

海洋大直径钢管桩工程

HAIYANG DAZHJING GANGGUANZHUANG GONGCHENG

刘润 闫澍旺 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

海洋大直径钢管桩工程

刘润 闫澍旺 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是在总结作者及所在研究团队最近 20 年来在海洋工程大直径钢管桩方面取得的具有实用价值和创新性研究成果的基础上撰写而成的。

全书共分为 12 章,包括海洋大直径钢管桩发展概况、桩基承载力、打桩分析的基本理论、打桩锤及其特征参数、常用的打桩分析软件、桩的自由站立稳定性分析,打桩过程中的桩土相互作用模型与可打入性、桩管内土塞与可打入性、打桩拒锤现象、打桩溜桩现象、海洋平台桩基础高应变变动测、打桩工程实例分析。

本书展示了我国在海洋大直径钢管桩研究领域取得的重大进展,有助于海洋大直径钢管桩施工与设计水平的提高。本书可供海洋工程设计人员、技术人员、管理人员和广大海洋工程工作者查阅、借鉴。

图书在版编目 (C I P) 数据

海洋大直径钢管桩工程 / 刘润等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5170-4315-7

I. ①海… II. ①刘… III. ①海洋工程—大直径桩—钢管—打桩工程—研究 IV. ①P75

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第239697号

书 名	海洋大直径钢管桩工程
作 者	HAIYANG DAZHIJING GANGGUANZHUANG GONGCHENG 刘润 闫澍旺 等著
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 21.5印张 510千字
版 次	2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷
定 价	86.00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

序

我国海洋工程起步较晚但发展迅速，已建海上桩基导管架平台工作水深从6.0m到200m，遍布我国渤海、东海及南海海域，体现了钢管桩基础的广泛适用性，在海洋油气资源开发中起到了重要的作用。随着近年来我国海上风电场建设的发展，钢管桩以其结构简单、施工便捷、承载性能优越的特点已成为我国海上风电机组的主要基础型式。海上的打桩施工无疑是桩基工程的关键，准确地进行钢管桩基础的可打入性分析对于保证海上桩基施工的高效实施具有十分重要的意义。

作者及其研究团队结合我国不同海域的桩基工程实践开展了系统的桩基可打入性研究，不仅深入研究了桩锤—桩—土系统的复杂相互作用，而且解决了海上打桩施工中出现的众多技术难题，取得了丰富的研究成果和技术上的突破。

该书是在总结作者最新研究成果的基础上撰写而成的。其主要特色表现在以下几个方面：第一，揭示了钢管桩基础出现自由站立失稳的机理及强非线性过程，实现了锤型选择与桩身贯入深度的高效匹配，保障了打桩置锤阶段桩基自由站立的稳定性；第二，提出了考虑桩体连续下沉惯性力及土塞重量的土塞闭塞效应判断方法，建立了模拟连续打桩过程中桩周不同性质土体强度折减规律的方法，保证了桩基可打入性预判的准确性，实现对连续打桩过程的精细化模拟；第三，揭示了循环荷载作用下桩土界面剪切强度的衰减与停锤导致的土体强度恢复与提高规律，建立了对打桩溜桩与拒锤现象的超前预测方法；第四，研究提出的桩基自由站立稳定性分析方法、桩土相互作用模型、土塞效应判断方法、桩基可打入性分析、拒锤与溜桩现象的判断均与实际工程相结合给出了应用实例，提高了该书的参考价值。

该书的问世，展示了我国在海洋钢管桩打桩施工研究领域取得的重要研究进展，有助于提升海上大直径、超长钢管桩打桩施工设计与实施的水平。该书可为广大海洋工程桩基工程技术与研究人员提供有益的参考和借鉴。

中国工程院院士

谢世楞

二〇一六年七月

前 言

大直径钢管桩是海洋工程结构物的主要基础型式。随着海洋石油与天然气开发区域水深的逐渐增加以及海上施工装备的提升,海洋平台的钢管桩基础由原来的小直径短桩(直径为800mm,长50~60m)发展为目前常用的大直径超长桩(直径大于2m,长度大于120m),特别是随着海上风电场的建设,钢管桩基础呈现出更为显著的大型化发展趋势,单桩基础直径已经达到7~8m,原有的桩基可打入性分析理论应用于大直径、超长桩的打桩预测时出现了偏差。由于海上施工面临的环境条件复杂多变,适宜施工的时间有限且短暂,加之海上施工成本昂贵,使得在陆地及港口工程中鲜受关注的打桩施工成为海洋工程中最为关键的环节。进行准确的桩基可打入性分析,确保桩与打桩设备的匹配、锤型能量适当、顺利地将桩打入到设计深度并满足承载力要求,对于桩基施工以及整个海上工程的顺利建成均具有十分重要的意义。

海洋工程钢管桩的动力沉桩问题是一个涉及土力学、土动力学、材料力学、结构力学等多学科领域的综合性研究课题,不仅是工程中亟待解决的关键技术问题,更需要开展系统的基础理论研究。打桩系统中桩锤—桩基—地基土体存在复杂的相互作用,其中任一条件发生变化都会导致打桩分析结果的不同,目前世界范围内都无法实现对桩基可打入性的准确预测。因此在实际打桩过程中,常常由于对桩可打入性判定的失误,导致桩基无法打入到设计深度,造成截桩、桩身压屈和桩头损坏,或是桩基已达到设计贯入深度,但贯入度仍然很大,不能满足设计承载力的要求,不论出现何种情况,都会延误工期,增加施工费用和工程造价,对于大直径、超长桩的施工更是在整个工程建造中占有举足轻重的地位。

20世纪90年代初,天津大学结合我国海洋平台导管架钢管桩基础的打桩施工,开始研究桩基的可打入性及其相关问题,研究内容不仅包括常规的打桩分析、打桩中桩周土体性状的改变及模拟方法、土体计算参数的合理选取等,更是解决了众多工程中出现的技术难题。例如,由于桩基自由站立失稳导致的钢管桩整体屈曲,由于打桩停锤导致的后继打桩困难甚至出现拒锤现象,由于桩基大型化导致打桩过程中的严重溜桩现象以及桩基高应变动测技

术在海洋平台钢管桩基础中的应用等。本书是在总结天津大学近 30 年来在海洋工程钢管桩基础可打入性研究方面的成果基础上撰写而成的。

全书共分为 12 章，包括海洋大直径钢管桩发展概况，桩基承载力，打桩分析的基本理论，打桩锤及其特征参数，常用的打桩分析软件，桩的自由站立稳定性分析，打桩过程中的桩土相互作用模型与可打入性，桩管内土塞与可打入性，打桩拒锤现象，打桩溜桩现象，海洋平台桩基础高应变动测，打桩工程实例分析等。

本书由刘润、闫澍旺、邱长林、孙立强、李飒撰写，为本书付出辛勤劳动的还有陈广思、郭绍曾、刘孟孟、马鹏程、马文冠、郭欣玥、贾沼霖、范奇、王秀妍、梁超等。感谢国家自然科学基金（50309009、51279127、51322904）及国家高技术研究发展计划（863 计划 2004AA616100）对本项研究工作的支持，同时感谢海洋石油工程股份有限公司李志刚、尹汉军为本书提供的宝贵工程资料！

由于作者的学识和水平有限，难免存在疏漏、不妥或错误之处，诚恳希望读者与专家指正。

作者

2016 年 3 月于天津大学

目 录

序 前言

第 1 章 海洋大直径钢管桩发展概况	1
1.1 海洋工程中钢管桩的应用	1
1.2 钢管桩的打桩设计与施工	5
1.3 大直径钢管桩的可打入性问题	7
1.4 本书的主要内容	15
参考文献	16
第 2 章 桩基承载力	22
2.1 规范中关于桩基承载力的相关理论	22
2.2 深基础承载力的理论计算方法	33
2.3 桩基承载力计算方法的发展	41
2.4 桩基承载力工程算例	45
参考文献	59
第 3 章 打桩分析的基本理论	63
3.1 概述	63
3.2 波动方程基本原理	64
3.3 一维波动方程的求解	66
3.4 桩土相互作用模型	71
3.5 改进的波动方程分析法	72
参考文献	77
第 4 章 打桩锤及其特征参数	79
4.1 概述	79
4.2 柴油桩锤	80
4.3 液压桩锤	83
4.4 我国海洋工程中的常用锤型	90
参考文献	94
第 5 章 常用的打桩分析软件	96
5.1 概述	96

5.2	TNOWAVE 打桩分析软件	97
5.3	GRLWEAP 打桩分析软件	104
5.4	其他打桩分析方法	111
5.5	OPDPA 打桩锤击数预测软件	116
	参考文献	126
第 6 章	桩的自由站立稳定性分析	128
6.1	概述	128
6.2	钢管桩的自沉深度	128
6.3	理想细长杆件的屈曲稳定	132
6.4	打桩置锤期间的荷载	135
6.5	规范法验算桩基自由站立稳定性	140
6.6	有限元法验算桩基自由站立稳定性	144
6.7	工程实例分析	152
6.8	桩身自由站立稳定性分析软件 (PLSUA)	160
	参考文献	170
第 7 章	桩土相互作用模型与可打入性	172
7.1	概述	172
7.2	桩周土体的变形与破坏	173
7.3	常用的土阻力模型	178
7.4	土性参数的常见取值	187
7.5	连续打桩时土体强度的衰减规律	188
7.6	工程实例分析	195
	参考文献	211
第 8 章	桩管内土塞与可打入性	213
8.1	土塞的形成	213
8.2	土塞特性	214
8.3	土塞效应的理论判断及其改进方法	219
8.4	土塞与桩管内壁相互作用模型	229
8.5	工程算例	233
	参考文献	237
第 9 章	打桩拒锤现象	240
9.1	概述	240
9.2	拒锤现象的发生机理	241
9.3	打桩拒锤的理论分析	249
9.4	拒锤现象的工程对策	252
9.5	工程案例	254

参考文献	266
第 10 章 打桩溜桩现象	268
10.1 概述	268
10.2 溜桩现象的发生机理	269
10.3 溜桩过程中桩基承载力评估	273
10.4 静力触探法估算桩基承载力	279
10.5 打桩过程的数值模拟	283
10.6 溜桩工程实例	285
参考文献	295
第 11 章 海洋平台桩基础高应变动测	296
11.1 概述	296
11.2 高应变动测的基本原理	297
11.3 高应变动测的实施	300
11.4 实验结果分析	306
11.5 停锤后桩周土强度增长规律研究	312
参考文献	314
第 12 章 打桩工程实例分析	315
12.1 工程概况	315
12.2 土塞效应的判断	317
12.3 桩锤的选取	318
12.4 桩基自由站立稳定性分析	318
12.5 打桩过程分析	320
附录 南海某固定平台工程桩基可打入性分析	323

第 1 章 海洋大直径钢管桩发展概况

1.1 海洋工程中钢管桩的应用

在所有结构基础形式中，桩基础以其承载力高、沉降量小、稳定性好、适应性强等特点得到了广泛的应用。桩基础作为最古老的基础形式之一，在人类有历史文献记载以前，就已经在地基条件不良的河谷及洪积地区用来建造房屋。1981年，美国肯塔基大学的考古学家在智利的蒙特维尔德附近的森林意外发现了几根用来支承小木屋的木桩，其被认为是现今发现的最早的桩基础应用，可以追溯到大约 12000~14000 年前。我国桩基础的应用也具有悠久的历史，根据最新的考古发现及文献记载，我国最早的桩基础距今有 7000 多年，发现于浙江省余姚市的河姆渡，遗址中，存在大量的由圆木桩、方木桩和板桩这 3 种木桩组成的桩基础，表明人类在新石器时代已经具备了打桩和制桩的成套工具和技术。到了宋代，官方颁布的一部建筑设计、施工的规范书《营造法式》，有专门的章节——“临水筑基”用来描述木桩的施工，这标志着中国古代建筑发展到了较高阶段，桩基的建造及施工技术也已经趋于成熟。到了明、清两代，桩基技术更趋完善。如清代《工部工程做法》一书对桩基的选料、布置和施工方法等方面都有了规定。到了 19 世纪后期，钢材、

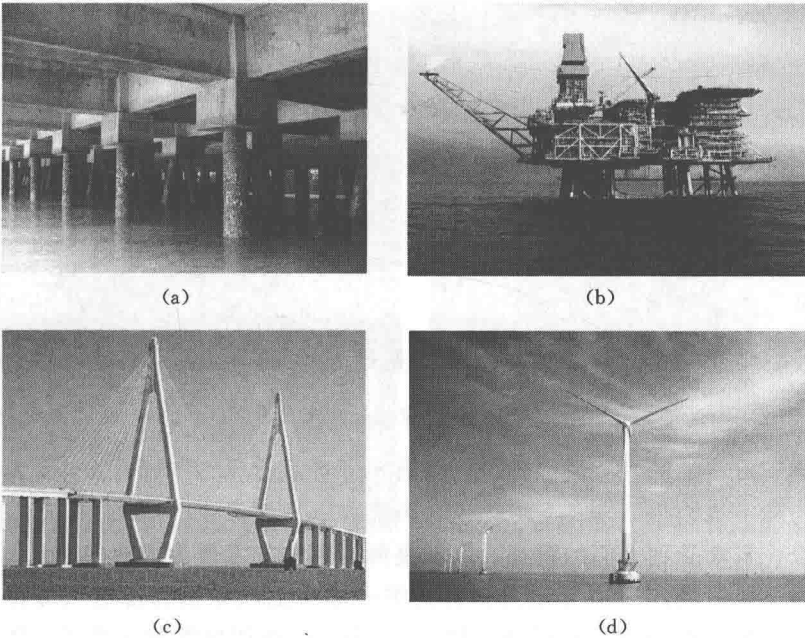


图 1.1.1 固定式导管架平台
(a) 高桩码头；(b) 海洋平台；(c) 跨海大桥；(d) 海上风电场

水泥等材料相继出现, 桩型和施工工法不断丰富、机械和设备制造工艺再次进步, 使得桩基础得到了前所未有的发展, 在民用建筑、工业厂房、公路桥梁、港口码头、海洋平台等建设领域都得到了更加广泛的应用^[1] (图 1.1.1)。

众所周知, 海洋占地球表面积约 71%, 其蕴藏着非常丰富的油气资源。根据我国第三次石油资源评价结果: 中国海洋石油资源量为 246 亿 t, 占全国石油资源总量的 23%; 海洋天然气资源量为 16 万亿 m³, 占总量的 30%。而中国海洋石油探明程度为 12%, 海洋天然气探明程度为 11%, 远低于世界平均水平。因此, 大力开发海洋资源, 对缓解能源矛盾、促进经济发展具有重要的意义。海洋石油平台是开发海洋油、气资源的基础性设施, 是进行海上生产作业的基地。海上平台是一种岛状空间结构物, 具有一个高出海面的水平台面, 供生产作业或其他活动。海上石油平台按其结构特点和工作状态大体可分为固定式和浮式两大类。固定式平台在整个使用寿命期内位置固定不变, 其形式有桩式、绷绳式和重力式等。其中桩基式平台也称导管架平台, 其结构主要由 3 部分组成: 上部组块、由桁架组成的导管架和桩基。上部组块是平台进行油、气资源开采活动的上部设施结构。导管架和桩基共同构成平台的基础, 它们在陆地上进行预制, 被拖运到海上进行安装。首先将导管架安装就位, 之后钢桩穿过导管架的导管被分节打入到海底地基中, 最后在桩和导管之间的环形空隙中灌入水泥浆, 使得桩和导管架形成一个整体, 共同组成平台上部组块结构的基础^[2]。到目前为止, 世界各国拥有的各类海洋平台近 1 万座, 除极少数钢筋混凝土桩基平台外, 绝大多数都是钢质桩基结构的固定式平台。我国从 20 世纪 60 年代开始在渤海勘探、开发海上油气, 目前已建成海洋石油平台 100 余座^[3]。在浅海中的石油平台多采用应用十分广泛的固定式导管架基础型式, 具体如图 1.1.2 所示。

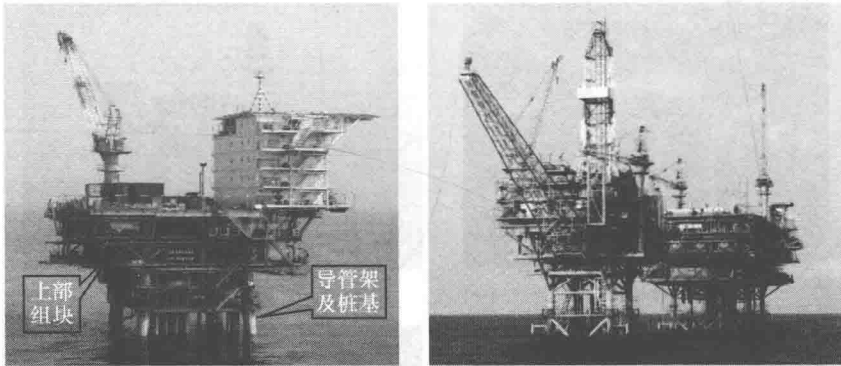


图 1.1.2 固定式导管架平台

海洋中除了丰富的油气资源以外, 还具有十分可观的风力资源。海洋风能作为一种可再生能源, 与陆上风能相比, 具有风速高、风能大、风湍流强度低、土地征用少、能量收益比高等特点, 日渐受到人们的重视。欧洲是海洋风电技术最为成熟的地区, 绝大部分国家都建立了海上风电场。1990 年瑞典架设的第一座海上风电机标志着人类拉开了海上风能开发利用的序幕。根据欧盟的规划, 到 2020 年, 近海风电装机达到 50GW, 届时可以满足 1/3 的欧洲用电量。而中国近海位于太平洋和亚洲大陆之间, 较大的海陆热力差异会产生显著的气压梯度和气温梯度。根据国家海洋风能资源发展规划, 将在广东南澳、浙江

岱山、江苏如东等地相继建立海上风电场,预计到2020年,海上装机总量可以达到10GW^[4]。中国海洋石油总公司于2007年11月6日在渤海绥中油田建设完成的国内第一座海上风力发电站正式投产,标志着我国开始了海上风能的利用。同年11月8日实现了风力发电站的满功率运行。最大功率输出为1511kW。在之前技术支持及经验的积累下,我国在上海东海大桥东侧1~4km、距南汇岸线8~13km的海域设置了34台单机功率3MW的风力机组,建成了中国首座海上风电场(图1.1.3)。

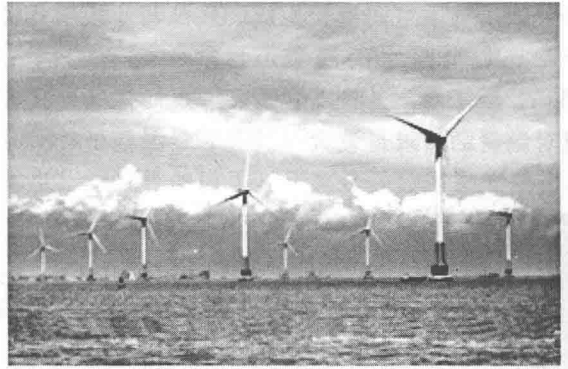


图 1.1.3 东海大桥风电场

在海上风电项目中,基础成本约占总成本的25%左右,基础结构的选择是海上风机设计的重要内容^[5]。目前,钢管桩广泛应用于单桩基础、高桩平台基础、三脚架基础与导管架基础。虽然每种基础的型式不同,但其下部都选用桩基础将上部荷载传递到地基中。在所有的海上风电基础型式中,单桩基础的应用最为广泛,在海上风电场中使用率占65%以上^[6]。其结构型式较为简单,由钢管焊接而成,如图1.1.4所示。单桩基础适用于水深30m以下的非岩基海域,较早使用的钢管桩采用直径4m以下的大直径钢管桩。随着风机单机容量增大及建设水深增加,目前采用的单桩基础通常为直径4m以上的超大直径钢管桩,如丹麦Samsø海上风电场和我国江苏如东海上风电场分别采用了直径为4.5m和5.2m的超大直径钢管桩。高桩承台基础由基桩和上部承台组成,如图1.1.5所示。高桩承台基础适用于0~20m水深的海域,施工时先打设钢管桩,再浇筑顶部混凝土承台,施工工序简便,可在软土地基中使用,但结构总体偏厚,自重较大。

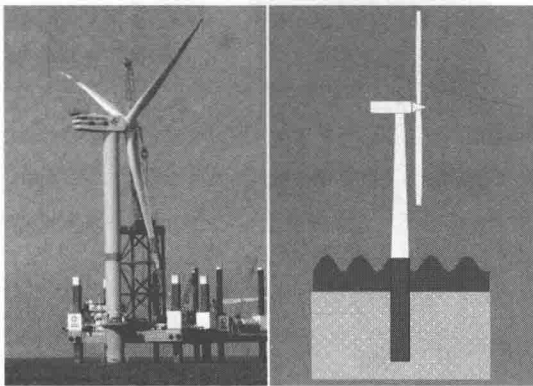


图 1.1.4 单桩基础

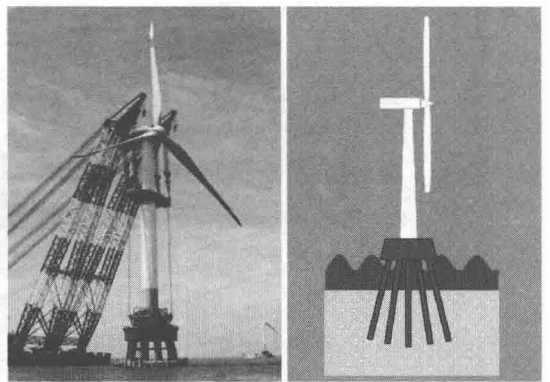


图 1.1.5 高桩承台基础

三脚架基础采用三腿支撑结构,如图1.1.6所示。目前有德国Alpha Ventus和Bard Offshore I海上风电场采用了此种结构型式,具有基础自重较轻、整体结构稳定性好的优势。三脚架基础适用于水深30~40m的海域,但不适于海床存在大面积岩石的情况。

导管架基础由空间框架构成，底部与4根钢管桩相连，如图1.1.7所示。导管架基础适用于40m以上深水的海域，目前主要有英国 Thornton Bank Phase II 风电场和比利时 Thornton Bank 二期风电场采用此种基础型式，具有基础强度高、安装噪音较小等优势，但对钢材的需求量较大^[7]。

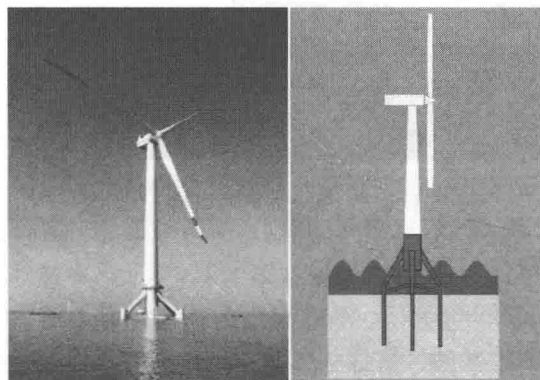


图 1.1.6 三脚架基础

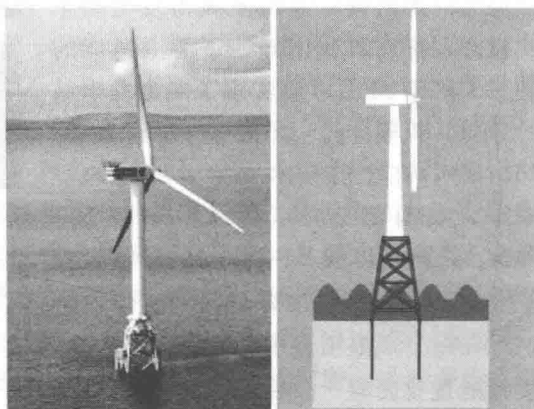
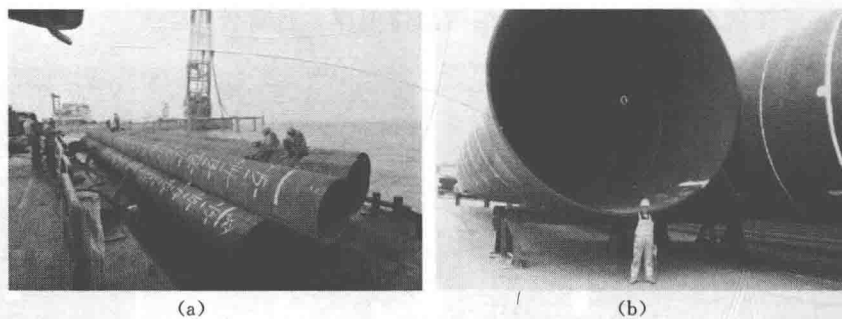


图 1.1.7 导管架基础

随着海洋油气及风能资源的不断开发，需要在环境复杂多变、波浪潮汐剧烈、地质条件不良的海域设置石油平台及风电机组，既要满足能源的开采利用，又要保证这些构筑物安全平稳地运行，这就促使了钢管桩基础向着大直径、超长、深贯入、大承载力的方向发展。现阶段使用的单桩基础多采用超大直径钢管桩，具有结构型式简单、拖运方便和施工速度快的优势。其直径通常在4m以上，与传统的小直径钢管桩相比桩径明显增大，如图1.1.8所示。



(a)

(b)

图 1.1.8 钢管桩

(a) 小直径；(b) 超大直径

钢管桩体通常采用开口型式，与其他类型的桩基础型式比较，开口式钢管桩的优点：
①钢管桩承载力强，桩身强度高、水平抗力大、抗弯能力优，并且材质均匀，材料无明显的各向异性；
②钢管桩具有良好的贯入能力，断面面积小，挤土效应弱，打入率高，对周围结构物及土体的扰动较小；
③钢管桩设计灵活，可以根据工程实际要求，制作成不同的桩长、桩径、壁厚，同时，还可以设置成较大斜度，以承受建筑物较大的水平荷载；
④钢

管桩采用工厂化建造，目前已具有丰富的设计理论、成熟的工艺流程、完善的检验手段，确保钢管桩的质量；⑤钢管桩施工方便，在工厂预制后在现场进行贯入即可，并且，与上部结构的连接易于处理，在施工中由于种种原因导致桩的实际尺寸超出或小于设计尺寸时，可以通过截桩或者接桩的方式处理；⑥钢管桩搬运堆存方便，长度可以任意接出，因此可不受搬运堆存条件的制约。鉴于以上优点，钢管桩的应用与研究是今后工程实践及科学研究的重点所在。

1.2 钢管桩的打桩设计与施工

在海洋工程的桩基础设计过程中，不仅要考虑上部结构在位条件下桩承受轴向载荷及水平载荷的能力，还要考虑其在安装条件下所受的各种荷载，这就需要桩的设计具有足够的强度，并能够打入到泥面以下预定深度，以满足上部结构在使用期间对稳定性和耐久性的要求，从而保证海洋平台或者海上风电机组的安全运行。

在进行海洋工程桩基设计之前，需要收集相关的设计资料，主要包括：工程地质勘察报告；环境设计基础数据；打桩所用锤型资料；群桩（如有）套筒的结构布置图纸；桩的起吊方案；结构设计规格书；设计依据的规范等。在对相关资料收集完毕之后，就可进行桩基础的设计工作。其主要内容包括：桩的轴向承载力分析；桩的自由站立分析；桩的起吊分析；桩的可打入性分析；桩的在位强度分析；桩的疲劳分析；桩灌浆连接强度分析等。通过以上分析，确定桩的直径、长度和分段壁厚。桩的直径、数量和设计入泥深度通过桩的承载能力以及桩在位条件下承受的重量和环境载荷确定，并保证一定的安全裕度。分段壁厚则根据桩自由站立分析、桩的起吊分析、桩的可打入性分析、桩的在位强度分析、桩的疲劳分析和桩灌浆连接强度分析的结果综合确定^[8]。

钢管桩施工主要有吊桩、插桩、接桩、打桩，如图 1.2.1 所示。

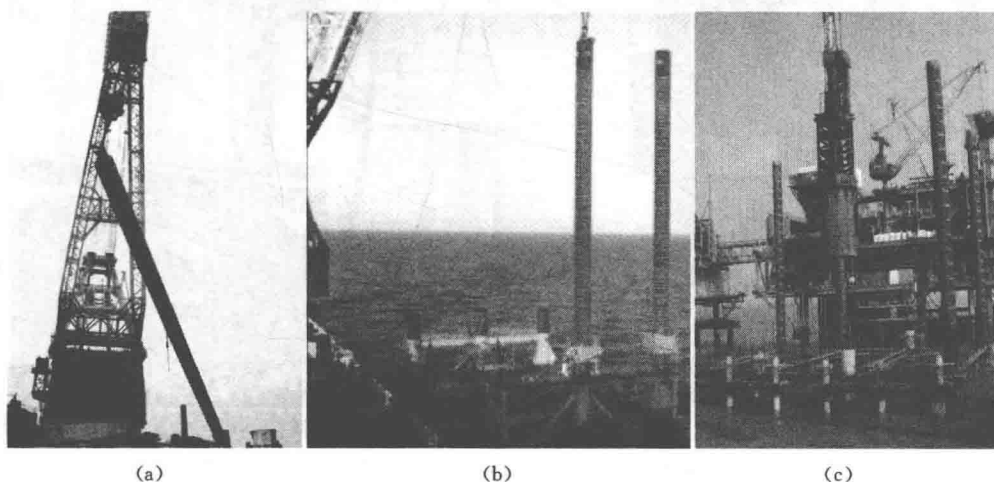


图 1.2.1 海上打桩作业过程
(a) 吊桩；(b) 插桩与接桩；(c) 打桩

吊桩是将钢管桩从运桩船甲板上移至安装位置的过程。从运桩船吊钢管桩要用到专用取桩器，吊桩时首先根据桩的管径和重量选择合适型号取桩器，先将取桩器顶部钢缆挂上浮吊吊钩，然后将取桩器插入钢管桩顶部，再通过液压系统驱动起桩器四周液压吸盘，使起桩器牢牢抓住钢管桩顶部内壁。这时浮吊起钩，慢慢将钢管桩一头吊起，直至完全竖直。在进行施工设计时应计算钢管桩在整个吊桩过程中的各个阶段的弯曲状态。插桩是浮吊吊装单节钢管桩插入导管架桩腿中或前一节桩中。接桩是将插好的桩与前节桩进行焊接，用测量定位工具将两节桩位置定准后开始焊接程序，直至焊接检验完成两节桩完全焊成一体。

打桩是将接好后的钢管桩打入土体的过程。打桩过程分为取锤、插锤、打桩、收锤 4 个步骤。打桩锤一般平放于甲板，主要类型有柴油锤、液压锤、振动锤等（图 1.2.2）。取锤是一个从吊起直至锤竖直的过程。插锤是指将打桩锤下部套筒套上桩顶的过程。打桩的开始阶段，坚持“重锤轻打”原则，以防溜桩，待贯入度正常后再逐步加大捶击能量。稳定打桩阶段除及时记录击打能量、频率、桩贯入度外，也要注意浮吊吊钩及时降下跟进桩锤的下落速度。当上节桩打到预定位置后即可停桩准备进行下一节桩施工，当最后一节桩在额定功率下贯入到设计深度时，即可停锤，完成整根桩的打桩工作。一般最后两节桩管上需安装感应器以监测沉桩受力情况，以防将桩打坏。之后浮吊起钩将桩锤从桩顶吊起放回甲板，完成整个打桩施工过程^[9-10]。具体过程如图 1.2.3 所示。

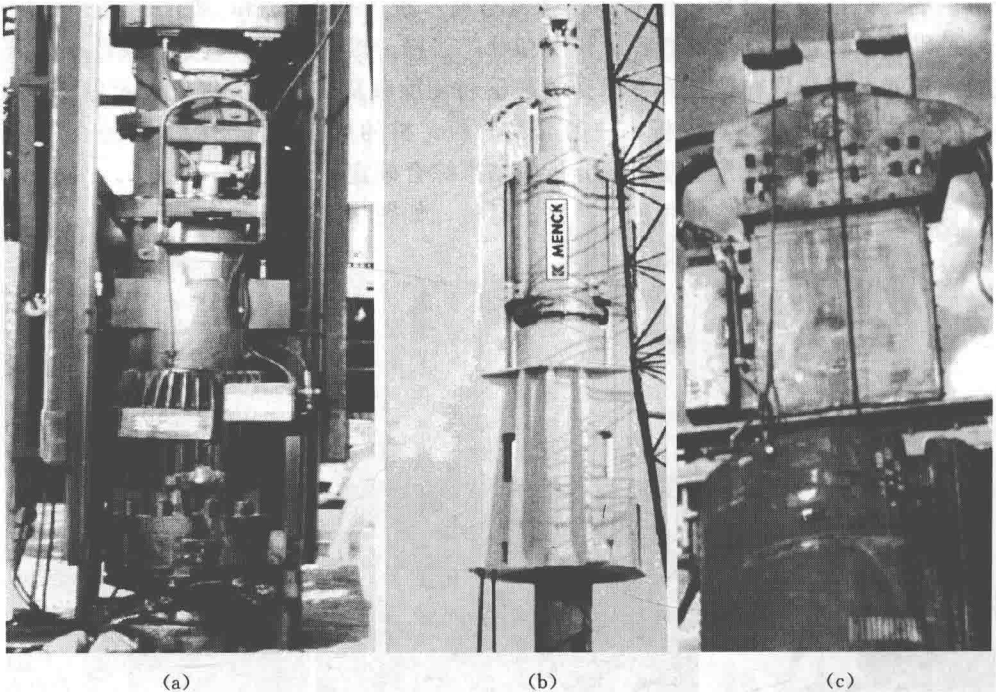


图 1.2.2 海上打桩作业使用的锤型
(a) 柴油锤；(b) 液压锤；(c) 振动锤

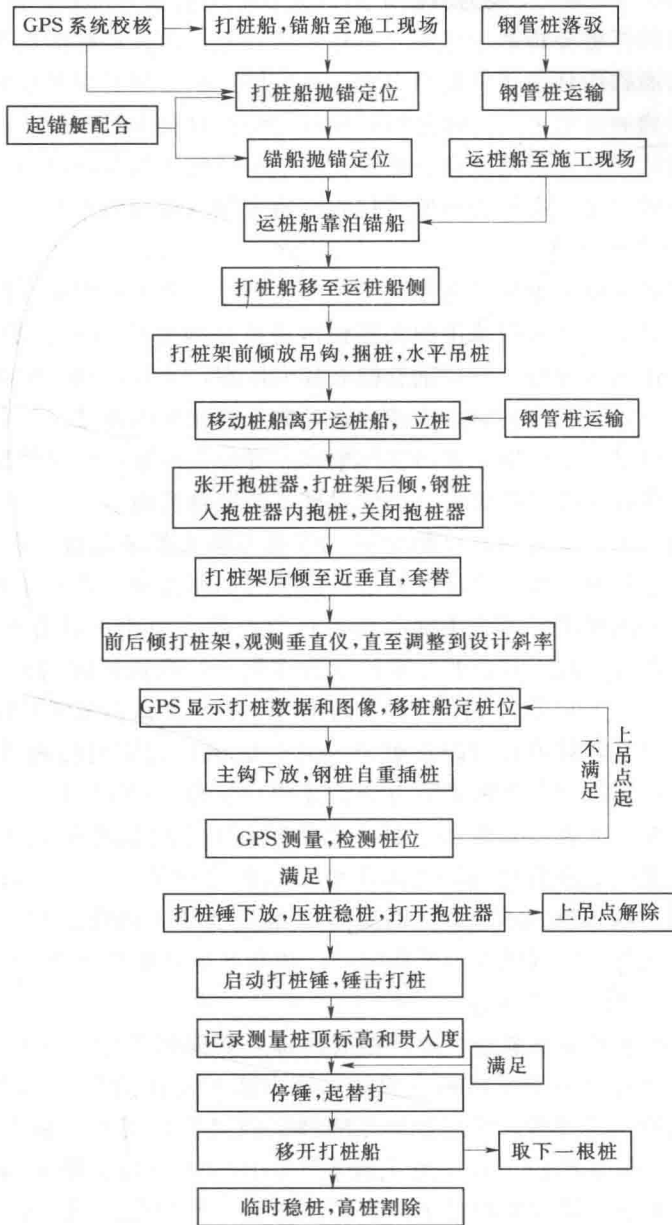


图 1.2.3 打桩流程图

1.3 大直径钢管桩的可打入性问题

桩的可打入性问题是涉及土力学、土动力学、材料力学、结构力学等多学科领域的综合研究课题，不仅是工程中亟待解决的关键问题，更需要开展系统的基础理论研究。近年来，海洋工程中钢管桩出现了大型化的发展趋势，桩基础由原来的小直径短桩（例如，直

径为 800mm, 长 50~60m) 发展为目前常用的大直径超长桩 (例如, 直径大于 2m, 长度大于 120m), 原有的打桩分析理论应用于对这种大直径、超长桩动力沉桩预测时出现了偏差。由于海上施工面临的环境条件复杂多变, 适宜施工的时间有限且短暂, 加之海上施工成本昂贵, 进行准确的桩的可打入性分析, 确保桩与打桩设备的匹配、锤型能量适当、顺利地将桩打入到设计深度并满足承载力要求, 对于桩基施工以及整个海上工程能否顺利建成均具有十分重要的意义。在钢管桩的可打入性研究领域涉及以下关键科学技术问题。

1. 大直径桩的承载力

准确地计算桩基承载力不仅是上部结构长期稳定性的要求, 更是在打桩阶段预测桩基可打入性的关键。目前海洋工程采用的大直径钢管桩基础直径多大于 2m, 桩基直径的增大导致了桩土相互作用机理与小直径钢管桩有较大区别, 大直径钢管桩在贯入土体过程中挤土效应减弱, 在小直径开口钢管桩中较为常见的土塞完全闭塞情况, 在大直径开口钢管桩中较难形成, 打桩过程中桩端土体的破坏模式亦有较大差异, 因此传统的土塞效应判断方法和桩基承载力设计计算方法对大直径钢管桩不能完全适用。

单桩基础的轴向承载能力通常以轴向极限承载力作为控制条件, API 规范^[11]推荐了砂土和黏土中钢管桩轴向承载力的计算方法, 将桩的轴向极限承载力分为桩端环形面积承载力、外侧摩阻力与内侧摩阻力或土塞底部承载力二者之中较小者之和。但 API 规范考虑了海洋环境的复杂性, 对承载力的计算作了许多限制, 在设计时具备较大的安全储备, 造成计算值偏于保守, 特别是大直径钢管桩的出现, 引发了众多学者对钢管桩的轴向承载力开展研究。桩管内土塞对承载力的贡献是大直径桩承载力研究的焦点之一^[12-13], 有研究表明开口桩的极限侧阻力和极限端阻力分别比闭口桩低 51% 和 32%; 开口桩土塞底部承载力为桩端环形部分承载力的 28%, 且内侧摩阻力比外侧摩阻力高 36%^[14]。通过静力触探获取桩管内土塞的上升高度与应力水平也可以作为评价土塞对承载力贡献的重要手段^[15-17]。对于打入式钢管桩其承载力的时间效应也是承载力研究的热点问题, 有研究表明打入桩在施工完成数天后侧摩阻力开始增长, 约在 8 个月后达到最大值, 桩的长期承载力能达到沉桩完成初期的 2 倍以上^[18]。

大直径钢管桩的水平向承载特性同样是有待深入研究的课题。目前广泛应用的 $p-y$ 曲线法^[17]是基于小直径桩的试桩资料获得的, 该方法对大直径钢管桩的适用性有待深入研究^[19-20]。由于试验不易开展, 采用数值方法和室内离心机模型试验方法研究大直径钢管桩的水平承载性能是目前较为常用的手段^[21-29], 而地基的反力模量与桩身刚度的确定是这一问题研究的焦点。研究表明对于大直径钢管桩, 当埋深达到一定深度后, $p-y$ 曲线法对地基反力模量 E_s 取值过大, 易造成桩身水平变位偏小, 桩的设计桩长不足^[30-31]。小直径钢管桩受到水平荷载作用时, 桩身的弯矩和剪力主要分布在桩体的上部, 桩端位置处无位移; 而大直径钢管桩桩身的弯矩和剪力分布在整个桩长方向, 桩端处发生与桩顶反方向的位移, 其承载特性与刚性桩类似, 水平荷载作用下桩身绕某点旋转, 且地基反力初始模量与桩的直径、土体的内摩擦角及桩的埋深相关^[5, 19, 32-34]。

近年来随着海上施工装备的不断提升, 大直径钢管桩得到了广泛的应用与发展, 但对大直径钢管桩桩土相互作用机理的研究尚不充分, 无成熟的土塞闭塞效应预判方法及承载力计算方法, 在大直径钢管桩的设计中仍以小直径桩的设计理论为依据。因此有针对性地