



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”“十三五”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 灌浆技术

HAISHANG FENGDIAN
GUANJIANG JISHU

刘晋超 陈涛 马兆荣 元国凯 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五” “十三五” 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 灌浆技术

刘晋超 陈涛 马兆荣 元国凯 编著

海上风电灌浆技术	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200000	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电塔筒灌浆技术	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200001	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电基础灌浆技术	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200002	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电叶片灌浆技术	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200003	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电螺栓灌浆技术	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200004	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电灌浆材料	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200005	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电灌浆施工	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200006	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电灌浆检测	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200007	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电灌浆工程实例	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200008	2014.10	168页	16开	35.00元
海上风电灌浆工程规范	刘晋超、陈涛、马兆荣、元国凯	9787122200009	2014.10	168页	16开	35.00元



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，全书共分9章，内容包括灌浆的应用与发展、高强灌浆材料的物理力学性能、灌浆连接段类型、灌浆连接段轴压静力承载力、灌浆连接段抗弯静力承载力、灌浆连接段的疲劳性能、辅助与附属构件、海上风电灌浆施工及验收、既有灌浆连接段的病害及监测等，系统而全面地介绍了海上风电的灌浆技术。

本书的编写是为海上风电场基础灌浆设计提供一个导则，针对灌浆连接的设计以及施工中的问题提供建议和指导。

本书适合从事海上风电场结构设计、海上风电灌浆施工、工程监理等方面工作的技术人员阅读参考，同时也适合作为高等院校相关专业的教学参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

海上风电灌浆技术 / 刘晋超等编著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 8
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4740-7

I. ①海… II. ①刘… III. ①风力发电—海上工程—灌浆工程 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第224162号

书 名	风力发电工程技术丛书 海上风电灌浆技术
作 者	HAISHANG FENGDIAN GUANJIANG JISHU 刘晋超 陈涛 马兆荣 元国凯 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 (营销中心)
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 13.25印张 314千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	65.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

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 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 澜

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

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建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

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主	任	胡昌支	陈东明					
副	主	任	王春学	李 莉				
成	员	殷海军	丁 琪	高丽霄	王 梅	邹 昱		
		张秀娟	汤何美子	王 惠				



前 言

我国海上风电发展处于示范与产业化探索双重阶段，国家也推行了一些海上风电发展政策促进产业发展。2014年6月，国家发展和改革委员会明确了海上风电的上网电价，使得海上风电的投资效益更加明确。2014年12月，国家能源局发布《关于印发全国海上风电开发建设方案（2014—2016）的通知》，核准超过10.5GW的海上风电项目，“十三五”规划中，更是明确提出未来要重点发展海上风电技术和应用。截至2015年年底，全国海上风电装机容量达到1018MW，借力海上资源和政策扶持，海上风电将成为风力发电行业未来的发展方向，我国有望成为海上风电发展的重要力量。

与此同时，我国海上风电技术也处于稳步发展阶段，海上风机基础的相关技术在不断引进技术、消化吸收与自主创新。从全球来看，单桩基础型式依然是主流，导管架基础逐渐进入市场，高桩承台基础在国内仍具有较好的适用性，其他基础型式也在尝试应用，这些基础与上部结构连接的主要手段是灌浆连接，尤其是单桩基础与导管架基础。灌浆的重要性主要从受力与施工上反映，从受力上，海上风机基础的灌浆连接段是传递风机荷载至地基基础承上启下的关键部位，从施工上，海上风机基础的灌浆是钢管桩沉桩与安装基础承前启后的关键工序，因此，灌浆连接设计与施工对于保证风机正常运行至关重要，其可靠性是确保海上风电机组正常运行的必要条件。

在海上风电灌浆技术的发展过程中，挪威船级社（DNV）与德国劳氏船级社（GL）分别对基础的灌浆连接段开展了一系列研究工作，这两家船级社合并成DNV GL后，仍在灌浆连接段方面继续深入研究，也说明对灌浆连接段受力机理的认识和研究还在不断深入。我国对海上风电灌浆技术的研究处

于初级阶段，技术成果的数量与质量均存在不足。纵观国内外，尚未有一本比较完整反映海上风电灌浆技术方面的参考书籍，本书在国内外研究成果的基础上，结合我国海上风电场设计与施工的经验，整理成一本供相关专业技术人员工程参考用书和高等院校相关专业的教学用书。

全书共分为9章。其中第1章、第7章与第8章由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司刘晋超编写；第2章由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司马兆荣编写；第3章由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司元国凯编写；第4章至第6章、第9章由同济大学赵淇、王銜、陈涛编写。全书由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司刘晋超与元国凯负责统稿。

本书编写过程中，高强灌浆材料供应商BASF的张海明先生与Densit的张涌波先生在灌浆材料与灌浆施工方面提供了宝贵资料，密封圈供应商Trelleborg的陈克宁先生提供了一些与密封圈相关的资料，在此对他们的慷慨相助表示诚挚的谢意。

此外，感谢南方海上风电联合开发有限公司、中铁大桥局集团有限公司、中交第三航务工程局有限公司、中交上海三航科学研究所有限公司、中国水利水电出版社对本书的支持。

本书在编写过程中还得到了中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司汤东升、何小华、徐荣彬、刘东华、廖泽球、毕明君、杨敏冬、张力、李聪等人的帮助，得到了同济大学副校长顾祥林教授的大力支持，在此一并向他们表示感谢。

海上风电灌浆技术还在快速发展，加上编著者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2016年2月



目 录

前言

第 1 章 灌浆的应用与发展	1
1.1 海上风机基础型式	1
1.1.1 桩式基础	2
1.1.2 重力式基础	7
1.1.3 吸力式筒形基础	8
1.1.4 浮式基础	9
1.2 灌浆材料	10
1.3 灌浆的工程应用	11
1.3.1 海上风电场的灌浆	11
1.3.2 海洋石油平台的灌浆	22
1.3.3 灌浆的其他应用	23
1.4 展望	25
参考文献	25
第 2 章 高强灌浆材料的物理力学性能	29
2.1 灌浆材料的强度	29
2.1.1 立方体抗压强度	29
2.1.2 圆柱体抗压强度	31
2.1.3 轴心抗拉强度	32
2.1.4 抗折强度	32
2.1.5 复合应力状态下的灌浆材料强度	33
2.2 灌浆材料的变形	34
2.2.1 应力-应变曲线	34
2.2.2 疲劳性能	35
2.2.3 弹性模量与泊松比	37

2.2.4 收缩与徐变	38
2.3 灌浆材料的其他性能	40
2.3.1 流动度	40
2.3.2 抗裂性	41
2.3.3 耐久性	42
参考文献	43
第3章 灌浆连接段类型	44
3.1 单桩基础灌浆连接段	44
3.1.1 圆柱形灌浆连接段	45
3.1.2 圆锥形灌浆连接段	46
3.2 导管架基础灌浆连接段	47
3.2.1 先桩法导管架基础灌浆连接段	48
3.2.2 后桩法导管架基础灌浆连接段	49
3.3 其他连接段类型	51
参考文献	51
第4章 灌浆连接段轴压静力承载力	53
4.1 灌浆连接段轴压承载力机理	53
4.1.1 概述	53
4.1.2 无剪力键灌浆连接段受静力轴压机理	54
4.1.3 带剪力键灌浆连接段受静力轴压机理	55
4.2 影响灌浆连接段轴压承载力的参数	56
4.2.1 概述	56
4.2.2 灌浆连接段的径向刚度	56
4.2.3 灌浆连接段的剪力键参数	58
4.2.4 灌浆连接段的长度系数	61
4.2.5 灌浆材料的力学性能参数	62
4.2.6 接触面不规则和粗糙程度	65
4.3 灌浆连接段轴向承载力的规范公式	65
4.3.1 概述	65
4.3.2 DNV-OS-J101 (2014)	66
4.3.3 NORSOK (2013) 规范	68
4.3.4 API RP2A (2007) 规范	70
4.3.5 DOE 和 HSE (2002) 规范	70
4.4 API RP2A (2007) 规范公式推导	71
4.5 有限元分析模型的建立	74
4.5.1 材料的本构关系模型	74

4.5.2	单元选择和网格划分	76
4.5.3	钢管与灌浆材料的界面模型	76
	参考文献	77
第5章	灌浆连接段抗弯静力承载力	79
5.1	灌浆连接段抗弯静力承载力机理	79
5.1.1	无剪力键灌浆连接段抗弯机理	79
5.1.2	带剪力键灌浆连接段抗弯机理	80
5.2	灌浆连接段抗弯静力试验研究	80
5.2.1	Aalborg 大学试验	81
5.2.2	Hannover Leibniz 大学试验	84
5.2.3	同济大学试验	87
5.3	灌浆连接段抗弯承载力的规范公式	97
5.3.1	DNV-OS-J101 (2014) 规范公式	97
5.3.2	NORSOK (2013) 规范公式	102
5.4	DNV-OS-J101 (2014) 规范公式的推导	103
5.4.1	无剪力键单桩基础灌浆连接段的抗弯承载力	103
5.4.2	无剪力键单桩基础灌浆连接段变形计算	105
5.4.3	带剪力键单桩基础灌浆连接段抗弯承载力	106
5.5	导管架基础灌浆连接段受力形式	110
5.5.1	导管架灌浆连接段等效径向刚度	111
5.5.2	导管架灌浆连接段接触压力计算	113
5.6	灌浆连接段的有限元模拟	114
5.6.1	概述	114
5.6.2	模型尺寸	117
5.6.3	有限元建模过程	117
5.6.4	数值模拟结果	119
5.6.5	参数分析	120
5.6.6	参数影响探讨	123
	参考文献	124
第6章	灌浆连接段的疲劳性能	126
6.1	灌浆连接段疲劳性能概述	126
6.2	疲劳试验研究	128
6.2.1	轴压疲劳试验	129
6.2.2	弯曲疲劳试验	130
6.3	疲劳性能分析	137
6.3.1	钢结构的疲劳性能	137

6.3.2	灌浆材料的疲劳性能	139
6.3.3	灌浆连接段的整体疲劳性能	143
6.3.4	灌浆连接段疲劳性能算例	144
6.3.5	疲劳设计中的有关结论	152
	参考文献	152
第7章	辅助与附属构件	154
7.1	灌浆密封圈	154
7.1.1	主动式灌浆密封圈	154
7.1.2	被动式灌浆密封圈	155
7.1.3	灌浆密封圈的设计	157
7.1.4	灌浆密封圈性能测试	158
7.2	灌浆管线与接头	159
7.2.1	灌浆管线	159
7.2.2	灌浆接头	161
	参考文献	163
第8章	海上风电灌浆施工及验收	164
8.1	灌浆施工程序	164
8.1.1	单桩基础灌浆施工程序	164
8.1.2	导管架基础灌浆施工程序	166
8.1.3	灌浆施工的前期准备	167
8.2	施工主要设备	168
8.2.1	灌浆系统布置	168
8.2.2	灌浆设备	170
8.3	灌浆材料的供应与储存	174
8.3.1	灌浆材料的供应	174
8.3.2	灌浆材料的储存	175
8.4	施工前期准备及灌浆实施	175
8.4.1	预灌浆准备	175
8.4.2	准备工作	176
8.4.3	灌浆施工实施	179
8.4.4	灌浆结束后清理工作	181
8.4.5	其他工作	182
8.5	人员组织安排	182
8.6	灌浆现场检测、监测及验收	183
8.6.1	浆料的取样及测试	183
8.6.2	浆料过程的监测	185

8.6.3	浆料过程的记录	186
8.6.4	验收	186
8.7	灌浆实施注意事项	186
8.7.1	灌浆实施限制性要求	186
8.7.2	灌浆材料及设备的限制性要求	188
8.8	灌浆施工常遇问题的分析及处理	188
8.8.1	缺乏浆料返回	188
8.8.2	灌浆过程中密封失效	189
8.8.3	灌浆过程中的设备故障	189
8.8.4	注浆管堵塞	189
8.8.5	炎热气候下的灌浆	189
8.8.6	寒冷气候下的灌浆	191
	参考文献	192
第9章	既有灌浆连接段的病害及监测	193
9.1	既有灌浆连接段病害的原因	193
9.2	既有灌浆连接段病害的处理方法	193
9.2.1	连接段底部措施	194
9.2.2	连接段顶部措施	194
9.3	灌浆连接段的监测	195
9.3.1	灌浆连接段钢结构腐蚀	195
9.3.2	灌浆连接段的位移	195
9.3.3	灌浆连接段应变的测量	196
9.3.4	桩的位置	196
9.3.5	螺栓力的测量	197
9.3.6	监测数据的采集	197
	参考文献	197

第 1 章 灌浆的应用与发展

随着陆上风电发展日益成熟，人们开始将目光转移到风能资源更加丰富的海洋，海上风电逐渐得到积极稳妥地发展，但其发展一定程度上受到技术发展的影响，其中包括海上风电灌浆。目前，海上风机基础与上部结构连接的主要手段是灌浆连接，这种方式最早用于连接海洋石油平台导管架基础与上部结构，该工艺已有超过 40 年的使用历史。与海洋石油平台的灌浆相比，无论是设计，还是施工，海上风电灌浆都有其自身特点。本章将简述目前已有的海上风机基础型式、海上风电场建设过程中的灌浆材料以及灌浆的工程应用情况。

1.1 海上风机基础型式

海上风电最早始于欧洲，1990 年，在瑞典 Nogersund 安装了世界上第一台单机容量为 220kW 的海上风电机组；1991 年，在丹麦 Vindeby 建设了世界上第一座商业海上风电场；2001 年，世界第一座大型海上风电场 Horns Rev 也在丹麦建成并投入使用。自此，海上风电技术开始大力发展，单机装机容量不断提高，基础型式也不断改进，并涌现出一些新型基础型式与混合基础型式。

海上风机基础型式按结构型式及其安装方法分为桩式基础、重力式基础、吸力式筒形基础和浮式基础等，几种海上风机基础型式如图 1-1 所示。其中，桩式基础是最常用的基础型式，单桩基础、导管架基础、高桩承台基础等均属桩式基础。

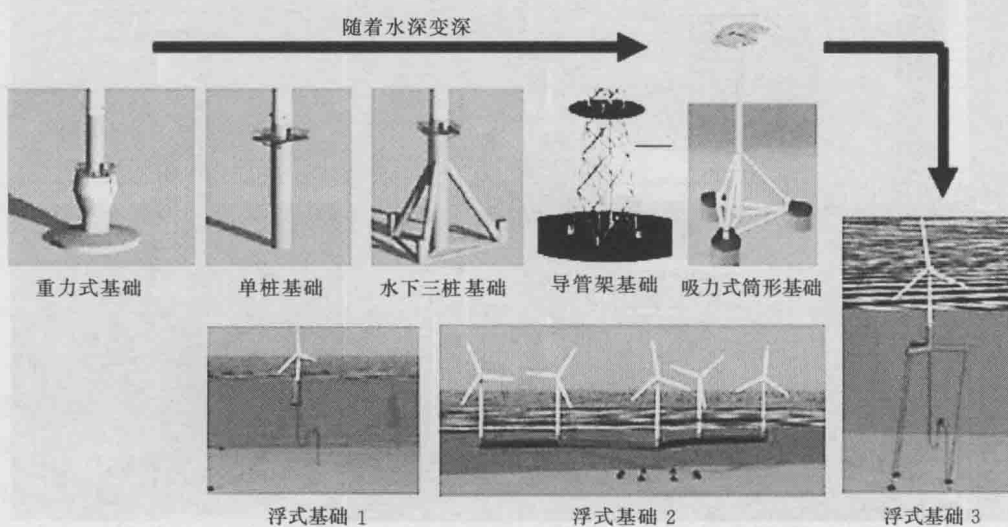


图 1-1 几种海上风机基础型式



1.1.1 桩式基础

1.1.1.1 单桩基础

单桩基础的概念最早于1994年由荷兰莱利公司提出，是海上风电场建设中应用最多的基础型式。单桩基础作为一种简单的桩基型式，具有制造快速、安装简单的优点，风机塔架由单个大直径桩基支承，既可直接用法兰连接，也可通过过渡段灌浆连接，单桩基础型式如图1-2所示。基础施工时，一般采用钻孔或打桩技术将钢管桩打入海床，上部结构再通过过渡段灌浆或直接采用法兰与钢管桩连接。单桩直径一般为4~7m，壁厚约为直径的1/100，插入海床的深度与土壤的强度有关。

单桩基础的优缺点见表1-1。

表1-1 单桩基础的优缺点

<p>优点</p>	<p>加工制造简单，运输安装方便； 沉桩前无需做海床处理； 海上施工速度快，工期较短； 结构传力模式简单</p>
<p>缺点</p>	<p>受海底地质条件和水深的限制较大； 安装时需要专用的沉桩设备，施工安装费用较高； 对冲刷较敏感，基础周围一定范围内的海床，需采取可靠的防冲刷防护措施； 遇到嵌岩的情况，钻孔比较困难</p>

综上所述，单桩基础主要受限于整体刚度、振动及变形因素，适用于海床表层承载能力高，且平均水深在0~30m的场址。目前，欧洲正在研发10m桩径的超大直径单桩基础，使其应用到海域水深更深、机组容量更大的海上风电场建设中，如此，单桩基础型式在较深海域中也将成为一种合适的选择。



图1-2 单桩基础型式



1.1.1.2 水下多桩基础

三桩基础在水下多桩基础中较为常见，其结构中心为连接塔筒的单立柱，单立柱通过三根斜撑连接桩套管，钢管桩通过三桩基础的三个桩套管固定于海床。桩套管与桩通常采用灌浆进行连接，水下三桩基础型式如图 1-3 所示。底座宽度和打桩深度由工程海域的海洋水文和工程地质等条件决定。与单桩基础相比，水下多桩基础具有更高的稳定性和抗侧刚度，适合 20~50m 的水深场址条件。水下多桩基础由于桩套管较长，在浅水海域影响船只的停靠。

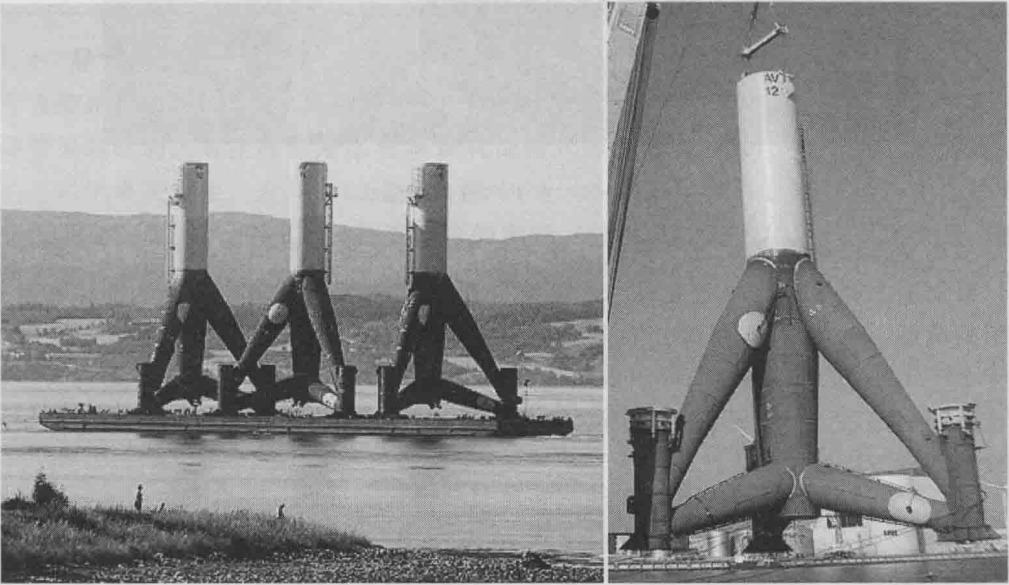


图 1-3 水下三桩基础型式

水下多桩基础的优缺点见表 1-2。

表 1-2 水下多桩基础的优缺点

优点	刚度较大，较大的底盘可提供巨大的抗倾覆弯矩； 可用于较深海域，冲刷影响小
缺点	主要受力节点较复杂，疲劳问题突出，同时建造成本高； 安装时存在许多困难； 不宜用于浅海域

水下三桩基础在德国 Alpha Ventus (Borkum West I) 风电场首次应用，并对该基础型式开展了大量的研究工作，该基础型式后续又推广到 Borkum West II 与 Baltic 2 两个项目中，国内的潮间带海上风电场采用过水下六桩基础，如图 1-4 所示。

1.1.1.3 水上三桩基础

水上三桩基础可以看作是对水下三桩基础的演变，最早由德国 BARD 公司在近海风电场项目中应用，并在 2013 年建成了世界上首个以此基础型式为主的海上风电场；很多

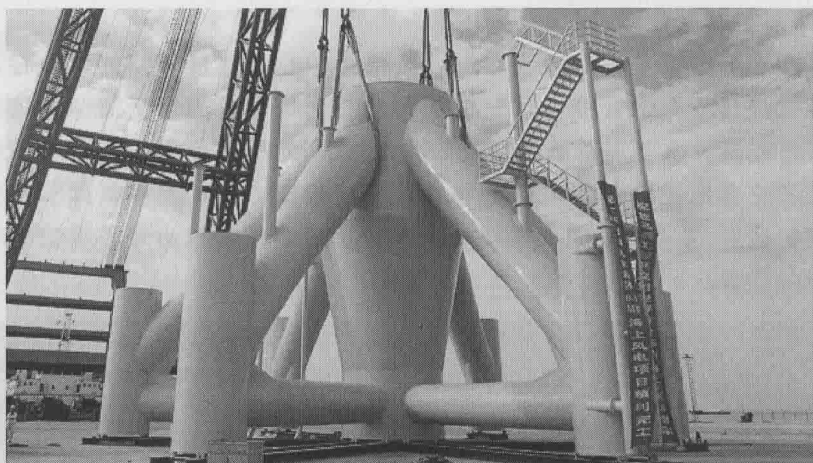


图 1-4 水下六桩基础型式

人将其与水下三桩基础划分为一类，这种结构安装时先将三根钢管桩精确打入海床，调平后，再安装上部结构，一般通过水上灌浆连接钢管桩与上部结构，使上部结构承担风电机组的荷载，如图 1-5 所示。依据 Det Norske Veritas (DNV) 的相关建议，此结构适用于 25~40m 水深的场址条件。虽然适宜较深的水深，但有人认为此种结构有三根独立桩悬挑于水面以上，重心高，抗侧刚度差，受到风、浪荷载作用反应更加明显，上部结构笨重不利于运输。

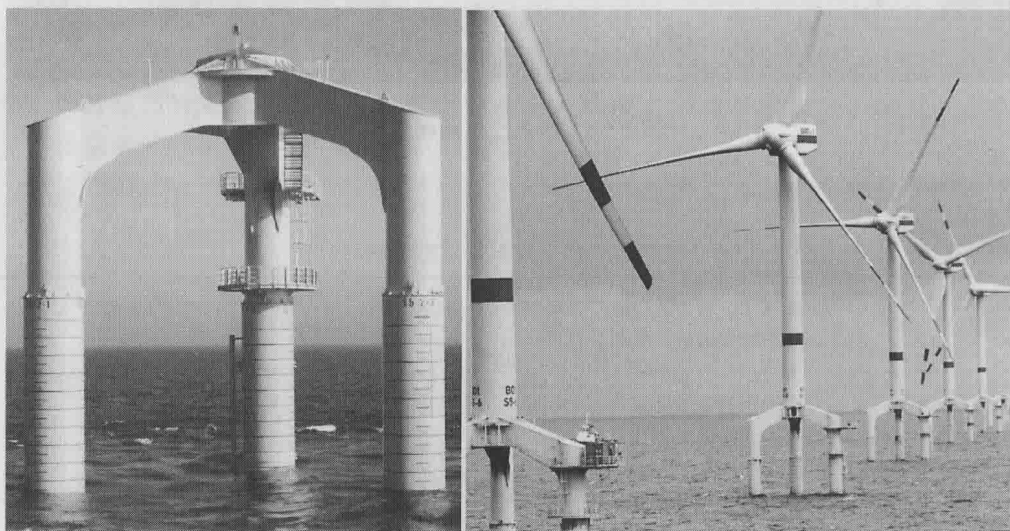


图 1-5 水上三桩基础型式

因此，水上三桩基础只在少数风电场得到应用，该基础型式造价相对较高，建造比较复杂，但水上三桩基础能有效解决目前海上安装作业时间短和受天气影响大的问题，通过水上灌浆进行快速连接，是一种很好的连接方式。

水上三桩基础的优缺点见表 1-3。



表 1-3 水上三桩基础的优缺点

优点	<p>较大的底盘可提供巨大的抗倾覆弯矩；</p> <p>构件数量较少，结构受力明确；</p> <p>钢管桩桩顶在水面以上，容易调平，灌浆施工便利，其灌浆质量容易控制；</p> <p>水面以下构件少，受波浪作用小</p>
缺点	<p>主要受力节点较复杂，疲劳问题突出，同时建造成本高；</p> <p>桩基悬空长，基础重心高，整体刚度低；</p> <p>对冲刷敏感，基础周围一定范围内的海床，需采取可靠的防冲刷防护措施</p>

1.1.1.4 导管架基础

导管架基础由桁架结构作为中间支撑，通过 3~6 根垂直或倾斜的钢管桩固定在海床上。导管架基础通过灌注高强灌浆材料或其他形式与钢管桩连接，导管架顶部通常通过内法兰与风机塔筒连接。这类基础适合水深 10~50m 的场址条件，而且已经在海洋石油和天然气平台中使用了 40 多年。随着水深的增加，这种基础型式的优势更加明显，但由于其节点多且复杂，建造工作量较大。导管架基础适合的场址条件很广，并且到目前为止没有主体结构发生破坏的报告。

导管架基础是目前欧洲海上风电场用得较多的一种基础型式，也是未来发展的趋势。根据打桩的先后顺序，导管架基础分先桩法导管架基础与后桩法导管架基础。后桩法导管架基础与海洋石油平台的导管架基础类似，导管架基础上设置有防沉板与桩靴（又称“桩套管”），先沉放导管架，再将钢管桩从桩靴穿入打入海床，后桩法导管架基础曾应用于英国的 Beatrice 海上风电示范项目中，如图 1-6 所示，以后绝大部分导管架基础均为先桩法，如图 1-7 所示。以四桩先桩法导管架基础为例，首先在海底打入 4 根呈正方形布置的钢管桩，然后进行导管架基础整体吊装。吊装过程通过导向板将基础腿部插入钢桩，再完成导管架基础的定位及调平工作，最后进行水下灌浆施工。

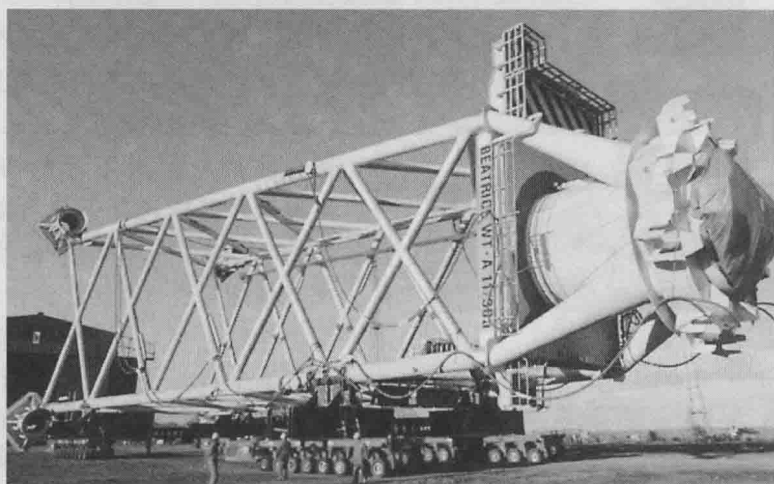


图 1-6 后桩法导管架基础