成也起着决定性的作用。

在各种力的作用下,海水的质点和水团不停运动着,波浪、潮汐和海流等都是海水的运动形式。

由于海洋环境变化复杂,海洋工程除需承受海水的腐蚀、海洋生物的污染等作用外,还必须能承受地震、台风、海浪、潮汐、海流和冰凌等的强烈自然因素,在浅海区还要经受岸滩演变和泥沙运移等的影响。因此,进行建筑物和结构物的外力分析时考虑各种动力因素的随机特性,在结构计算中考虑动态问题,在基础设计中考虑周期性的荷载作用和土壤的不定性,在材料选择上考虑经济耐用等,都是十分必要的。海洋工程耗资巨大,事故后果严重,对其安全程度严格论证和检验是必不可少的。

海洋资源开发和空间利用的发展,以及海洋工程设施的大量兴建,会给海洋环境带来种种影响,如岸滩演变、水域污染、生态平衡恶化等,都必须给予足够的重视。除进行预报分析研究,加强现场监测外,还要采取各种预防和改善措施。

第二节 海洋工程环境研究的内容、意义和方法

一、研究内容

海洋丰富资源的开发和利用,无论是海洋油气与矿产资源的开发、海洋生物资源与海水资源的开发和利用,还是海洋运输和海洋空间的利用与开发都依赖于海洋工程的发展,都必须通

过其特定形式的工程结构物来实施。这些结构物种类繁多,海洋工程环境条件及其诱导的环境荷载的确定是结构设计的重要组成部分之一。

海洋工程环境是研究与海洋工程有关的环境现象,确定海洋建筑物自然条件设计标准的一门科学,它是海洋工程的新兴分支。其主要内容包括:(1)海洋工程物理环境,如风、浪、潮汐、海流、风暴潮、冰、温度、海啸、内波等;(2)海洋工程地质地貌环境,如泥沙输移、海岸演变、地震、水下塌落与滑坡等;(3)海洋工程化学环境,如海水成分;(4)海洋工程生态环境,如海洋生物等。

海洋工程物理环境中的风、浪、流、潮等是影响海洋工程建筑物的主要环境动力因素,本书将着重讨论它们的形成机理及其计算方法。由于这些现象都是随时间和空间而变化的随机过程,本书不仅要揭示它们与海洋结构的短期相互作用,还要分析它们的长期分布规律;不仅要探讨各种荷载对建筑物的独立作用,还要研究某一灾害(如风暴潮、海啸)过程中多种动力要素对建筑物的联合作用。这样才能为海洋结构的优化设计提出客观合理的环境条件设计参数。

海洋工程地质地貌环境中的泥沙输移与冲刷也是工程设计需要考虑的重要环境因素,虽然它不能对结构的受力产生直接变化,但能通过结构基础的变化影响整体的稳定,如结构物水深增加造成整体结构失稳或降低建筑物的使用寿命等。另外,在地震活跃的海域建造海洋建筑物,地震荷载往往是主要荷载,必须加以考虑。

二、研究意义

与陆上建筑物相比,海洋工程结构所处的环境更加恶劣。准确预测海上物理环境条件的强度、出现的概率及其诱发的荷载,对海洋建筑物的安全至关重要。

全球范围内已经探明的海洋油气储量 80% 以上在水深 500m 以内。历经数十年的开发,世界大部分地区的浅海与近海油气资源日趋减少,人类海洋油气资源开发的目光投向了广阔深海。在深水建设平台,不仅要保证在正常条件下的安全作业,即使在极端条件下,生产设施暂停作业,也要保证建筑物的基本安全。因此,对自然环境条件的勘查选取要求更加客观,对结构设计提出了更大的挑战。据统计,海洋石油钻井装置发生的特大事故主要是对相关海域的自然环境条件及地质资料收集和分析不足引起的。如 1964 年位于东阿拉斯加库克湾的 2 座海洋钻井平台被海冰摧毁;1969 年我国的“渤海 2 号”在拖航过程中翻沉;1982 年在加拿大近海油田,半潜式钻井平台“海上徘徊者”的翻沉事件;2010 年 5 月委内瑞拉阿班·波尔钻井平台在苏克雷州东部的加勒比海上的沉没事件。

上述事故说明准确掌握海洋水文气象观测资料的重要性。有鉴于此,世界上一些海洋技术发达的国家,为了适应大型海上工程设施的建设需要,建立了完善的海洋观测体系。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,增设了水文和气象观测设备,用于广泛收集和分析北海水文气象资料。日本为了海岸工程的安全,在其沿海建立了几十个观测站,用于波浪、潮汐、风等自然条件观测资料的收集。在国家海洋局的统一部署下,我国逐步在沿岸和岛屿建立起了气象站和海洋站,系统地进行气象、水文等要素的观测,积累了多年的历史观测资料,对我国的海洋开发起到了积极的推动作用。

海洋环境条件与荷载的合理确定对海洋建筑物的建造投资和经济效益也是举足轻重的。有研究表明,对于墨西哥湾某一固定式平台,风、浪、流各自选取百年一遇重现值作为设计荷载时,所得平台的整体倾覆力矩比考虑三者联合概率影响的值高出 18% 左右,因此,采用联合概率设计方法可以大大降低工程的投资费用。

海洋建筑物的安全性和经济性虽是海洋工程设计中彼此矛盾的两个方面,基于工程可靠度设计理论,二者可以实现和谐的统一。其中对海洋环境条件荷载以及某一结构物的抵抗外荷载的能力进行准确的概率分析是解决问题的关键。

三、研究方法

海洋工程环境的研究方法主要有以下四种。

1. 理论分析法

据海洋环境的观测现象,建立起各要素之间的数学力学关系。由于涉及因素的多样性,往往对自然条件做出不同程度的简化,在数学上做出近似处理,使得现有理论在不同程度上与客观现实之间存在偏离。

2. 现场观测法

现场观测法是研究海洋环境条件的最基本方法。由于自然条件的复杂性,它是揭示物理现象、各物理因素之间相互关系的主要途径,也是确定数学力学公式中经验系数的必要手段。虽然如此,现场观测需要耗费巨大的人力、物力和财力,有时还存在测量上的困难,而且与现场研究遇到的因素掺合在一起,不容易把感兴趣的因素分离出来。

3. 物模实验法

由于现场观测法存在的不足,在实验室里模拟重现各种自然现象成为科学研究的主要途径。虽然科学工作者通过努力,已经在此方面取得很大的进展,但是“比尺效应”的误差,使得在小比尺下建立的理论关系应用到自然条件中存在较大误差。

4. 数值模拟法

数值模拟随着计算机的飞速发展而日益成为解决各种科学问题的重要手段,如波浪在近岸区域的浅水变形计算、风暴潮的数值模拟等。与物理模型相比,它避免了比尺效应问题,可以处理很大的空间范围问题,容易实现不同设计方案的快速比较。即便如此,数值模拟的基础是正确的物理模式和力学关系,否则其结果是没有实际意义的。

需要说明的是,上述方法是相互关联、彼此补充的,不能强调某一方法而忽略其他方法,只有通过多种方式的研究才能确定海洋环境条件对建筑物的影响,提出客观合理的工程结构设计标准。

习 题

1. 哪些工程属于海洋工程?
2. 海洋工程受哪些海洋环境因素的影响?
3. 海洋工程环境的主要研究内容有哪些?
4. 海洋工程环境的主要研究方法有哪些?

第二章 风及风载荷

风是我们常见的自然现象,它与人类的生活、生产密切相关,能被人们掌握利用,也能给人类带来灾难。历史上风给人类造成的巨大灾难屡见不鲜。

1965年11月1日,在英国约克郡的费尔桥,有三个高达百米的冷却塔在大风中倒塌,引起工程界的极大震惊。据分析,倒塌的原因是设计中风压取值较英国风荷载规范中的规定低24%。此后英国风压计算中风速的取值方法也做了相应变化,由原来采用的1分钟平均风速改为3秒钟平均风速。1975年10月5日,台风经过日本,风速达到67.8m/s,东京市43%的电线杆被刮倒或刮断,八丈岛约60%的房屋被破坏,连设计能抵抗风速为60m/s的铁塔也在风中倒塌。1998年,“米奇”飓风横扫拉丁美洲,造成该地区近万人丧生,受灾居民超过250万人,仅在洪都拉斯死亡人数就达5000多人。2002年,50年一遇的最猛烈的台风袭击了日本东京,至少造成4人丧生。2012年10月超级飓风“桑迪”于当地时间29日晚肆虐美国东部沿海城市,至少48人死亡。此次风暴给美国造成200亿美元财产损失,商业损失为100~300亿美元。

由于各种类型的海上石油工程建筑物(如钻井船、平台、高耸的井架以及海上油罐等设备)直接处于风力作用下,一次强大的风暴和它引起的巨浪就可以使海上建筑物遭受破坏。因此,风力载荷已成为船舶和海洋结构物设计中必须考虑的主要载荷之一。此外,为利用良好天气进行施工作业以及钻井船的拖航等,也必须了解工作海区的大风规律及特点,并通过分析强风向、常风向、统计大风日数、绘制风玫瑰图等方法,科学安排海上施工作业计划。

第一节 风的描述

一、风向

风向表示风的来向,气象上用16个方位来表示,如图2-1所示;也有的用($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)方位度数表示。

二、风速资料与风玫瑰图

风速资料通常由测风站测量获得。在陆地上,测风站一般设置在不受建筑物影响的空旷地点。目前,我国的风况观测大多使用自动记录的风向风速仪,该仪器包括感应器、指示器、记录器三部分。为了补充沿海观测台站的不足,国家海洋局要求在沿海航行的我国船只每日四次定时将所处海域的水文气象资料向岸上台站报告。在海上观测时,若无风速仪,常利用海面特征对风速进行目测,用罗盘测定风向。目测的风速用蒲福风级表示。

为了工程规划设计的方便,常常将收集的测风资料进行统计整理,绘制成风况图,因其外形酷似盛开的玫瑰,又称风玫瑰图。风玫瑰图分为风向玫瑰图和风速玫瑰图。

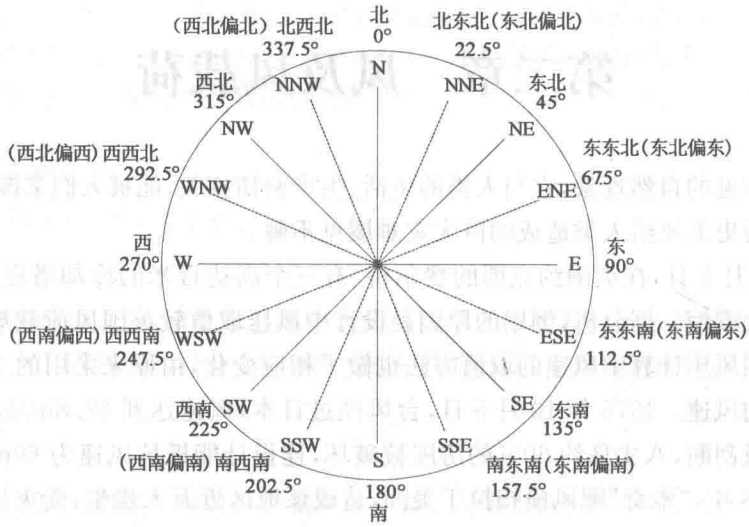


图 2-1 风向方位图

风向玫瑰图表示风向和风向的频率。风向频率是在一定时间内各种风向出现的次数所占所有观察次数的百分比。根据各方向风的出现频率，以相应的比例长度，按风向从外向中心吹，描在用 16 个方位所表示的图上，然后将各相邻方向的端点用直线连接起来，绘成一个形式宛如玫瑰的闭合折线，就是风向玫瑰图，如图 2-2 中的虚线封闭曲线所示。封闭曲线上到中心的距离最大点的所在方向为风频最大方向，为当地主导风向；到中心距离最小点所在的方向为风频最小方向。

平均风速玫瑰图是根据某一时期同一个方向所测得的各次风的风速求出各风向的累计平均风速，并按一定比例绘制在风向方位图上，形成的封闭折线就是平均风速玫瑰图，如图 2-2 中的实线封闭曲线所示。

风玫瑰图有助于找出常风向（风速出现频率最多的风向，如图 2-2 中虚线曲线所示的 NNW 方向）与强风向（出现最大风速的方向，如图 2-2 中实线曲线所示的 NNE 方向）。

风向在天气形势图上还常用风向矢杆及尾部的风速标记来表达，如图 2-3 所示。风向矢杆指向风的来向，风向矢杆上的风速标记有：小旗（20m/s）、长划（4m/s）、短划（2m/s）。

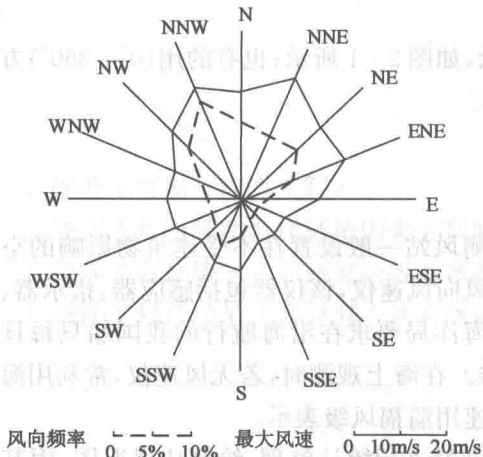


图 2-2 风向风速玫瑰图

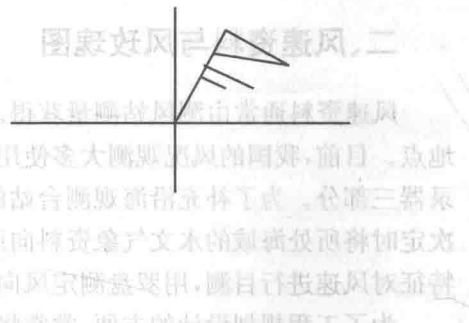


图 2-3 风向矢杆及风速标记

三、蒲福风级表

风速一般用风级来表示。两百多年以前,风速没有测量的仪器,也没有统一规定,各国都按自己的方法来表示。英国海军上将弗朗西斯·蒲福(Francis Beaufort)通过仔细观察陆地和海洋上各种物体在大小不同的风作用下的情况,积累了五十年的经验,在1805年把风划成了13个等级。随着人们海上活动的增加,发现蒲福风级表已不能满足描述海上最大风速的要求,后来又将其补充了5级,扩展为18个风级,成为现在的通用风级表(表2-1)。但此表仍然不能包括全部自然界中所出现的风,例如,龙卷风的风速可达100~200m/s。不过龙卷风发生的范围很小,也比较少见。现在的蒲福风级表已是国际上统一使用的风级表,共有18个等级,在日常海浪气象广播预报中经常使用。

表2-1 风力等级及其名称

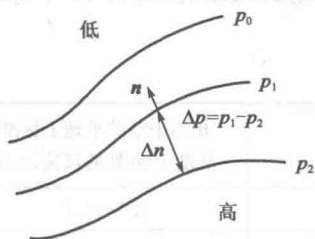
等级	名称	海面浪高, m		海面和渔船征象	陆上物体征象	相当于空旷平地上标准高度10m处的风速, m/s
		一般	最高			
0	静风	—	—	静	静,烟直上	0.0~0.2
1	软风	0.1	0.1	渔船略觉摇动	烟能表示风向,但风向标不动	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	渔船张帆时,每小时可随风移行2~3km	人面感觉有风,树叶微响,旗子风向标能转动	1.6~3.3
3	微风	0.6	1.0	渔船渐觉颠簸,每小时可随风移行5~6km	树叶及小枝摇动不息,旗子展开	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	渔船满帆时,可使船身倾于一侧	能吹起地面灰尘和纸张,树枝摇动	5.5~7.9
5	劲风	2.0	2.5	渔船缩帆	有叶的小树摇摆,内陆的水面有小波	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	渔船加倍缩帆,捕鱼须注意风险	大树枝摇动,电线呼呼有声,撑伞困难	10.8~13.8
7	疾风	4.0	5.5	渔船停泊港中,在海者下锚	全树摇,迎风步行不便	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	进港的渔船皆停留不出	微枝折毁,人行向前感觉阻力甚大	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0	渔船航行困难	建筑物有小损,烟囱顶部及平屋摇动	20.8~24.4
10	狂风	9.0	12.5	渔船航行颇危险	陆上少见,可使树木拔起或使建筑物损坏严重	24.5~28.4
11	暴风	11.5	16.0	渔船遇之极危险	陆上很少,大树被吹倒,建筑物严重损坏	28.5~32.6
12	飓风	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少,摧毁力极大	32.7~36.9
13	—	—	—	—	—	37.0~41.4
14	—	—	—	—	—	41.5~46.1
15	—	—	—	—	—	46.2~50.9
16	—	—	—	—	—	51.0~56.0
17	—	—	—	—	—	56.1~61.2

第二节 风的受力

风是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,在运动过程中空气质点受到水平气压梯度力、水平地转偏向力、惯性离心力和摩擦力等力的作用。

一、水平气压梯度力

为了反映空间气压的高低分布状况,可以把瞬时气压观测值相等的各个点在平面图上连接起来构成等压线(图 2-4)。相邻两等压线的差为一定值,一般取为 5mb 或 2.5mb。



风向低处流,是因为存在水位差,从而产生了从水位高处指向低处的压力。同理,如果气压水平分布不均匀,就会产生一种由高压处指向低压处的压力,使空气从高压处流向低压处。

水平气压梯度力就是一个表示气压水平分布不均匀程度的矢量。其方向是垂直于等压线由高压指向低压,其大小等于垂直等压线方向上单位距离内的气压差,其表达式为

图 2-4 水平气压梯度与等压线

等于垂直等压线方向上单位距离内的气压差,其表达式为

$$G = -\frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (2-1)$$

式中 G ——水平气压梯度, Pa/m;

Δp ——两相邻等压线之间的气压差, Pa;

Δn ——两等压线之间的垂直距离, m。

G 的方向与 Δn 相同, $\Delta p/\Delta n$ 表示水平气压梯度的大小,恒大于零。负号表示沿 n 方向气压是减小的,如图 2-4 所示。显然,等压线越密集,水平气压梯度就越大。

在实际大气中, $\Delta p/\Delta n$ 的数值很小,平均约为 1hPa/100km,只有铅直气压梯度 ($\Delta p/\Delta z$) 的万分之一左右。但它是形成风的动力,对大气的运动具有极重要的作用。

二、地转偏向力

天气分析实践表明,风并不是沿着水平气压梯度方向吹,而是沿着平行于等压线的方向吹。这说明,空气质点除受气压梯度力作用外,还受到使其偏离水平气压梯度方向的力。这种力是因地球自转而产生的,故称地转偏向力,又称科氏力。

科氏力是由地球自转产生的,为了证明地球在自转,在此先介绍傅科摆。

1. 傅科摆

法国物理学家傅科(1819—1868)于 1851 年做了一次成功的摆动实验,傅科摆由此而得名。实验在法国巴黎先贤祠最高的圆顶下方进行,摆长 67m,摆锤重 28kg,悬挂点经过特殊设计使摩擦减少到最低限度(图 2-5)。

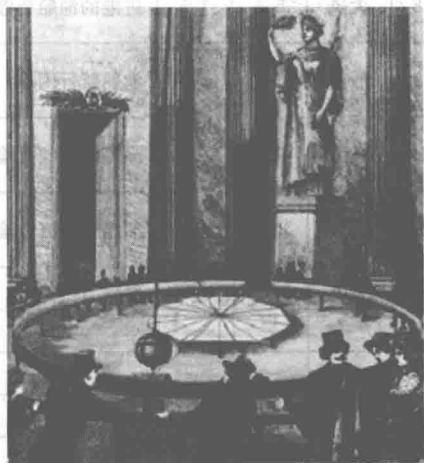


图 2-5 傅科摆

这种摆惯性和动量大,因而基本不受地球自转影响,当地球转动时仍会在空间中保持固定的方向。在傅科摆试验中,人们看到,摆动过程中摆动平面沿顺时针方向缓缓转动,摆动方向不断变化。摆在摆动平面方向上并没有受到外力作用,按照惯性定律,摆动的空间方向不会改变。由此可知,这种摆动方向的变化,是地球上的观察者看到的相对运动现象,从而有力地证明了地球是在自转。

傅科摆放置的位置不同,摆动情况也不同。在北半球时,摆动平面顺时针转动;在南半球时,摆动平面逆时针转动。纬度越高,转动速度越快,在赤道上的摆几乎不转动。在两极极点旋转一周的周期则为一恒星日(23 小时 56 分 4 秒),近似计算中可视为 24 小时。傅科摆摆动平面偏转的角度 θ 可用公式 $\theta=15t\sin\varphi$ 计算,式中 φ 为地理纬度, t 为摆平面偏转所用的时间(h),因为地球自转角速度 1h 等于 15° ,所以,为了换算,公式中乘以 15。傅科摆转动周期 T_f 为

$$T_f = \frac{2\pi}{\omega \sin\varphi} \quad (2-2)$$

式中 ω ——地球自转角速度, 7.29×10^{-5} rad/s。

2. 地球自转对运动物体的影响

地球的半径大约是 6400km,每 24h 自转一周,其切向加速度如图 2-6 所示。现假设一个在 45°N 的质点开始以 10m/s 的速度向南运动,只有重力作用于它。根据牛顿第一定律,一个质点在不受外力作用下,它将以恒定的速度做连续运动。因此,这个质点在 2d 的时间内应该越过 30°N 的地方,并继续以 10m/s 的速度朝南运动。然而,这个 10m/s 的速度是相对于地球而测得的。如果考虑地球自转,则这个质点在 45°N 处还有一个朝东的、大小为 326m/s 的切向速度,但在 30°N 处地球表面朝东的切向速度是 402m/s。由于这个质点仍然按照惯性作用保持起点处的切向速度,所以,对于地球上的一个观测者来说,该质点不仅有向南的 10m/s 的速度分量,而且有向西的加速度分量,到 30°N 处的向西的速度为 76m/s。相对于地球上的观测者,这个质点已经具有一个向西的巨大加速度。

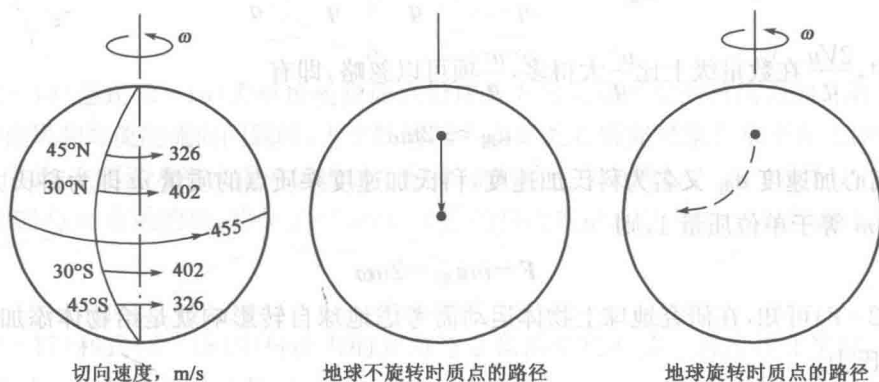


图 2-6 地球自转对运动物体的影响

同样,如果有人让一个质点在 30°N 处开始以 10m/s 的速度朝北运动,那么会发现,在 45°N 处该质点将以 76m/s 的速度朝东运动。当你想象一个质点在地球上做南北方向运动时,会发现一个有趣的规律:在北半球,出现的加速度方向总是指向质点运动方向的右方;在南半球,出现的加速度方向则指向运动方向的左方。在赤道上,加速度将通过拐点,所以其数值等于零。