



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

海上风电机组 基础结构

HAISHANG FENGDIAN JIZU
JICHU JIEGOU

陈达 等 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

014059385

TM315
39



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

海上风电机组 基础结构

陈达 等 编著



TM 315
39



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1745810

014020382

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，主要讲述了海上风力发电机组基础结构设计及其腐蚀防护等相关问题。全书共分为6章，主要内容包括绪论、海上风电机组基础结构环境荷载、桩承式基础、重力式基础、浮式基础以及海上风电机组基础防腐蚀等。本书深入浅出地介绍了海上风电机组基础设计的技术要点，内容系统、概念清晰、具有较强的针对性和实用性。

本书可作为高等院校相关专业的通用教材，也可供从事海上风电工程领域，尤其是海上风电机组基础建设的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

海上风电机组基础结构 / 陈达等编著. — 北京：
中国水利水电出版社，2014.1
（风力发电工程技术丛书）
ISBN 978-7-5170-1562-8

I. ①海… II. ①陈… III. ①海上工程—风力发电机
—发电机组—结构 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第311564号

书 名	风力发电工程技术丛书 海上风电机组基础结构
作 者	陈达 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.75印张 184千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	24.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣

刘丰 刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强

孙志禹 李炜 李莉 李同春 李承志 李健英

李睿元 杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓 洪树蒙

祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

华北电力大学

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 单 芳

白 杨 汤何美子

本书编委会

主 编 陈 达

副 主 编 黎 冰 陆忠民

参编人员 江朝华 陶爱峰 欧阳峰 侯利军 廖迎娣
李 炜 林毅峰 申宽育 黄春芳 王霁雪

参编单位 河海大学

东南大学

水电水利规划设计总院

上海勘测设计研究院

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司



前 言

海上风能资源丰富、开发潜力巨大,但受海浪、水流、泥沙输运等动力因素的影响,较之于陆上风电场,海上风电场建设所面临的工程技术和科学问题更为复杂。海上风电的开发与发展,急需大批专业技术人才,另一方面,相关结构设计等问题也亟待开展系统深入的研究和探索。笔者根据近年来的研究成果和工程实践经验,结合港口工程、陆上风电工程的相关技术以及国外相关标准编写了本书,充分考虑了学生的教学要求,风力发电专业和土建类、水利类专业本科生可根据不同的教学要求,修读全部内容或其中的部分内容。同时,本书也可供相关专业工程技术人员参考。

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,针对海上风力发电机组(简称风电机组,基础结构设计相关问题进行阐述,目标明确,重点突出。本书在内容上尽可能反映海上风电机组基础的新结构、新方法和新技术,并与现行的国家和行业标准相一致。全书内容包括绪论、海上风电机组基础结构环境荷载、桩承式基础、重力式基础、浮式基础,以及海上风电机组基础防腐蚀等,共6章。

参编单位的王淡善、罗金平、蒋欣慰、邝彩云、宋础、刘蔚、刘玮、吉超盈、刘小松、钟耀、谢跃飞、李图强等同志对本书提出了许多宝贵意见,使其内容有了较大改进,特此致谢。本书的编写参阅了大量的参考文献,在此对其作者一并表示感谢。

希望本书能为读者的学习和工作提供帮助,限于作者的水平,书中难免有不妥之处,尚希读者批评指正。

作者

2013年10月

本书编辑出版人员名单

责任编辑 殷海军 李 莉

封面设计 李 菲

版式设计 王 鹏 黄云燕

责任校对 张 莉 张伟娜

责任印制 崔志强 王 凌



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 海上风电发展概况	1
1.1.1 国外海上风电发展概况	2
1.1.2 国内海上风电发展概况	3
1.2 海上风电机组基础结构的分类及组成	4
1.2.1 桩承式基础	4
1.2.2 重力式基础	6
1.2.3 浮式基础	7
参考文献	8
第 2 章 海上风电机组基础结构环境荷载	9
2.1 基础结构的极限状态和设计状况	9
2.2 海上风电机组基础结构上的作用及组合	9
2.2.1 作用的分类	10
2.2.2 作用组合和作用代表值	10
2.2.3 极限状态设计表达式	11
2.3 海上风电机组基础结构上的作用确定	13
2.3.1 风荷载	13
2.3.2 波浪荷载	14
2.3.3 水流荷载	18
2.3.4 冰荷载	19
2.3.5 船舶荷载	20
2.3.6 地震作用	23
参考文献	27
第 3 章 桩承式基础	28
3.1 桩承式基础的结构型式及特点	28

3.1.1 单桩基础	28
3.1.2 三角架基础	29
3.1.3 导管架基础	30
3.1.4 群桩承台基础	31
3.2 桩承式基础的一般构造	31
3.2.1 桩	31
3.2.2 靠船防撞设施	32
3.2.3 平台、栏杆及爬梯	33
3.3 桩承式基础的结构布置	33
3.3.1 三角架(导管架)基础的结构布置	33
3.3.2 群桩承台基础的结构布置	34
3.4 桩承式基础的计算	35
3.4.1 桩的承载力计算	35
3.4.2 桩的承载力验算	38
3.4.3 抗裂与裂缝宽度验算	42
3.5 桩承式基础的变形控制标准	42
3.5.1 桩承式基础的竖向沉降和倾斜率控制标准	42
3.5.2 桩承式基础的沉降计算	43
3.5.3 桩承式基础的水平变位控制标准	44
3.6 钢管桩结构设计	44
3.6.1 钢管桩的材料	44
3.6.2 钢管桩的壁厚	46
3.6.3 桩体分段的确定及构造要求	47
3.6.4 桩体的强度和稳定性	48
3.6.5 钢管桩与风机塔筒的连接	49
参考文献	52
第4章 重力式基础	54
4.1 重力式基础的结构型式及特点	54
4.1.1 沉箱基础	54
4.1.2 大直径圆筒基础	55
4.1.3 吸力式基础	55
4.2 重力式基础的一般构造	56
4.2.1 基床	56
4.2.2 墙身和胸墙	57
4.3 重力式基础的基本计算	58
4.3.1 设计状况和计算内容	58
4.3.2 地基承载力计算	59
4.3.3 基础稳定性验算	64

4.3.4 地基沉降计算	66
4.4 沉箱基础	67
4.4.1 沉箱基础的结构型式	67
4.4.2 沉箱基础的构造	67
4.4.3 沉箱基础的计算	67
4.5 大直径圆筒基础	70
4.5.1 大直径圆筒基础的结构型式	70
4.5.2 大直径圆筒基础的构造	71
4.5.3 大直径圆筒基础的计算	71
4.6 吸力式基础	75
4.6.1 吸力式基础的结构型式	75
4.6.2 吸力式基础的构造	76
4.6.3 吸力式基础的计算	77
参考文献	81
第5章 浮式基础	82
5.1 浮式基础的结构型式及特点	83
5.1.1 Spar 式基础	83
5.1.2 张力腿式基础	83
5.1.3 半潜式基础	84
5.1.4 新型浮式基础	84
5.2 浮式基础的一般构造及设计要点	85
5.2.1 悬链线锚泊	85
5.2.2 锚系计算	86
5.2.3 浮式基础的设计	87
参考文献	88
第6章 海上风电机组基础防腐蚀	89
6.1 海上风电机组基础的腐蚀分区及特点	89
6.1.1 海水的性质	89
6.1.2 腐蚀特点及机理	89
6.1.3 腐蚀分区	90
6.2 海上风电机组基础的腐蚀类型及影响因素	91
6.2.1 钢结构的腐蚀类型及影响因素	91
6.2.2 混凝土结构的腐蚀类型及影响因素	94
6.3 海上风电机组基础的防腐蚀措施及要求	96
6.3.1 钢结构的防腐蚀措施及要求	96
6.3.2 混凝土结构的防腐蚀措施及要求	103
参考文献	108

第 1 章 绪 论

对可再生能源的开发和利用已经成为全人类共同关注的问题,我国在 2007 年发布的《可再生能源中长期发展规划》中已明确提出,到 2020 年中国可再生能源消费量将达到总能源消费量的 15%,2012 年 8 月发布的《可再生能源发展“十二五”规划》进一步明确,到 2015 年可再生能源年利用量达到 4.78 亿 t 标准煤,其中商品化年利用量达到 4 亿 t 标准煤,在能源消费中的比重达到 9.5% 以上。风能是我国目前除水能外应用技术最为成熟也最具规模的一种可再生能源,加上海上风能相对陆地更为丰富也更加稳定,且不占用陆地资源,因此其开发潜力巨大。但相对陆地风电场而言,受海浪、水流、泥沙输运等动力因素的影响,海上风电场建设所面临的科学问题和工程技术均更为复杂,其中海上风电机组基础造价是海上风电工程总造价的主要决定因素之一,慎重选择和合理设计海上风电机组的基础结构型式是海上风电场建设的关键。本书主要针对大规模海上风电场建设,围绕风电机组基础结构的基本种类、结构型式、适用条件、施工工艺等展开系统的阐述。

1.1 海上风电发展概况

风能是由地球表面大量空气流动所产生的动能,风能的大小决定于风速和空气的密度,据估计到达地球的太阳能中虽然只有大约 2% 转化为风能,但其总量仍是十分可观的。全球的风能资源约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$,其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$,比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。自 20 世纪 70 年代初第一次世界石油危机以来,能源日趋紧张,各国相继制定法律,以促进利用可再生能源来代替高污染的不可再生能源。从世界各国可再生能源的利用与发展趋势看,风能、太阳能和生物质能发展速度最快,产业前景也最好。风力发电相对于太阳能、生物质能等新能源技术更为成熟、成本更低、对环境破坏更小,被称为最接近常规能源的新能源,因而成为产业化发展最快的清洁能源技术。

进入 21 世纪,全球可再生能源不断发展,其中风能始终保持最快的增长态势,并成为继石油燃料、化工燃料之后的核心能源。截至 2011 年底,全球风电装机容量达到了 $2.38 \times 10^5 \text{ MW}$,累计装机容量实现了 21% 的年增长率。全球超过 75 个国家有商业运营的风电装机,其中 22 个国家的装机容量超过 1GW,风电正在以超出预期的发展速度不断增长。目前,丹麦用电量的 28% 来自风电,西班牙用电量的 16% 来自风电,德国用电量的 8% 来自风电,风电已成为欧洲国家能源转型的重要支撑,这也为全球能源结构转型树立了榜样。欧洲风能利用协会将在欧洲的近海岸地区进行风能开发利用,希望 2020 年风力发电能够满足欧洲居民的全部用电需求。

我国的风力发电始于20世纪80年代,发展相对滞后,但是起点较高。自从2006年1月1日开始实施《中华人民共和国可再生能源法》后,中国风电市场前期取得稳步发展,后期发展势头迅猛。如今在全球的风电发展中,中国的发展速度最快,截至2012年6月,中国并网风电达到 $5.26 \times 10^4 \text{ MW}$,国家电网调度范围达到 $5.03 \times 10^4 \text{ MW}$,超过美国,跃居世界第一。2012年8月发布的《可再生能源发展“十二五”规划》提出,到2015年,风电累计并网运行达 $1 \times 10^5 \text{ MW}$ 。与此同时,中国风电发展也存在着诸多制约因素,如风能资源与用电市场分布不一致导致严重弃风问题,风电上网电价补贴方式问题,风力发电税收政策转型问题等。

海上风能资源较陆上大,发电量高,而且海上风电具有不占用土地资源、受环境制约少、风电机组容量更大、年利用小时数更高、更具规模化开发的特点,使得近海风力发电技术成为近年来研究和应用的热点。中国可开发和利用的风能储量约为 $2.58 \times 10^6 \text{ MW}$,其中陆地上风能储量约 $2.38 \times 10^6 \text{ MW}$ (依据陆地上离地50m高度资料计算),海上可开发和利用的风能储量约 $2 \times 10^5 \text{ MW}$ 。海上风能资源丰富,有巨大的蕴藏量和广阔的发展前景,特别是东部沿海水深50m内的海域面积辽阔,距电力负荷中心很近,随着开发技术的成熟,海上风电必将成为中国东部沿海地区可持续发展的重要能源。

1.1.1 国外海上风电发展概况

目前国外已建成且投入商业运行的海上风电场基本上都在欧洲,这主要是由于欧洲基本不受台风的影响,发展海上风电具有优势条件。自20世纪80年代起,欧洲就开始积极探讨海上风电开发的可行性。

瑞典于1990年安装了第一台试验性海上风电机组,离岸350m,水深6m,容量为220kW,该机组1998年停运。1997年开始在海上建立5台600kW的风电机组。2000年,兆瓦级风电机组开始在海上应用示范,并规划筹建11座海上风电场,截至2008年已建成15座海上风电场。

丹麦发展海上风电也较早,全国有6%的电力来自近海风电场。1991年丹麦在波罗的海罗兰岛西北沿海附近建成了世界上第一个海上风电场,安装11台450kW风电机组,1995年又建成10台500kW海上风电机组,2003年还建成了当时世界上最大的近海风电场,共安装80台2MW风电机组。出于对环境的考虑,丹麦的海上风电场只关注那些偏远的水深在5~11m之间的海域,所选的区域必须在国家海洋公园、海运路线、微波通道、军事区域等之外,距离海岸线7~40km,以使岸上的视觉影响降到最低。根据丹麦政府能源计划法案,2030年以前丹麦风力发电量将占全国总发电量的50%,其中,近1/4的风力发电量是由海上风电场供给。最近,丹麦政府提出到2050年全部摆脱对化石能源的依赖。

德国是欧洲地区风力发电的主阵地,由于缺乏合适的场地,德国陆上风电场的新建工作将在今后10多年中减缓,从而转向海上风电场的强制建设,目前已在12mile^①开外的深水地区,以及近海地区建造了风电场。根据德国2002年公布的战略纲要,到2030年的

① “英里”的符号, 1mile=1609.34m。

长期目标中,包括德国海岸地区、专属经济区(EEZ)和国土外围 12mile 范围内将达到 2.5×10^4 MW 的安装容量,产生 $7 \times 10^{10} \sim 8.5 \times 10^{10}$ kWh 的电力。最近,德国提出到 2050 年 80% 的电力来自可再生能源。

2003 年底,英国 3 个战略海域(利物浦海湾、沃什湾以及泰晤士河)的 15 个工程总装机容量逾 7000MW,英国计划到 2030 年开发建设 4.8×10^4 MW 的海上风电。

荷兰政府 2010 年达到 1500MW 装机容量的目标已经实现,爱尔兰海上风电场的领跑者 Arklow Bank 电场已经达到 25MW 的装机容量,并将扩大至 500MW。在爱尔兰东海岸地区正在进行另外 6 座电场的调研,拟达到 1000MW 的装机容量。

综上所述,海上风电场在欧洲已较为成熟。到 2011 年底,欧洲已建成 53 个海上风电场,分布在比利时、丹麦、芬兰、德国、爱尔兰、荷兰、挪威、瑞典和英国海域,装机容量达到 3813MW,另有 5603MW 的风电场在建设中。欧洲风能协会 2010 年发布的海上风电发展目标是:到 2020 年装机容量达到 4.0×10^4 MW,2030 年达到 1.5×10^5 MW。截至 2012 年 2 月,已建最大的海上风电场是英格兰西海岸坎布里亚郡外的 Walney 风电场,装机容量 367MW,所占海域达 73km^2 。当前在建的世界上最大的海上风电场为英国 London Array 风电场,共安装 175 台 3.6MW 风电机组,装机容量 630MW。截至 2012 年 8 月英国离岸风力发电量,位居全球第一,估计到 2020 年,其离岸风电场发电量将达 3.1×10^{10} kWh。

相对欧洲而言,北美海上风电发展较晚,截至目前还没有较大规模的风电场真正投入运行。加拿大目前准备建设的最大海上风电场是在安大略湖的 Trillium 风电场,装机容量为 414MW。由于涉及环境法案的阻力,美国在 2012 年 1 月才在政策上基本确定支持尝试建立海上风电场,目前在风能资源丰富的东海岸已经陆续有相关计划得到支持,比较大的的是 Cape Cod 风电场,预计装机容量可达 454MW。

1.1.2 国内海上风电发展概况

在国外海上风电开始进入大规模开发阶段的背景下,我国海上风电场建设也拉开了序幕。我国东部沿海风能资源可开发量在 50m 高度约为 2×10^5 MW、70m 高度约为 5×10^5 MW,不仅资源潜力巨大且开发利用市场条件良好。但是由于我国沿海经常受到台风影响,建设条件较国外更为复杂。

我国目前已建成的海上风电总装机容量约为 250MW,其中上海东海大桥海上风电项目是我国首个大型海上风电项目,总装机容量 102MW,采用 34 台 3MW 风电机组,2010 年 6 月全部并网发电,其二期项目为 1 台单机容量 5MW 的样机,2011 年 10 月并网运行,为我国首台并网运行的最大单机容量风电机组。江苏如东 32MW(潮间带)试验风电场,共安装 16 台海上试验机组,分别为 6 台 1.5MW 风电机组、6 台 2.0MW 风电机组、2 台 2.5MW 风电机组和 2 台 3.0MW 风电机组,该项目于 2009 年 6 月 15 日开工建设,2010 年 9 月 28 日全部投产发电。

根据我国 2012 年 8 月发布的《可再生能源“十二五”规划》,2015 年我国海上风电将达到 5×10^3 MW,海上风电成套技术将形成完整的产业链;2015 年后将实现规模化发展,达到国际先进水平;2020 年海上风电将达到 3×10^4 MW。截至 2012 年 8 月,我国已开展



前期工作和拟建的海上风电项目约 24 个, 主要分布于江苏、浙江、上海、山东、福建和广东等地, 江苏风电发展的步伐最快, 有三个较大规模的风电场集中在该区域。2011 年 6 月江苏如东 150MW 海上(潮间带)示范风电场开工建设, 一期 100MW 工程选用 17 台华锐 3MW 风机和 21 台西门子 2.38MW 风机, 2011 年年底投产发电。二期 50MW 工程选用 20 台金风科技 2.5MW 风机, 经过 4 个月的建设, 于 2012 年 11 月 23 日投产发电。江苏大丰海上风电示范工程拟安装 100 台 3MW 风机, 离岸直线距离约 55km, 场区水深 3~13m, 一期工程规模 200MW, 占用海域面积 130km², 预计总投资近 50 亿元。此外, 江苏响水县近海风电场 200MW 示范项目拟安装 67 台 3MW 风机, 总工期约 32 个月, 工程总投资 35.4 亿元。

中国海上风力发电已经开始起步, 且建设规模有望迅速增大, 然而海上风电场建设至今没有国际通用的标准或规范, 相关结构设计和施工工艺等基本问题亟待开展系统性的研究和探索。

1.2 海上风电机组基础结构的分类及组成

虽然海上风电发展潜力毋庸置疑, 但是相对陆地风电场, 海上风电场工程技术复杂, 建设技术难度较大的特点也是显而易见的。海上风电机组通常由塔头(风轮与机舱)、塔架和基础三部分组成。其中, 海上风电机组基础对整机安全至关重要, 其结构具有重心高、承受的水平力和倾覆弯矩较大等特点, 在设计过程中还需充分考虑离岸距离、海床地质条件、海上风浪以及海流、冰等外部环境的影响, 从而导致海上风电机组基础的造价约占海上风电场工程总造价的 20%~30%。在充分考虑海上风电场复杂环境条件的基础上, 慎重选择海上风电机组基础结构型式, 并进行合理设计是海上风电场建设的关键。

风电机组基础作为风电机组的支撑结构, 对风电系统的安全运行起着至关重要的作用。风电机组基础型式需要根据风电场所处位置及技术、经济等综合因素决定。海上风电机组基础处于海洋环境中, 不仅要承受结构自重、风荷载, 还要承受波浪、水流力等; 同时, 风电机组本身对基础刚度、基础倾角和振动频率等均有非常严格的要求, 因而海上风电机组基础结构设计复杂, 结构型式也由于不同的海况而多样化。海上风电机组基础根据与海床固定的方式不同, 可分为固定式和浮式两大类, 类似于近海固定式平台和移动式平台。两类基础适应于不同的水深, 固定式一般应用于浅海, 适应的水深在 0~50m, 其结构型式主要分为桩承式基础和重力式基础。浮式基础主要用于 50m 以上水深海域, 是海上风电机组基础的深水结构型式。

1.2.1 桩承式基础

桩承式基础结构受力模式和建筑工程中传统的桩基础类似, 由桩侧与桩周土接触面产生的法向土压力承受结构的水平向荷载, 由桩端与土体接触的法向力以及桩侧与桩周土接触产生的侧向力来承受结构的竖向荷载。桩承式基础按照桩身材料不同可分为钢管桩基础



和钢筋混凝土管桩基础,按照结构型式不同可分为单桩基础、三角架基础、导管架基础和群桩承台基础等。

单桩基础是最简单的基础结构型式,其受力形式简单,一般在陆上预制而成,通过液压锤撞击贯入海床或者在海床上钻孔后沉入,如图1-1所示。其优点主要是结构简单、安装方便。其不足之处在于受海底地质条件和水深约束较大,水太深易出现弯曲现象,对冲刷敏感,在海床与基础相接处,需做好防冲刷措施,并且安装时需要专用的设备(如钻孔设备),施工安装费用较高。单桩基础也是目前使用最为广泛的一种基础型式,国外现有的大部分海上风电场,如丹麦的 Horns Rev 和 Nysted、爱尔兰的 Arklow Bank、英国的 North Hoyle、Scroby Sands 和 Kentish Flats 等大型海上风电场均采用了这种基础。



图 1-1 单桩基础

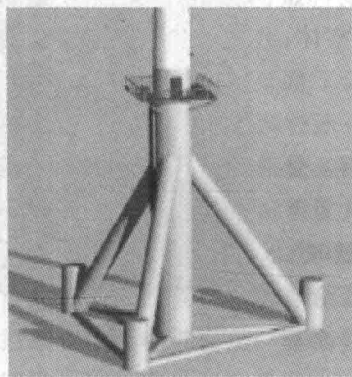


图 1-2 三角架基础

随着水深的增加,单桩基础便不再适合,因为采用单桩基础既不经济,而且技术上的难度加大,施工可行性减低。因此,三角架基础应运而生。三角架基础吸取了海上油气开采中的一些经验,采用标准的三腿支撑结构,由圆柱钢管构成,增强了周围结构的刚度和强度,如图1-2所示。三角架的中心轴提供风机塔架的基本支撑,类似单桩基础。三角架基础适用于比较坚硬的海床,具有防冲刷的优点。德国的 Alpha Ventus 海上风电场首批海上机组中的 6 台,以及我国江苏如东 150MW 海上(潮间带)示范风电场的金风科技 2.5MW 机组都采用了三角架基础。

导管架基础如图

1-3 所示,它是一个钢质锥台形空间框架,以钢管为骨棱,基础为三腿或四腿结构,由圆柱钢管构成。基础通过结构各个支腿处的桩打入海床。导管架基础的特点是基础的整体性好,承载能力较强,对打桩设备要求较低。导管架的建造和施工技术成熟,基础结构受到海洋环境载荷的影响较小,对风电场区域的地质条件要求也较低。2006 年,英国在其北海海域开展的 Beatrice 试验性项目中采用了导管架基础,项目所在海域水深 48m,导管架高 62m,平面尺寸 20m×20m,桩长 44m,桩径 1.8m,桩的壁厚 60mm。瑞典的 Utgrunden II 海上风电场项目也采用了导管架基础。

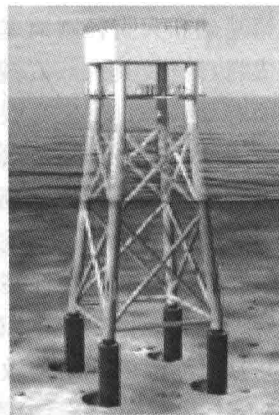


图 1-3 导管架基础

群桩承台基础为码头和桥墩常用的结构型式,由桩和承台组成,如图 1-4 所示。根

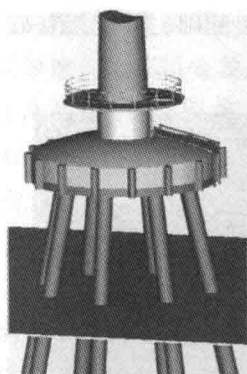


图 1-4 群桩承台基础

据实际的地质条件和施工难易程度，可以选择不同根数的桩，外围桩一般整体向内有一定角度的倾斜，用以抵抗波浪、水流荷载，中间以填塞或者成型方式连接。承台一般为钢筋混凝土结构，起承上传下的作用，把承台及其上部荷载均匀地传到桩上。群桩承台基础具有承载力高，抗水平荷载能力强，沉降量小且较均匀的特点，缺点是现场作业时间较长，工程量大。我国上海东海大桥海上风电场项目即采用了世界首创的风电机组群桩承台基础。基础由 8 根直径为 1.7m 的钢管桩与承台组成，钢管桩为 5.5 : 1 的斜桩，管材为 Q345C，上段管壁厚 30mm，下段管壁厚 25mm，桩长为 81.7m。8 根桩在承台底面沿以承台中心为圆心，半径为 5m 的圆周均匀布置。

1.2.2 重力式基础

重力式基础顾名思义就是利用自身的重力来抵抗整个系统的滑动和倾覆。重力式基础一般由胸墙、墙身和基床组成，如图 1-5 所示。胸墙的作用主要有：①将塔筒和墙身连成整体；②直接承受冰荷载、船舶撞击等荷载，并将这些荷载传给下部结构；③设置防冲设施、系船设施和安全设施等。胸墙一般位于水位变动区，又直接承受波浪、冰凌和船舶的撞击作用，受力情况复杂，需要有足够的整体性和耐久性。胸墙设计时要考虑结构整体性、强度、刚度以及上部设备和塔筒安装的需要。墙身的作用是支撑胸墙，并将作用在上部及自身的荷载传给地基。基床的作用是扩散、减小地基应力，降低沉降，保护地基不受冲刷，便于整平地基，安装墙身等。

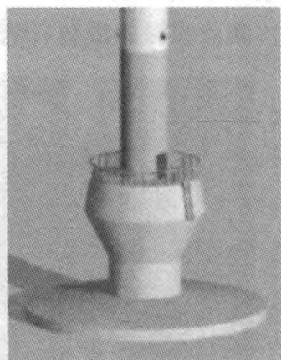


图 1-5 重力式基础

重力式基础根据墙身结构不同可划分为沉箱基础、大直径圆筒基础和吸力式基础。其中沉箱基础和大直径圆筒基础是码头中常用的基础结构型式，一般为预制钢筋混凝土结构，依靠自身及其内部填料的重力来维持整个系统的稳定使风电机组保持竖直。重力式基础必须有足够的自重来克服浮力并保持稳定。因此，重力式基础是所有基础类型中体积和质量最大的。此外，还可以通过往基础内部填充铁矿、砂石、混凝土和岩石等来提高基础的重力。重力式基础的重量和造价随着水深的增加而成倍增加。为避免基础与海床间的浮力，需具有足够的压重。重力式基础具有结构简单、造价低、抗风暴和风浪袭击性能好等优点，其稳定性和可靠性是所有基础中最好的。其缺点在于，地质条件要求较高，并需要预先处理海床，由于其体积大、重量大（一般要达 1000t 以上），海上运输和安装均不方便，并且对海浪的冲刷较敏感。丹麦的 Vindeby 和 Middelgrunden 海上风电场采用了这种基础型式。

吸力式基础是一种特殊的重力式基础，也称负压桶式基础，分为单桶（即一个吸力桶）、三桶和四桶几种结构型式。这是一种新的基础结构概念，在浅海和深海区域中都可以使用。在浅海中的吸力桶实际上是传统桩基础和重力式基础的结合，在深海中作为浮式