

指导性文件

GUIDANCE NOTES

GD38-2023



中国船级社

海上固定式风机支撑结构指南

2023

2024 年 1 月 1 日生效

北 京

目 录

第1章 通 则	1
第1节 一般规定	1
第2节 检验依据	1
第3节 定 义	1
第4节 检验和证书	2
第2章 环境资料与工程地质	6
第1节 一般规定	6
第2节 气象资料	6
第3节 海洋水文	6
第4节 工程地质	7
第3章 载荷与工况	9
第1节 一般规定	9
第2节 载 荷	9
第3节 载荷工况	11
第4节 分项系数	15
第4章 结 构	17
第1节 一般规定	17
第2节 结构用钢	17
第3节 防 腐	17
第4节 钢结构设计	19
第5节 混凝土结构设计	20
第5章 基 础	21
第1节 一般规定	21
第2节 桩基础	21
第3节 重力式基础	29
第4节 筒型基础	30
第6章 运输与安装	38
第1节 运 输	38
第2节 安 装	38

第1章 通 则

第1节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南是中国船级社（以下简称“CCS”）为海上固定式风机支撑结构提供技术服务的指导性文件。

1.1.1.2 本指南的要求是非强制性的，但一经接受采用，就成为各方共同遵守的技术依据，应遵照执行。

1.1.1.3 本指南主要规定了海上固定式风机支撑结构的主体结构的检验要求，消防设备、逃生和救生设备、助航标志与信号设备的配备应符合《海上风电场设施检验指南》的要求。

1.1.2 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于由 CCS 检验发证的海上固定式风机支撑结构。主要包括下部结构和基础，不包括风轮-机舱组件和塔架结构。

第2节 检验依据

1.2.1 一般要求

1.2.1.1 对于具有新型结构和新型特性的海上固定式风机支撑结构，如应用指南的任何规定会严重妨碍这些支撑结构对其特性的应用，经 CCS 总部同意，可免除 CCS 规范的任一要求。

1.2.1.2 若对本指南要求的计算方法、评定标准、制造程序、材料、检验和试验方法，能提供相应的试验、理论依据、使用经验或有效的公认标准，经 CCS 总部同意，可以接受作为代替和等效方法。

1.2.1.3 本指南接受标准未明确具体版本号时，均指当前有效的最新版本。

第3节 定 义

1.3.1 定义

1.3.1.1 除另有规定外，本指南有关定义如下：

（1）海上固定式风机支撑结构：系指风力发电机组中用于支撑塔架及上部主机的结构，包括固定式风机下部结构和固定式风机基础，不包括塔架，以下简称“支撑结构”，如图 1.3.1.1 所示；

（2）海上固定式风机下部结构：系指支撑结构的一部分，从海底向上延伸，连接固定式风机基础和塔架，以下简称“下部结构”；

（3）海上固定式风机基础：系指支撑结构的一部分，其将作用于支撑结构上的载荷传递到海床中，以下简称“基础”；

（4）桩基础：系指采用单根桩或多根桩支撑风电机组结构体系的基础；

（5）重力式基础：系指由钢筋混凝土或钢质基础结构作为基座，靠结构自重或压载保持稳定并支撑风电机组结构体系的基础；

（6）筒型基础：系指顶部封闭，底部开口的筒型结构型式，以筒壁嵌入地基中来支撑风电机组结构体系的基础；

（7）飞溅区：系指支撑结构在潮汐和波浪作用下干湿交替的区间。飞溅区的范围为自

最高天文潮位以上波高（为 50 年一遇的平均波高）的 2/3，至最低天文潮位以下波高的 1/3；

（8）风电机组基础平台：系指设置于风电机组基础外侧、供人员检修进入塔筒门内的支撑平台；

（9）包络面或包络线：系指在水平向载荷 H 、竖向载荷 V 和力矩 M 共同作用下，地基达到整体破坏或极限平衡状态时，各个载荷分量的组合在三维载荷空间（ V, H, M ）中形成的一个外凸曲面，在二维载荷空间中包络面就退化为包络线。

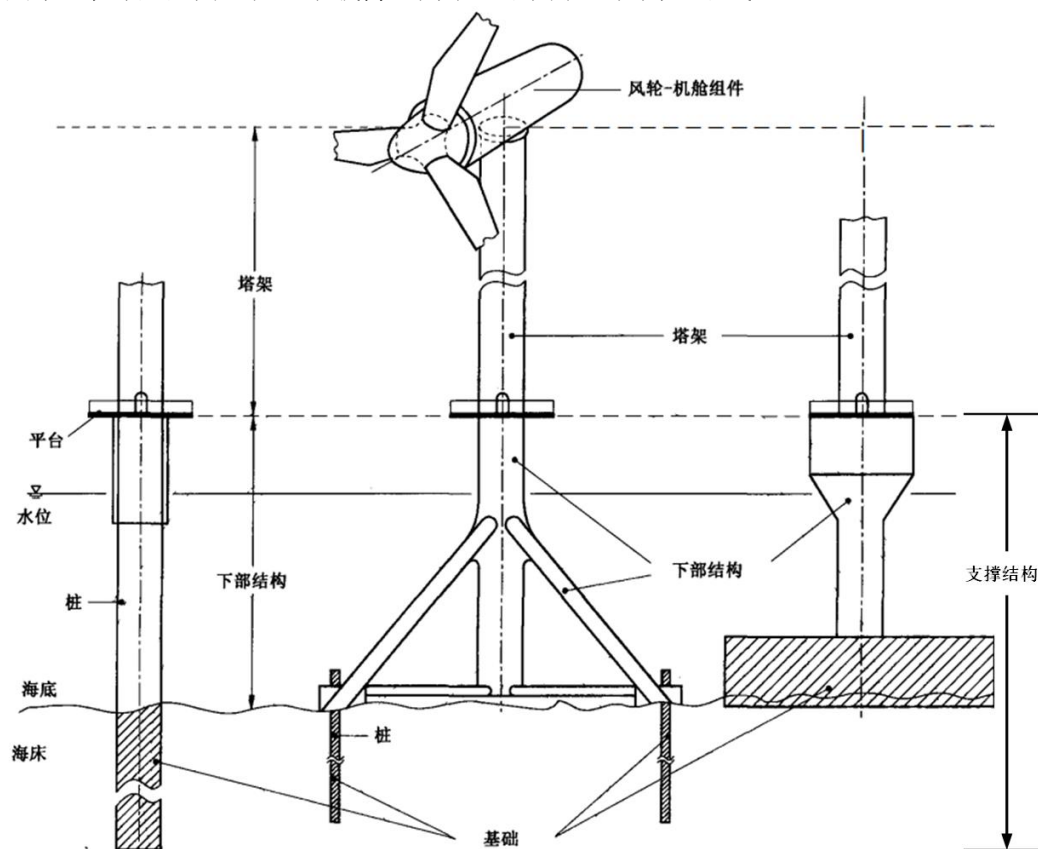


图 1.3.1.1 海上固定式风机支撑结构

第 4 节 检验和证书

1.4.1 一般要求

1.4.1.1 CCS 对海上固定式风机支撑结构实行检验发证，其结构检验应满足本指南规定的检验要求。

1.4.1.2 在设计寿命期内的海上固定式风机支撑结构，CCS 按照本指南检验合格后，签发《海上固定设施符合证书》。

1.4.2 检验种类

1.4.2.1 图纸资料审查：包括规格书、结构图纸、安装图纸、设计报告、安装报告和符合本指南所涉及或要求的其他技术文件。

1.4.2.2 初次检验：在支撑结构投入营运之前或在首次签发证书之前，对于本指南所涉及的所有项目进行一次完整的检验，以保证这些项目符合有关要求，并且能够满足支撑结构预期的营运业务。

1.4.2.3 年度检验：对证书有关的项目进行检查，以确保其处于良好状态，并且符合支撑结构预期的营运业务。

1.4.2.4 换证检验：对证书有关的项目进行检查，以确认处于良好状态，并且适合支

撑结构预期的营运业务，并换发新证书。

1.4.2.5 附加检验：因发生事故影响支撑结构安全性能的，或对支撑结构进行重大改装的，或因其他情况，根据具体情况进行全面或局部的检验。

1.4.3 检验范围

1.4.3.1 图纸资料审查

新建设施申请检验时，申请人应在施工前提交下列图纸和资料一式 3 份或电子图纸送 CCS 审查，必要时 CCS 可要求扩大送审图纸资料的范围，图纸应清晰地表明构件尺寸、结构布置、材料类型和等级、节点详图、焊接或其他连接方式：

(1) 规格书

- ① 结构设计规格书；
- ② 结构材料规格书；
- ③ 结构建造规格书；
- ④ 结构检验规格书；
- ⑤ 结构焊接及无损检测规格书；
- ⑥ 运输和安装规格书；
- ⑦ 整体技术规格书（包含①~⑥内容）（适用时）；
- ⑧ 防冲刷布置图、施工图、施工和验收规格书（适用时）。

(2) 结构图纸

- ① 海上风电场平面布置图；
- ② 支撑结构设计总说明；
- ③ 下部结构平、立面图；
- ④ 单桩基础主结构图；
- ⑤ 单桩主体结构开孔图；
- ⑥ 单桩基础顶部法兰结构图；
- ⑦ 重力式基础主结构图；
- ⑧ 重力式基础配筋图；
- ⑨ 筒型基础主结构图；
- ⑩ 筒型基础内部隔舱图；
- ⑪ 导管架主体结构图；
- ⑫ 导管架桩基础结构图；
- ⑬ 导管架过渡段结构图。

(3) 安装图纸

- ① 拖拉点及拖缆布置图；
- ② 系固布置图；
- ③ 海上吊装位置/吊装示意图。

(4) 设计报告

- ① 风机基础设计专题报告；
- ② 风机下部结构设计专题报告（适用时）；
- ③ 模态分析报告（适用时）。

(5) 安装报告

- ① 系固分析报告；
- ② 运输分析报告；
- ③ 浮拖系泊分析报告；
- ④ 桩基础可打入分析报告；
- ⑤ 筒型基础安装分析报告；
- ⑥ 吊装分析报告；
- ⑦ 高应变检测报告（适用时）。

(6) 下列图纸资料备查：

- ① 设计任务书（适用时）；
- ② 海洋水文报告；

③ 地质勘察报告。

1.4.3.2 初次检验

- (1) 应包括支撑结构的布置、结构、设备和材料的全面检验；
- (2) 应完成图纸审查，并应满足本指南要求；
- (3) 支撑结构应按所批准的设计图纸及技术文件施工，并应满足本指南要求；
- (4) 现场检验的主要内容包括：
 - ① 制造及安装过程中质量管理程序的审核；
 - ② 制造及安装程序、大纲、试验计划的审核；
 - ③ 焊工及无损检测人员的资格审核；
 - ④ 主要材料、设备证书的复核；
 - ⑤ 材料试验规程、焊接规程及无损检测规程的审核；
 - ⑥ 重要结构装配及焊接检验；
 - ⑦ 设备安装检验及试验；
 - ⑧ 电缆、管线安装检验及试验；
 - ⑨ 舾装、涂装、防腐及其它项目检验；
 - ⑩ 码头装船系固与绑扎检验；
 - ⑪ 海上安装检验，包括海上运输、海上吊装、下水就位、打桩、灌浆等；
- (5) CCS 根据检验结果签发证书和报告。

1.4.3.3 年度检验

- (1) 结构及防腐检验内容：
 - ① 外观目检水面以上的全部结构，应特别注意支撑结构飞溅区内因腐蚀及船舶和漂浮物对结构的碰撞而造成的损坏。必要时，对局部构件采用无损检测法进行检验；
 - ② 检查支撑结构的重要受力节点，尤其是应力集中的部位。必要时应进行无损检测，发现裂缝及时修复。对于非焊接型式连接的松弛、磨损、疲劳、脆断等破坏应采用合适的方法予以修复；
 - ③ 检查可能影响支撑结构完整性的构件和载荷变化情况，及结构运行监测的总体情况；
 - ④ 检查甲板、通道、梯道的栏杆、踏板等安全设施；
 - ⑤ 检查连接支撑结构群的栈桥结构及其保护栏杆；
 - ⑥ 检查支撑结构、设备、管线涂层的完好情况，尤其是支撑结构下部结构在飞溅区的涂层完好情况；
 - ⑦ 采用外加电流系统进行保护时，应检查电源设备与支撑结构的电连接状况，检测电流和电位；
 - ⑧ 采用牺牲阳极进行保护时，应检测牺牲阳极块的状态；
- (2) 经年度检验并满足检验要求，CCS 验船师在年度检验签署栏签署。

1.4.3.4 换证检验

换证检验在年度检验基础上增加以下检验内容：

- (1) 结构和防腐检验的内容
 - ① CCS 根据支撑结构的使用年限、条件、载荷的历史和以前检验结果决定支撑结构水上、水下结构部分是否作彻底检查。作业者可根据支撑结构的设计、建造、作业、运维等情况，说明理由，向 CCS 提出免除水下详细检测检验，经批准，可不进行详细检测；
 - ② 担任水下检验任务和评价支撑结构整体安全性的单位和人员应具有 CCS 认可的资格证书；
 - ③ 泥面以上的结构应按如下要求作彻底检查：
 - a. 整个结构的状况；
 - b. 裂纹和疲劳损伤检测；

- c. 必要时需进行测厚检测，如对严重腐蚀的杆件或高应力杆件进行测厚，具体测厚可参照 CCS《在役导管架平台结构检验指南》第 2 章适用要求执行；
 - d. 海底状况（冲刷、不稳定等迹象）；
 - e. 船舶或其他原因造成的损伤；
 - f. 腐蚀状况和牺牲阳极水下检查以及外加电流阴极保护系统的有效性；
- (2) CCS 或作业者认为必要的其他检验项目；
- (3) 支撑结构经换证检验，满足本指南要求，并适用于预定用途，由 CCS 签发新证书。

1.4.3.5 附加检验

(1) 如支撑结构发生的事故或发现的缺陷影响该设施的安全或其结构、设备、装置、布置或材料的有效性或完整性，其所有人或作业者应尽快向 CCS 报告该事故或缺陷，CCS 应启动调查，并确定是否有必要进行检验；

(2) 在根据 (1) 所规定的调查而进行了修理后，或凡是进行任何重要的修理或换新都应视情况进行全面的或局部的附加检验。该检验应确保已有效进行了必要的修理或换新，其材料与工艺均满足要求，且均符合本指南的规定。

1.4.4 检验间隔期

1.4.4.1 年度检验应在证书到期日的每周年的前后各 3 个月内进行。

1.4.4.2 换证检验应在证书到期日前 3 个月内进行。

1.4.5 证书

1.4.5.1 证书签发

支撑结构在初次检验或换证检验完成后，由 CCS 签发《海上固定设施符合证书》。

1.4.5.2 证书有效期

《海上固定设施符合证书》的有效期限不超过 5 年。

1.4.5.3 证书失效

- (1) 年度检验及换证检验未按本指南要求在规定的期限内进行时，证书失效；
- (2) 对本指南所规定的结构、布置或材料，如未经 CCS 许可而进行变更，证书失效；
- (3) 支撑结构发生事故影响支撑结构安全性能时，证书失效。

第 2 章 环境资料与工程地质

第 1 节 一般规定

2.1.1 一般要求

2.1.1.1 支撑结构设计应取得工程现场气象资源、海洋水文、工程地质、海域规划、航道等资料。

2.1.1.2 气象与海洋水文资料应根据工程场区范围内及附近的测风塔、气象站、水文站、海洋站、浮标等观测站获得。风电场工程场区范围内缺乏实测资料时，应根据工程实际情况通过与邻近观测站的观测资料进行分析。对无资料或资料不充分的风电场工程，应根据工程需要及时进行调查和设立观测站进行相关资料内容的观测。

2.1.1.3 支撑结构设计所采用的载荷应符合风电场工程风能资源条件、海洋水文条件和工程地质条件。

第 2 节 气象资料

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 气象基础资料应收集场址范围内风能资源实测数据，并应包括测风情况说明及至少连续一年的风速、风向、温度、气压等观测资料。连续一年测风数据与海洋水文观测数据应为同期数据。

2.2.1.2 场址附近已有的风能资源评估资料可作为辅助资料。

2.2.1.3 气象观测站资料应包括下列内容：

- (1) 观测站近 30 年历年年平均风速、风向、气压、气温等资料；
- (2) 观测站近 30 年历年年最大风速、风向等资料；
- (3) 参证站与场址范围内测风资料同期的逐时风速、风向系列；
- (4) 工程海域以及附近的热带气旋和温带气旋资料。

第 3 节 海洋水文

2.3.1 潮汐资料

2.3.1.1 潮汐资料应包括下列内容：

- (1) 工程海域附近海洋水文观测站资料统计的多年平均高(低)潮位，历史极端高(低)潮位、潮差、涨落潮历时、潮型数和潮汐类型等；
- (2) 场址范围内至少连续一年的逐时潮汐观测资料，以及对应同期的观测站逐时潮位观测资料；
- (3) 观测站不少于 20 年的年最高潮位和最低潮位资料及发生时间，不同重现期的设计水位等资料；
- (4) 对潮间带和潮下带滩涂风电场，应有不同频率乘潮潮位过程线、全年潮位过程线。

2.3.2 波浪资料

2.3.2.1 波浪资料应包括下列内容：

(1) 附近海洋水文观测站多年波浪观测统计得到的工程海域波高、波向、波周期、波型等波浪统计特征资料；

(2) 场址范围内不少于一年的逐时波浪观测资料；

(3) 各方向区间的极端高（低）潮位、设计高（低）潮位条件下的不同重现期的设计波要素。

2.3.3 海流资料

2.3.3.1 海流资料应包括下列内容：

(1) 场址范围内不少于一年的逐时海流观测资料；

(2) 工程海域冬、夏季全潮多垂线同步水文观测资料；

(3) 各方向区间的分层的可能最大流速，以及不同重现期设计流速。

2.3.4 海冰资料

2.3.4.1 海冰资料应包括海冰基本情况、物理力学参数、历年冰况统计资料。

2.3.5 泥沙运移和海床冲淤资料

2.3.5.1 泥沙运移和海床冲淤资料应包括下列内容：

(1) 工程海域全潮水文观测的典型季节和典型潮汐过程条件下的悬沙含量和粒径分析资料，大范围海底底质采样粒度分析等资料；

(2) 工程海域及附近悬沙和底质采样资料等；

(3) 不同历史时期的海岸线变迁以及海底地形冲淤等实测和遥感资料。

2.3.6 水温和泥温资料

2.3.6.1 水温资料宜包括工程海域分层的多年平均水温、多年极端最高（低）水温、累年各月平均和最高（低）水温。

2.3.6.2 泥温资料宜包括海底电缆埋深范围内海床泥温的垂直分布及季节分布等。

2.3.7 盐度和空气盐雾资料

2.3.7.1 海洋水文资料还应包括场址范围内的盐度和空气盐雾等资料。

2.3.8 海生物资料

2.3.8.1 附着于支撑结构上的海生物种类、厚度、密度、分布范围等资料。

第 4 节 工程地质

2.4.1 岩土工程资料

2.4.1.1 岩土工程资料应包括下列内容：

(1) 区域地质构造、地形地貌等基本特征；

(2) 支撑结构范围内工程地质层序、岩土物理力学参数及其工程地质特征；

(3) 场址附近区域已有的不良地质作用、地质灾害的评估和防治方案等成果；

(4) 支撑结构材料的腐蚀性评价、海底岩土场地电阻率、热阻系数等。

2.4.2 地震资料

2.4.2.1 地震资料应包括下列内容：

(1) 工程区域历史上的地震活动情况，以及近期的地震活动和征兆；

- (2) 工程区域地震动峰值加速度及相应的地震基本烈度和特征周期等地震动参数；
- (3) 工程区域海底土体由于地震引起的液化失稳、滑移和震陷的可能性分析等成果；
- (4) 地震安全性评价报告，必要时提供地震时程数据。

第3章 载荷与工况

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 本章规定了支撑结构受到的各种载荷及载荷计算方法、设计中需要考虑的载荷工况及对应工况中的载荷组合原则和方法，以及不同载荷工况下的载荷系数。

3.1.1.2 支撑结构载荷与工况，应考虑支撑结构在位状态及建造、运输安装、拆除过程。

第2节 载 荷

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 支撑结构受到的载荷可分为支撑结构在位阶段和建造、运输安装及拆除阶段。

3.2.1.2 本指南所指的支撑结构在位阶段的载荷，主要是为了保证支撑结构在海上安装完成后在位阶段的结构完整性和功能实现性，这个阶段的载荷主要包括固定载荷、可变载荷、环境载荷及其他载荷。

3.2.1.3 建造、安装及拆除阶段的载荷，主要是为了保证支撑结构在位阶段之前和之后的结构完整性和功能实现性，这个阶段的载荷主要包括固定载荷、可变载荷、环境载荷、施工载荷及其他载荷。

3.2.1.4 在支撑结构设计中，应至少考虑 3.2.2 至 3.2.6 所列出的载荷。

3.2.2 固定载荷

3.2.2.1 固定载荷是指作用在支撑结构上的不变载荷，主要包括：

(1) 支撑结构在空气中的重量，如结构自重（包括结构本体、桩及灌浆填充物）、防腐阳极块重量、附属结构重量以及固定不变的机械电气设备、管道、容器重量等；

(2) 作用在支撑结构上的浮力（当水位一定时，浮力不变）；

(3) 上部风力发电机组及叶片的重量和风机塔筒及附带的附属构件、设备的重量。

3.2.2.2 当支撑结构的构件内部存在永久性的充水空间时，其充水的重量以及由于充水造成的水压力，应视为固定载荷。

3.2.2.3 重量或作用位置变化缓慢的载荷可作为固定载荷处理，如：

(1) 存放在支撑结构上的备品、消耗品、应急给养重量；

(2) 海生物附着和冰的聚积所增加的重量。

3.2.3 可变载荷

3.2.3.1 可变载荷是指在使用期间作用在支撑结构上的，并可能在一种作业形式期间就发生变化或可能从一种作业形式到另一种作业形式时发生变化的载荷，主要包括：

(1) 风电机组在发电工况下，由发电和其相应的控制产生的，并通过塔筒传递于支撑结构上的载荷，如推力载荷、扭转载荷、振动载荷等，本指南统称为风电机组载荷。应注意风力发电机组处于锁定或者空转状态下，由于风力作用于叶片上产生的载荷也应被视作风电机组载荷。该载荷的计算可按照现行国家标准 GB/T 31517.1 《固定式海上风力发电机组 设计要求》的要求进行；

(2) 吊装作业而施加到支撑结构上的载荷，该吊装载荷主要是在使用甲板吊机时作用

在支撑结构上的载荷，应注意在计算这些载荷时需要考虑悬吊载荷和载荷的移动；

(3) 作用在支撑结构上的人员载荷和可能加到支撑结构上或从结构上移走的生活供应设备、救生设备、潜水设备和公用设备的重量。支撑结构的设计应编制甲板载荷布置图及说明书，标明在相应作业工况下，甲板上各部位的最大均布载荷和集中载荷的数值；

(4) 由物料装卸和船只停靠等作业时作用在结构上的载荷。

3.2.4 环境载荷

3.2.4.1 环境载荷是指由于环境条件，如风、波浪、海流、海冰、地震等作用，施加到支撑结构上的载荷，计算环境载荷所涉及到的环境条件详见本指南第 2 章。

3.2.4.2 在计算各类环境载荷时，应按照全方向性的环境条件要素最大值计算环境载荷，除非有所在海域的详细海况调查数据证明环境条件要素存在明显的方向性。

3.2.4.3 作用在支撑结构上的风载荷是指作用在除风电机组和叶片外的结构、塔筒、设备及附属构件上的风力载荷，风载荷的具体计算方法可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》3.4.2 的规定或参考业界其他公认的、现行有效的规范标准，如 NB/T 10105《海上风电场工程 风电机组基础设计规范》等。

3.2.4.4 作用在支撑结构上的波浪载荷计算方法可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》3.4.3 的规定或参考业界其他公认的、现行有效的规范标准，如 NB/T 10105《海上风电场工程 风电机组基础设计规范》等。

3.2.4.5 作用在支撑结构上的海流载荷计算方法可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》3.4.4 的规定或参考业界其他公认的、现行有效的规范标准，如 NB/T 10105《海上风电场工程 风电机组基础设计规范》等。

3.2.4.6 在计算波浪载荷和海流载荷时，应考虑附着于支撑结构上的海生物的影响。

3.2.4.7 作用在支撑结构上的海冰载荷计算方法可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》3.4.5 的规定或参考业界其他公认的、现行有效的规范标准，如 NB/T 10105《海上风电场工程 风电机组基础设计规范》等。

3.2.4.8 作用在支撑结构上的地震载荷计算方法应符合 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》3.4.6 的规定或参考业界其他公认的、现行有效的规范标准，如 NB/T 10105《海上风电场工程 风电机组基础设计规范》等。

3.2.5 施工载荷

3.2.5.1 支撑结构施工载荷包括结构在建造、运输、海上安装及拆除阶段受到的载荷，载荷效应计算方法应符合 CCS《海上风电场设施施工检验指南》的适用要求。

3.2.6 其他载荷

3.2.6.1 作用在支撑结构上的其他载荷主要包括船撞载荷、掉落载荷、海底地基导致的载荷及火灾爆炸载荷等。

3.2.6.2 船撞载荷主要是船舶非正常撞击给支撑结构造成的载荷，船舶正常停靠的载荷应视为可变载荷。船撞载荷的计算可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》第 2 篇第 3 章第 5 节 3.5.4.3 的规定或参考业界公认的、现行有效的规范标准。

3.2.6.3 支撑结构的海底地基反力是由于海底地基的作用施加到支撑结构上的载荷，如在位阶段的海床土体移动造成的载荷、支撑结构附近的自升式风电安装平台插桩作业挤压土体给支撑结构带来的作用力等。这些载荷的影响和计算应进行专门的论证和研究。

第3节 载荷工况

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 支撑结构的载荷工况分为支撑结构在位阶段和建造、安装及拆除阶段。

3.3.1.2 本指南所述支撑结构的载荷工况基于支撑结构的设计状态及相应状态下的设计工况提出，设计工况下的载荷工况以不同的载荷组合和载荷系数的形式提出。设计状态及设计工况根据支撑结构的不同设计阶段载荷状态提出，如在位阶段、建造、安装及拆除阶段等。

3.3.1.3 支撑结构在位阶段的设计工况，主要以风电机组的状态为依据提出，如风机操作/故障模式、电网连接状态等，同时需要考虑与上述风机状态相对应的海况条件。

3.3.1.4 支撑结构建造、安装及拆除阶段的设计工况，主要与不同施工作业下的支撑结构载荷状态及其所关注的结构安全状态有关，并需要考虑在这些设计工况下的海况条件。

3.3.2 设计状态和载荷工况

3.3.2.1 本节给出支撑结构设计状态和设计工况分类，并规定了设计中应至少考虑的载荷工况，详见表 3.3.2.3。对于处于热带风暴活动频繁和影响显著区域的支撑结构，宜考虑其在极端恶劣海况下的生存能力，进行“生存设计工况”下的结构冗余性评估，详见表 3.3.2.4。

3.3.2.2 对于处于冰区海域的支撑结构，设计状态和设计工况可参照业界公认的现行有效规范标准执行，如 NB/T 10912《海冰地区海上风电场工程设计导则》。

3.3.2.3 对于表 3.3.2.3 中规定的设计状态和设计工况：

(1) 在没有特别说明时，有关表 3.3.2.3 中各设计工况（以下简称“DLC”）中的风况、波浪、风浪方向、海流、水位等的详细说明和取值参见现行国家标准 GB/T 31517.1《固定式海上风力发电机组 设计要求》的规定；

(2) 表 3.3.2.3 中的载荷如未特别说明，均为载荷分析中直接计算所得到的载荷，表中的“安全系数”为根据设计工况的系数分类，系数取值参见本指南表 3.4.2.1；

(3) 对于 DLC1.6 工况，本指南考虑风和浪的方向不同是为了保证充分分析该设计工况下不同结构构件的载荷效应和结构强度；

(4) DLC8.4 是为了考虑支撑结构在施工过程，如运输、海上维修中造成的疲劳损伤，由业主或施工方根据具体的施工方案加以考虑和提出。

设计状态和设计工况

表 3.3.2.3

设计状态	设计工况	风况	波浪	风浪方向	海流	水位	其他说明	分析类型	安全系数
1)正常发电	1.2	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS H_s, T_p, v_{hub} 的联合概率分布	不同向, 多向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	——	F	*
	1.3	ETM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
	1.4	ECD $v_{hub} = v_r, v_r \pm 2$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	不同向, 风向 变化	NCM	MSL	——	U	N
	1.5	EWS $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
	1.6	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	不同向, 多向	NCM	NWLR	未设有安全控制和保护系统	U	N
2)正常发电 兼故障	2.1	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	正常的控制系统故障、电网连接中断或第一层控制功能故障	U	N
	2.2	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	非正常的控制系统故障或第二层保护功能故障	U	A
	2.3	EOG $v_{hub} = v_r, v_r \pm 2, v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	包含电网连接中断的外部或内部电气系统故障	U	A
	2.3	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	包含电网连接中断的外部或内部电气系统故障	U	N
	2.4	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	控制系统故障、电气系统故障或电网连接中断故障	F	*
	2.5	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	低电压穿越	U	N
	2.6	NTM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	不同向, 多向	NCM	NWLR	最大海况安全控制和保护系统故障（如设有）	U	A

3) 启机	3.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	风机启动引起的疲劳工况	F	*
	3.2	EOG $v_{hub} = v_{in}, v_r, v_r \pm 2, v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
	3.2	ETM $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
	3.3	EDC $v_{hub} = v_{in}, v_r \pm 2, v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	不同向, 风向 变化	NCM	MSL	——	U	N
4) 正常停机	4.1	NWP $v_{in} < v_{hub} < v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	风机停机引起的疲劳工况	F	*
	4.2	EOG $v_{hub} = v_r \pm 2, v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
5) 紧急停机)	5.1	NTM $v_{hub} = v_r \pm 2, v_{out}$	NSS $H_s = E[H_s v_{hub}]$	同向, 单向	NCM	MSL	——	U	N
6) 停机(静止或空转	6.1	EWM (湍流) $v_{hub} = v_{50}$	ESS $H_s = H_{s,50}$	不同向, 多向	ECM (50 年重现期)	EWLR (50 年重现期)		U	N
	6.2	EWM (湍流) $v_{hub} = v_{50}$	ESS $H_s = H_{s,50}$	不同向, 多向	ECM (50 年重现期)	EWLR (50 年重现期)	电网连接中断	U	A
	6.3	EWM (湍流) $v_{hub} = v_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	不同向, 多向	ECM (1 年 重现期)	NWLR	考虑极限偏航误差 $\pm 20^\circ$	U	N
	6.4	NTM $v_{hub} < v_{in}$ 和 $v_{out} < v_{hub} < 0.7v_{ref}$	NSS H_s, T_p, v_{hub} 的联合概率分布	不同向, 多向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	——	F	*
7) 停机兼故障	7.1	EWM $v_{hub} = v_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	不同向, 多向	ECM (1 年 重现期)	NWLR	至少应考虑刹车、变桨和 偏航系统故障	U	A
	7.2	NTM $v_{hub} < v_{out}$	NSS H_s, T_p, v_{hub} 的联合概率分布	不同向, 多向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	——	F	*

8) 运输、安装、维护维修和拆除	8.1	由施工方或业主自定义工况						U	T
	8.2	EWM $v_{hub} = v_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	同向, 单向	ECM (1 年 重现期)	NWLR	——	U	T
	8.3	NTM $v_{hub} < 0.7v_{ref}$	NSS H_s, T_P, v_{hub} 的联合概率分布	不同向, 多向	无流	NWLR 或 $\geq MSL$	在安装期间未连接电网	F	*
	8.4	由施工方或业主自定义工况						F	*

备注:

NTM: 正常湍流模型

ETM: 极限湍流模型

ECD: 方向变化的极限相干阵风

EWS: 极限风切变

EOG: 极限阵风

NWP: 正常风廓线模型

EDC: 极限风向变化

EWM: 极限风速模型

NSS: 正常海况

SSS: 恶劣海况

ESS: 极限海况

NCM: 正常流速模型

ECM: 极限流速模型

MSL: 平均水位

NWLR: 正常水位范围

EWLR: 极限水位范围

U: 极限强度校核

F: 疲劳强度校核

N: 正常

A: 非正常

T: 建造、运输安装及拆除

*: 疲劳安全系数 (详见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》)

v_{ref} : 参考风速, 系指 50 年重现期的轮毂高度处 10min 平均风速

v_1 : 1 年重现期的轮毂高度处 10min 平均风速

v_{50} : 50 年重现期的轮毂高度处 10min 平均风速

v_{hub} : 轮毂高度处的 10min 平均风速

v_{in} : 切入风速

v_{out} : 切出风速

v_r : 额定风速

H_s : 特征波高

$H_{s,SSS}$: 恶劣海况下的特征波高

$H_{s,1}$: 1 年重现期的特征波高

$H_{s,50}$: 50 年重现期的特征波高

$E[H_s|v_{hub}]$: 在风速 v_{hub} 下的特征波高的条件期望

T_P : 谱峰周期

3.3.2.4 对于热带风暴（台风）活动显著的海域，如中国南海、东海南部等，宜按照表 3.3.2.4 所列出的生存设计工况对支撑结构进行结构冗余度评估。

生存设计工况							表 3.3.2.4	
风机工况	风况	波浪	风浪方向	海流	水位	其他说明	分析类型	安全系数
停机 （静止或空转）	EWM $v_{hub} = v_{100}$	ESS $H_s = H_{s,100}$	不同向，多向	ECM （100年重现期）	EWLR （100年重现期）	叶片完整	U	1.0
	EWM $v_{hub} = v_{100}$	ESS $H_s = H_{s,100}$	不同向，多向	ECM （100年重现期）	EWLR （100年重现期）	叶片损坏	U	1.0
	EWM $v_{hub} = v_{100}$	ESS $H_s = H_{s,100}$	不同向，多向	ECM （100年重现期）	EWLR （100年重现期）	电网连接中断	U	1.0

注：

（1）上述表 3.3.2.4 中的工况主要针对台风区域下的支撑结构冗余度评估考虑，环境条件的重现期选择 100 年一遇海况条件，业主可根据风电场项目情况提高环境条件的重现期，但建议不低于 100 年一遇；

（2）表 3.3.2.4 中的风速取值为轮毂高度处的 10 分钟持续风速（可取平均值），在计算作用到塔筒及支撑结构上的风载荷时，应根据风的空间分布模型进行风速转化；

（3）在缺乏风电场海域详细的风、海浪、海流方向性联合分布数据时，宜采用风-海浪-海流同向情况计算作用在支撑结构上的环境载荷。

第 4 节 分项系数

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 本节内容针对采用载荷抗力系数法（LRFD）进行设计的支撑结构。对于采用工作应力设计法（WSD）进行设计的支撑结构，载荷组合系数可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》选取，也可按照业界公认的现行有效规范标准选取，如 SY/T 10030《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 工作应力设计法》。

3.4.2 结构强度分析的载荷分项系数

3.4.2.1 对按照表 3.3.2.3 进行设计的支撑结构，在进行结构强度分析（表 3.3.2.3 中分析类型标注为“U”的设计工况）时，固定载荷在与环境载荷进行组合时的分项载荷系数取 1.0，当固定载荷、可变载荷和其他载荷被认为对结构的载荷效应产生有利影响时，其分项载荷系数取 0.9。环境载荷分项系数见表 3.4.2.1。

环境载荷分项系数			表 3.4.2.1
正常（N）	非正常（A）	建造、运输安装及拆除（T）	
1.35	1.1	1.5	

注：上述表 3.4.2.1 中的正常（N）、不正常（A）、建造、运输安装及拆除（T）具体含义参见表 3.3.2.3。

3.4.2.2 对按照表 3.3.2.4 进行结构冗余度评估的支撑结构，环境载荷分项系数可取 1.0。

3.4.3 结构疲劳分析的载荷分项系数

3.4.3.1 对按照表 3.3.2.3 进行设计的支撑结构，在进行结构疲劳分析（表 3.3.2.3 中分析类型标注为“F”的设计工况）时，所有载荷工况的载荷系数可取 1.0。

3.4.4 材料分项系数

3.4.4.1 结构强度校核准则可参照国内外普遍认可的技术标准的规定进行，材料分项系数应按照所用规范标准的规定，在缺少具体规定的情况下，可取 1.05。

3.4.4.2 当采用 LRFD 方法进行疲劳校核时，材料分项系数可取 1.0。

第 4 章 结 构

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 结构设计要遵循传力路径明确，构件综合利用率高的原则。

4.1.1.2 飞溅区内不宜设置水平构件，冰作用区内尽量不设置水平构件和斜撑。

第 2 节 结构用钢

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 结构用钢的化学成份、力学性能、制造和试验应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇对船体结构用钢及焊接结构用高强度钢的规定。结构用锻钢件及铸钢件也应符合 CCS《材料与焊接规范》的有关规定。如拟采用符合其他标准的钢材时，应提交其化学成分，力学性能和热处理规程等资料，并经 CCS 在适当考虑其屈服强度与抗拉强度的比值、拟使用部位及设计温度基础上，按所采用的标准或技术规格审查和检验合格后方可使用。

4.2.1.2 所选用的钢材应满足预计的使用条件，具有良好的加工性能和可焊性。

4.2.1.3 对于使用在 0℃ 以下结冰环境条件下的钢材，应通过适宜的韧性试验或已有的使用经验，证明所选用的钢材对预计的环境条件具有良好的断裂韧性。

4.2.2 最低设计温度

4.2.2.1 钢材的最低设计温度系指构件钢材等级选择时的基准温度，并假定等于日平均气温年最低值在设计期限内（至少 20 年）的平均值，该值应根据预期作业海域的气象资料确定。

4.2.2.2 水下结构钢材的设计温度通常可取 0℃。

4.2.3 结构用钢材选择

4.2.3.1 确定结构所采用的钢材时，除应考虑钢材的化学成分和力学性能外，尚应考虑各部位结构所承受的应力状态、构件的厚度、设计环境温度以及钢材的断裂韧性、疲劳性能和抗层状撕裂的能力。

4.2.3.2 结构用钢应按照构件类别、构件厚度、设计温度和钢材的成型性、可焊性及其力学性能等因素选取合适的钢材等级。

4.2.3.3 对于承受高拘束，包括不利的几何形状、高屈服强度或厚截面、板厚方向的收缩变形和板厚方向的连续拉伸载荷的关键节点，应采用厚度方向（即 Z 方向）具有良好性能的钢材。

第 3 节 防 腐

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 所有钢结构的内外表面以及上部设施等均应有适当的防腐蚀措施。可采用涂（镀）层保护、阴极保护系统或其他任何认可的防腐系统。所采用的防腐系统应适合于结构所处位置和用途。

4.3.1.2 钢结构在海洋中所处的腐蚀环境分为：大气区、飞溅区和全浸区。应根据不同海洋环境区域的特点、使用年限、施工、维护和更新的可能性以及技术经济效果等因素采取相应的防腐蚀措施。

4.3.1.3 钢结构外表面的防腐蚀

(1) 大气区的钢结构，应采用涂层防腐蚀。对涂装有困难的小型复杂构件，或有特殊要求的构件，可采用镀层防腐蚀；

(2) 飞溅区中钢结构，应采用高效长寿命防腐涂料，且宜考虑一定的腐蚀增量。结构腐蚀增量应根据设计使用年限，钢材年平均腐蚀量以及防腐系统的保护效率来确定。在无法确定上述参数时，飞溅区结构的腐蚀增量可按照每年 0.3 mm 计算；

(3) 全浸区的平台结构应采用阴极保护或阴极保护与涂层联合防腐蚀措施。

4.3.1.4 钢结构内表面的防腐蚀

(1) 暴露于大气中的结构的内表面，应采用涂层保护；

(2) 与海水接触的结构的内表面，应采用涂层保护、阴极保护或两者联合保护。对于密闭的充水内腔或水流受到严格限制的内腔，不宜采用阴极保护系统防腐；

(3) 与海水和大气没有接触的密闭内腔可不考虑防腐，但装配时，内腔应保持清洁和干燥。

4.3.1.5 对于结冰海域，在冰磨蚀区应该考虑合适的冰磨蚀余量，一般可按照每年 0.1mm 计算。

4.3.2 涂层与镀层保护

4.3.2.1 所有采用涂层保护的钢结构，其表面在涂装前应进行抛丸、喷丸或其他磨料除锈处理，表面处理质量应满足防腐设计采用的标准并符合涂料产品说明书的要求。

4.3.2.2 支撑结构的涂层一般由底漆、中间层漆和面漆组成。各层涂料之间应能相互配套，涂料应符合防腐设计规格书的要求。

4.3.2.3 支撑结构用涂料的选择，应符合下列规定：

(1) 保养底漆应能在支撑结构建造期间保护钢材免于锈蚀，同时底漆漆膜应具有良好的耐磨、耐冲击性能，与基底材料之间具有良好的附着力；

(2) 暴露于强烈日光照射的涂层，应具有耐老化的性能；

(3) 全浸区结构如采用阴极和涂层联合保护，所用的涂层应能与阴极保护系统有良好的匹配性；

(4) 支撑结构用涂料应能用常规的喷涂设备施工。

4.3.2.4 用于保护支撑结构的镀层，可以为阴极性镀层或阳极性镀层。镀前表面处理、镀覆中和镀后处理应符合有关工艺技术条件的规定。镀层质量应按国家标准或防腐设计所采用的标准进行检验。

4.3.3 阴极保护

4.3.3.1 支撑结构的阴极保护可采用牺牲阳极法或外加电流法，或两种方法联合保护。

4.3.3.2 阴极保护可以和涂层联合使用，以降低保护电流密度和改善电流分布状况。

4.3.3.3 支撑结构阴极保护系统的设计，应考虑下列因素：

(1) 支撑结构的几何形状；

(2) 相邻结构的情况；

(3) 修理和维护的可能；

(4) 使用年限；

(5) 涂层状况。

4.3.3.4 牺牲阳极阴极保护

(1) 牺牲阳极材料可为锌、铝和镁基合金，阳极的制造应符合防腐设计所采用标准的要求；

(2) 用于支撑结构阴极保护的牺牲阳极，应按防腐设计所采用的标准进行检验和性能试验；

(3) 牺牲阳极几何形状、尺寸和质量的选取，应确保阳极发生电流和使用年限达到设计要求；

(4) 应通过计算表明牺牲阳极系统在安装初期及当阳极即将耗尽时，均有能力极化结构。

4.3.3.5 外加电流阴极保护

(1) 外加电流阴极保护系统的电气设备（如电源、测量装置、电缆等）的设计、制造、试验和安装应符合通用标准的规定，所有用于危险区域内的电气设备、电缆等应经发证检验机构同意；

(2) 外加电流阴极保护的辅助阳极材料可为铅银合金、铅银铂复合材料、高硅铸铁和镀铂钛或采用其他材料。辅助阳极的数量、几何形状和尺寸应根据支撑结构的形状及电流分散能力确定，应确保阳极工作电流密度不大于该阳极材料的额定值；

(3) 当需要涂覆阳极屏蔽时，阳极屏蔽层应具有良好的绝缘性、耐阴极电位性能、耐海水和其他有害物质侵蚀的性能；

(4) 阳极屏蔽层的涂覆尺寸应根据阳极输出电流密度、水的电阻率、结构几何形状以及其他阳极的位置等因素确定；

(5) 外加电流阴极保护系统中，用来向控制装置提供信号的参比电极，可为银/氯化银 (Ag/AgCl) 电极和锌 (Zn) 电极。参比电极应根据结构形状和电位分布情况合理布局。

第 4 节 钢结构设计

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 海上固定式风机支撑结构设计可按照下列设计方法进行：

(1) 工作应力设计法；

(2) 载荷抗力系数法。

4.4.1.2 海上固定式风机支撑结构设计寿命不应低于海上风力发电机组的设计寿命。

4.4.1.3 风机平台底高程可按照以下公式确定：

$$T = H + \frac{2}{3}H_m + \Delta$$

式中：T——风机平台底高程（m）；

H——设计重现期条件下的极端高水位（m）；

H_m ——设计重现期条件下的最大设计波高（m）；

Δ ——间隙，不小于 0.5（m）。

4.4.2 结构分析

4.4.2.1 海上固定式风机支撑结构分析，一般应包括结构强度分析和疲劳分析。

4.4.2.2 结构分析方法一般应基于线弹性理论，若采用塑性方法分析时，应在设计文件中予以明确，并得到 CCS 的认可。

4.4.2.3 在强度分析中，应特别注意风机塔架与支撑结构连接部位的结构高应力区域。

4.4.2.4 在疲劳分析中，应充分考虑风力发电机组在各工况下的疲劳载荷的时域特性及支撑结构所受波浪载荷的频域特性。

4.4.2.5 包含支撑结构、塔架和风电机组在内的系统固有频率，宜避开风电机组运行时由转子转动产生的激励频率范围；风电机组设备厂家另有规定时，应按风电机组设备厂家的规定执行。

4.4.3 强度校核

4.4.3.1 对于按照工作应力设计法（WSD）进行设计的支撑结构，结构校核相关要求可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》第 2 篇第 4 章。

4.4.3.2 对于按照载荷抗力系数法（LRFD）进行设计的支撑结构，结构校核相关要求可参照 ISO 19902《Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore structures》第 7 章及其他相关章节。

4.4.4 疲劳

4.5.1.1 疲劳校核的目的是确保支撑结构在营运期间具有足够的疲劳寿命。

4.5.1.2 除本指南另有规定之外，支撑结构的疲劳强度校核应按照 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》进行。

4.4.5 地震

4.4.5.1 在地震设防烈度 7 度及以下的地区，应采用行业通用的地震响应分析方法进行设计。

第 5 节 混凝土结构设计

4.5.1 一般要求

4.5.1.1 海上固定式风机支撑结构用混凝土应符合 CCS《材料与焊接规范》第 2 篇第 6 章要求。

4.5.1.2 对混凝土结构，除了考虑和钢结构相同的载荷外，还须考虑以下载荷：

- （1）温度载荷（包括施工过程中水泥水化热的温度）；
- （2）基础底部的不均匀沉降和海底不平引起的载荷；
- （3）混凝土的徐变和收缩引起的载荷；
- （4）预应力钢筋引起的变形产生的载荷。

4.5.1.3 混凝土设计应符合 GB50010《混凝土结构设计规范》、NB/T10105《海上风电场工程风电机组基础设计规范》或其他经 CCS 认可的规范。

第5章 基础

第1节 一般规定

5.1.1 一般要求

5.1.1.1 根据载荷作用效应的不同，应对风电机组基础结构进行静力分析、动力分析和疲劳分析。

5.1.1.2 本章适用于桩基础、重力式基础和筒型基础的承载力设计。

5.1.1.3 对于复杂环境或地质条件，可建立三维数值计算模型对基础和周围介质间的相互作用进行分析。

5.1.2 基础的安全性系数

5.1.2.1 采用载荷抗力系数法(LRFD)设计的基础，载荷分项系数按照表 3.4.2.1 选取；采用工作应力设计法(WSD)设计的基础，载荷组合系数可参照 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》选取；相应的抗力系数/安全系数可参照表 5.1.2.1。

抗力系数 γ_m /安全系数 K

表 5.1.2.1

基础类型验证		γ_m (LRFD)	K (WSD)
桩基础	承载力	1.25	2.0
重力式基础	承载力	1.25	2.0
	抗滑移	1.35	1.5
	抗倾覆	1.35	1.5
筒型基础	承载力	1.25	2.0
	抗滑移	1.35	1.5
	抗倾覆	1.35	1.5

第2节 桩基础

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 本节的桩基础适用于打入桩、灌注桩和嵌岩桩。采用单桩基础时宜采用钢管桩。

5.2.1.2 为确保支撑结构在工作环境条件下能正常工作，在极端环境条件下具有一定的安全度，应对桩基础的强度和稳定性以及桩基础承载力进行分析计算。

5.2.1.3 桩基础应能承受静力的、循环的和瞬时的载荷而支撑结构不致产生过大的变形或振动。应特别注意循环载荷和瞬时载荷对桩周岩土强度及对桩基础结构响应的影响。

5.2.1.4 打入桩应进行桩可打入性分析。

5.2.1.5 嵌岩桩基础、灌注桩基础应进行施工状况下的桩基础稳定计算。

5.2.1.6 打入桩和灌注桩宜选择中密或密实砂层、硬粘性土层、碎石类土、风化岩层等土层作为桩端持力层。

5.2.2 桩体设计

5.2.2.1 支撑结构的桩体设计，除按本节规定外，尚应符合 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》第2篇第5、6、8、9、10章中有关强度、构造、稳定性、材料、焊接、防腐等

的适用规定。

5.2.2.2 钢管桩壁厚是由桩体强度和稳定性要求与腐蚀增量所决定，同时尚应考虑施工方面的要求。

5.2.2.3 确定桩体的分段长度时，应考虑起吊能力、打桩工艺、打桩时桩体强度、刚度和稳定性、现场焊接条件以及土质情况等因素。

5.2.3 桩基础轴向承载力

5.2.3.1 桩基础轴向承载力计算应符合下式要求：

$$N_d \leq Q_d$$

式中： N_d ——桩顶轴向荷载效应设计值（kN）；

Q_d ——单桩轴向承载力设计值（kN）。

5.2.3.2 桩基础承载力宜根据工程地质勘察报告、静载荷试验综合确定。

5.2.3.3 当未进行静载荷试验时，单桩轴向极限承载力设计值宜按下列公式确定：

$$Q_d = \frac{Q_k}{\gamma_m}$$

式中： Q_d ——单桩轴向承载力设计值（kN）；

Q_k ——单桩轴向极限承载力标准值（kN）；

γ_m ——单桩轴向承载力抗力系数，可按表 5.1.2.1 选取。

5.2.3.4 未做静载荷试桩的工程，可根据具体情况采用承载力经验参数法或静力触探（以下简称“CPT”）等方法确定单桩轴向极限承载力。

5.2.3.5 打入桩轴向抗压承载力标准值宜按下列公式确定：

$$Q_k = f(z)A_s + q_R A_R$$

式中： $f(z)$ ——单桩极限侧摩阻力标准值（kPa）；

A_s ——桩侧表面积（m²）；

q_R ——单桩极限桩端阻力标准值（kPa）；

A_R ——实心桩计算时为桩身截面面积（m²）；钢管桩按开口桩计算时为桩端环形面积（m²），按闭口桩计算时取桩端环形截面与土塞截面面积之和；

z ——计算点深度（m）。

5.2.3.6 粘性土中，在桩长上任意一点的侧摩阻力可按下列公式确定：

$$f(z) = a_1 s_u$$

$$a_1 = \begin{cases} 0.5 \left(\frac{s_u}{p'_0(z)} \right)^{-0.5}, & \frac{s_u}{p'_0(z)} \leq 1 \\ 0.5 \left(\frac{s_u}{p'_0(z)} \right)^{-0.25}, & \frac{s_u}{p'_0(z)} > 1 \end{cases}$$

式中： a_1 ——无量纲系数，不大于 1.0；

s_u ——计算点地基土的不排水抗剪强度（kPa）；

p'_0 ——计算点的有效上覆土压力（kPa）。

(1) 对端部支撑在粘土体中的单桩，单位桩端极限端阻力标准值 q_R 可按下列公式确定：

$$q_R = 9s_u$$

(2) 侧摩阻力作用于桩内壁和桩外壁上，单桩总体轴向抗力是桩外侧摩阻力、桩内侧摩阻力和桩环形端面积上端阻力的总和，或桩外侧摩阻力、桩环形端面积上端阻力和土塞支撑力的总和，应取两者较小值。

5.2.3.7 在粘土中，对端部支撑在粘性土中且桩持力层深度大于 5D 时，只考虑距桩端 5D 长度范围内的内侧摩阻力，打入桩轴向抗压承载力标准值宜按下列公式确定：

$$Q_k = Q_f + Q_p = f_p(z)A_{sp} + f_o(z)A_{so} + q_R A_c$$

式中： $f_p(z)$ ——单桩内侧极限侧摩阻力标准值（kPa）， $f_p(z) = a_p s_u$ ；

$f_o(z)$ ——单桩外侧极限侧摩阻力标准值（kPa）， $f_o(z) = a s_u$ ；

A_{sp} ——桩内侧表面积 (m²) ;
 A_{so} ——桩外侧表面积 (m²) ;
 A_c ——单桩环形端面积 (m²) ;
 z ——计算点深度 (m) ;
 a_p ——无量纲系数, $a_p = 0.09 \tan\left(\frac{1.48z'}{5D}\right) * \left(\frac{s_{ue}}{s_u}\right)$, 大于 1.0 时取 1.0;
 s_{ue} ——桩端部对应地基土的不排水抗剪强度 (kPa) ;
 z' ——桩内侧摩阻力计算点位置距桩端处距离 (m) 。

5.2.3.8 无粘性土中, 在桩长上任意一点的侧摩阻力宜按下列公式确定:

$$f(z) = \beta_1 p'_0(z)$$

式中: β_1 ——桩土界面摩擦系数; 按照表 5.2.3.8 取值。

$p'_0(z)$ ——计算点的有效上覆土压力 (kPa)

(1) 对端部支撑在非粘性土体中单桩, 单位桩端极限端阻力标准值 q_R 宜按下列公式确定:

$$q_R = p'_{0R} N_q$$

式中: p'_{0R} ——桩端处的有效上覆土压力 (kPa) ;

N_q ——无量纲承载力系数, 按照表 5.2.3.8 取值。

(2) 侧摩阻力作用于桩内壁和桩外壁上, 单桩总体轴向抗力是桩外侧摩阻力、桩内侧摩阻力和桩环形端面积上端阻力的总和, 或桩外侧摩阻力、桩环形端面积上端阻力和土塞支撑力的总和, 应取两者较小值。

无粘性土设计参数

表 5.2.3.8

相对密度	土层类型	摩擦系数 β_1	摩擦力限值 $f_{\max}$ (kPa)	端承系数 N_q	端阻力限值 $q_{\max}$ (MPa)
非常松散 松散 松散 中密 密实	砂 砂 砂-粉土 粉土 粉土	不适用	不适用	不适用	不适用
中密	砂-粉土	0.29	67	12	3
中密 密实	砂 砂-粉土	0.37	81	20	5
密实 非常密实	砂 砂-粉土	0.46	96	40	10
非常密实	砂	0.56	115	50	12
注: 本表中列出的参数仅供参考。如果有详细的信息, 如 CPT 试验记录、高质量样品的强度测试、模型测试或打桩性能, 使用其他值也是合理的。					
相对密度百分比描述的定义如下: 非常松散, 0-15; 松散, 15-35; 中密, 35-65; 密实, 65-85; 非常密实, 85-100。 砂质粉土包括含有大量砂和粉土的土体。强度值一般随砂粒分数的增加而增加, 随粉粒分数的增加而降低。					

5.2.3.9 在无粘性土中, 对端部支撑在无粘性土中且桩持力层深度大于 $2D$ 时, 只考虑距桩端 $2D$ 长度范围内的内侧摩阻力, 打入桩轴向抗压承载力标准值宜按下列公式确定:

$$Q_k = Q_f + Q_p = f_p(z) A_{sp} + f_o(z) A_{so} + q_R A_c$$

式中: $f_p(z)$ ——单桩内侧极限侧摩阻力标准值 (kPa), $f_p(z) = \frac{100 p'_0(z)}{1 - 0.88 \frac{z'}{2D}} e^{3.2z'}$;

$f_o(z)$ ——单桩外侧极限侧摩阻力标准值 (kPa), $f_o(z) = \beta p'_0(z)$;

$p'_0(z)$ ——计算点的有效上覆土压力 (kPa) ;

z' ——桩内侧摩阻力计算点位置距桩端处距离 (m) 。

5.2.3.10 岩层中的灌注桩的侧摩阻力和端阻力

(1) 岩层中位于冲射孔或者钻孔中的灌注桩的单位侧摩阻力, 不应大于岩石或者水泥浆的三轴抗剪强度, 并且通常要比基于安装引起的剪切强度降低的三轴抗剪强度要低的多;

(2) 岩层中的桩的端部承载力应根据岩石的三轴抗剪强度和适当的承载力系数来确定，并不应超过 9.5MPa，承载力系数应以充分的岩石工程实验及实践为依据。

5.2.3.11 桩的轴向抗拔力

桩的极限轴向抗拔力不应大于桩的总侧摩阻力，在确定桩的极限抗拔力时，应考虑包括静水浮力和土塞重量内的桩的有效重量，侧摩阻力计算与 5.2.3.6 中的规定相同。

5.2.3.12 桩轴向承载力设计值也可采用有限元方法进行计算，具体要求如下：

(1) 采用数值模拟方法时，桩基础和土体宜采用实体单元模拟，土体本构可采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则或 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型，有经验时也可采用剑桥模型、邓肯-张模型等本构模型，外载荷宜采用施加载荷的方式模拟；

(2) 宜先检验轴对称模型和三维模型的计算结果，较为吻合的情况下可以采用轴对称模型提高计算效率；

(3) 应在桩基础与土体界面设置接触来模拟桩土相互作用；

(4) 网格设置对有限元结果影响较大，需要进行网格敏感性分析计算，在缺少计算经验的情况下，土体和桩轴向网格尺寸不宜大于 1m，土体径向最小网格尺寸不宜大于 0.05 倍桩外径；模型竖向地基边界不宜小于桩入土深度与 5 倍桩外径之和，模型水平边界不宜小于 20 倍桩外径。模型底部应施加三个方向约束，周围应施加法向约束；

(5) 应根据载荷情况、地基排水条件等取相应的土体强度指标；应谨慎选取计算弹性模量，如无其他资料，可取 1~5 倍压缩模量。

5.2.4 桩的轴向承载性能

5.2.4.1 载荷-变形特性

桩的轴向变形应处在可接受的使用范围内，并与结构应力和位移相协调。桩的轴向载荷-变形特性可采用桩的轴向桩-土弹簧模拟，并结合桩侧和桩端土体反力进行分析。

5.2.4.2 轴向 t - z 曲线

(1) 大量的经验和理论方法可以确定局部桩侧摩阻力和桩位关系 (t - z)，可以采用 Kraft (1981) 等人所描述的理论 t - z 曲线；粘土中基于模型试验和原型桩静载试验的 t - z 曲线可遵循 Coyle 和 Reese (1966) 的方法；在没有明确的准则时，对于非钙质土宜采用下列曲线，见表 5.2.4.2；

桩基础轴向 t - z 曲线

表 5.2.4.2

z/z_{peak}	t/t_{max}	
	粘土	砂土
0.16	0.30	0.30
0.31	0.50	0.50
0.57	0.75	0.75
0.80	0.90	0.90
1.0	1.00	1.00
2.0	0.7-0.9	1
∞	0.7-0.9	1

z : 单桩局部轴向位移;
 D : 单桩外径;
 z_{peak} : 为单桩局部最大侧摩阻力激发时对应的位移,在常规设计目的,建议 z_{peak} 为桩外径的 1%(即 $z_{peak}/D = 0.01$)。但是该值存在显著的不确定性,在轴向桩刚度对设计至关重要的情况下, z_{peak} 可以考虑为桩直径的 0.25 %至 2.0 %;
 t : 激发的单位桩-土侧摩阻力;
 t_{max} : 单位侧摩阻力极限值,按照 5.2.3.6 中的规定计算。

(2) 推荐的 t - z 曲线，见图 5.2.4.2；

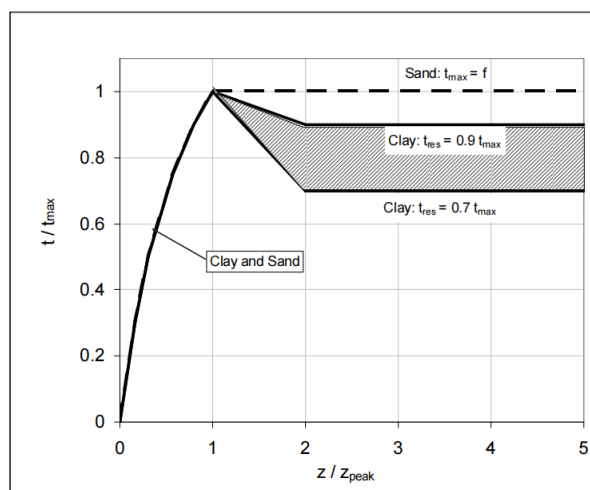


图 5.2.4.2 桩 t-z 曲线

(3) 桩的残余摩擦力 t_{res} 与应力历史、桩安装方法、载荷加载顺序等因素相关，粘土的 t_{res}/t 最大值的范围宜为 0.70 至 0.90。

5.2.4.3 轴向 Q-z 曲线

(1) 桩端承载力应按照 5.2.3.6 中的规定确定。但桩端极限承载力需要相对较大的桩端位移激发。在砂土和粘土中充分激发桩端阻力，桩端部位移可达到桩直径的 10%。在缺乏更明确的标准的情况下，图 5.2.4.3 中所示的曲线可用于砂土和粘土；

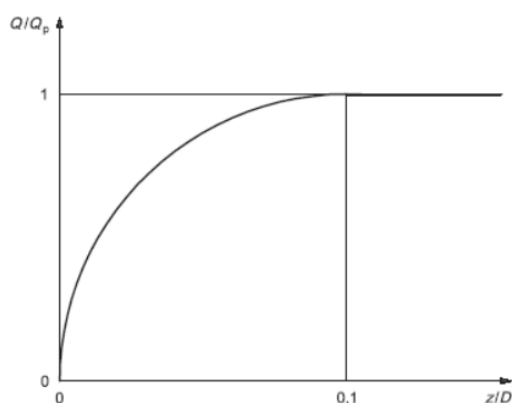


图 5.2.4.3 桩端 Q-z 曲线

(2) 图中 z 为桩端位移； z_{peak} 为桩端阻力激发到最大值时对应的桩端位移； Q 为激发的桩端阻力； Q_p 为桩端阻力极限值，按照 5.2.3.6 中的规定确定。在没有明确的规定下，可参照表 5.2.4.3 确定桩端 Q-z 曲线。

桩端 Q-z 曲线

表 5.2.4.3

z/D	Q/Q_p
0	0
0.002	0.25
0.013	0.50
0.042	0.75
0.073	0.90
0.100	1.00
∞	1.00

5.2.5 桩基础水平承载力及变形计算

5.2.5.1 桩基础应能够承受侧向的静载荷和循环载荷。桩基础设计过程中应分析沉桩作业中和沉桩完成后因冲刷和土受扰动对土抗力产生的可能影响。

5.2.5.2 承受水平力作用的单桩需区分柔性长桩、刚柔性桩、刚性桩，划分标准可按表 5.2.5.2 确定。

柔性长桩、刚柔性桩、刚性桩划分标准

表 5.2.5.2

柔性长桩	刚柔性桩	刚性桩
$L \geq 4T$	$4T > L \geq 2.5T$	$L < 2.5T$

桩的相对刚度 T ，宜按下列公式确定：

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{m b_0}}$$

式中： E_p ——桩材料弹性模量（kN/m²）；

I_p ——桩截面惯性矩（m⁴）；

m ——桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数（kN/m⁴）；

b_0 ——桩的换算宽度（m）。

桩的换算宽度宜按下列公式确定：

$$d \geq 1.0m \quad b_0 = k_f(d + 1)$$

$$d < 1.0m \quad b_0 = k_f(1.5d + 0.5)$$

式中： d ——桩径或垂直于水平外力作用方向桩的宽度（m）；

k_f ——桩的形状换算系数，圆桩或管桩取 0.9，方桩或矩形桩取 1.0。

5.2.5.3 单桩水平向承载性能应根据水平静载荷试验或采用 p - y 曲线法确定，采用有限元计算时宜满足 5.2.5.8 中的规定。

5.2.5.4 粘性土中，柔性长桩 p - y 曲线具体应满足 SY/T10030《海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法工作应力设计法》中关于侧向载荷桩的土反力的规定。刚柔性桩或刚性桩 p - y 曲线可按下列公式确定：

$$p = \frac{p_u y}{BD + y}$$

$$B = 0.007 \left(\frac{L}{D} \right)^{0.656}$$

式中： B ——与桩径相关的无量纲参数；

p_u ——单桩侧向极限土抗力（kN/m）， $p_u = AN_p s_u D$ ；

p ——单桩侧向土抗力（kN/m）；

y ——单桩局部水平位移（m）；

D ——单桩外径（m）；

A ——无量纲系数，静载荷取 1.0，循环载荷取 0.72；

s_u ——土体的不排水抗剪强度（kPa）；

N_p ——侧向承载力系数， $N_p = N_{p,max} - \beta_2 e^{-\zeta z/D}$ ；

β_2 ——与桩径相关的无量纲系数， $\beta_2 = \frac{9.79D}{0.1\gamma' + D}$ ；

ζ ——与桩径相关的无量纲系数， $\zeta = 0.025 \frac{D}{D_{ref}} + 0.5k$ ，均质土 $\zeta = 0.025 \frac{D}{D_{ref}} +$

0.5；

$N_{p,max}$ ——任意桩径时最大的承载力因子， $N_{p,max} = (0.16 \ln D + 1) N_{p,max}^{ref}$ ；

$N_{p,max}^{ref}$ ——最大承载力因子参考值，取 8.06；

z ——计算点深度（m）；

γ' ——土体有效容重 (kN/m³) ;

k ——为土体不排水抗剪强度随深度变化梯度 (kPa/m) ;

D_{ref} ——参考桩径, 取 1m。

5.2.5.5 砂土中, 柔性长桩 p - y 曲线具体应满足 SY/T10030《海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法工作应力设计法》中关于侧向载荷桩的土反力规定。刚柔性桩或刚性桩 p - y 曲线可表示为:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}}$$

$$k_{ini} = k_s z_{ref} \left(\frac{D}{D_{ref}} \right)^{0.55} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{0.6}$$

式中: p_u ——侧向极限土抗力 (kN/m), 参考 SY/T10030《海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法工作应力设计法》中关于砂土极限土抗力的计算方法;

k_{ini} ——土体初始刚度 (kN/m³) ;

z_{ref} ——计算参考深度, 取 2.5m;

k_s ——地基模量常数 (MN/m³), 按照表 5.2.5.5 选取。

地基模量常数 k_s

表 5.2.5.5

k_s		
松散	中密	密实
1.1-3.3	3.3-11	11-23.4

5.2.5.6 当分析刚柔性桩或刚性桩时, 在 p - y 曲线的基础上需要考虑桩端转动引起的土体抗力对承载性能的贡献。桩端需设置 M - θ (力矩-转角) 桩-土弹簧, M - θ 宜根据转动引起的桩端土抗力进行计算, 在没有明确的试验测试数据条件下, 单桩桩端部土体对桩端中心产生的力矩 M 与桩端相对于水平面产生的转角 θ 的关系可参照表 5.2.5.6。

桩端 M - θ 曲线

表 5.2.5.6

M/M_{max}	θ
0.25	0.01
0.5	0.04
0.75	0.14
0.9	0.25
1	0.34

注: M_{max} ——单桩桩端部土体对桩端中心产生的最大力矩 (kN m), $M_{max} = \frac{q_{max} D^3}{12}$;

q_{max} ——单位轴向桩端阻力极限值 (kPa), 可按 5.2.3.6 中的相关规定确定。

5.2.5.7 承受水平力或力矩作用的刚柔性桩或刚性桩, 还应对桩身结构和变位进行计算, 且应对桩侧土体应力进行计算, 计算应按下列公式计算:

$$\sigma_{h/3} \leq \frac{4}{\cos \varphi} \left(\frac{\gamma}{3} h \tan \varphi + c \right) \eta$$

$$\sigma_h \leq \frac{4}{\cos \varphi} (\gamma h \tan \varphi + c) \eta$$

$$\eta = 1 - 0.8 \frac{M_g}{M}$$

式中: $\sigma_{h/3}$ 、 σ_h ; ——泥面下 $h/3$ 处、 h 处土的水平压应力 (kPa) ;

φ ——土的内摩擦角 (°) ;

γ ——土的容重 (kN/m³), 对透水材料, 应包括水的浮力作用;

h ——桩的入土深度 (m) ;

c ——土的粘聚力 (kPa) ;

η ——总载荷中固定载荷所占比例的影响系数;

M_g ——恒载对桩端中心产生的力矩 (kN m) ;

M ——总载荷对桩端产生的力矩 (kN m) 。

5.2.5.8 单桩水平受力也可采用有限元方法进行分析, 具体要求如下:

(1) 采用数值模拟方法时, 桩基础和土体宜采用实体单元模拟, 桩基础采用线弹性本

构, 土体本构可采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则或 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型, 有经验时也可采用随动硬化模型、剑桥模型、邓肯-张模型等本构模型;

(2) 网格设置对有限元结果影响较大, 需要进行网格敏感性分析计算, 在缺少计算经验的情况下, 土体和桩轴向网格尺寸不宜大于 1m, 土体径向最小网格尺寸不宜大于 0.1 倍桩外径; 模型竖向地基边界不宜小于桩入土深度与 5 倍桩外径之和, 模型水平边界不宜小于 20 倍桩外径。模型底部应施加三个方向约束, 周围应施加法向约束;

(3) 应在桩基础与土体界面设置接触来模拟桩土相互作用;

(4) 应根据载荷情况、地基排水条件等取相应的土体强度指标; 应谨慎选取计算弹性模量, 如无其他资料, 可取 1~5 倍压缩模量。

5.2.5.9 嵌岩桩在水平力作用下的受力特性宜通过静载荷试验确定。不进行水平静载荷试验的嵌岩桩, 嵌岩端按固结设计时, 嵌岩深度应大于计算嵌岩深度, 且应大于 1.5 倍嵌岩段桩径。计算嵌岩深度可按下式计算:

$$h'_r \geq \frac{4.23V_d + \sqrt{17.92V_d^2 + 12.7\beta f_{rk}M_d D'}}{\beta f_{rk} D'}$$

式中: h'_r ——计算嵌岩深度 (m);

V_d ——基岩顶面处桩身剪力设计值 (kN);

β ——系数, 取 0.2~1.0, 根据岩层侧面构造和风化程度而定, 节理发育的取小值, 反之取大值, 中风化岩不宜大于 0.6;

f_{rk} ——岩石单轴饱和抗压强度标准值 (kPa), f_{rk} 的取值应根据工程勘察成果并结合工程经验确定; 当 βf_{rk} 大于桩身混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 时, βf_{rk} 取 f_{ck} ;

M_d ——基岩顶面处桩身弯矩设计值 (kN·m);

D' ——嵌岩段桩身直径 (m)。

5.2.5.10 进入基岩的桩, 应根据基岩性能按下列规定确定计算方法:

(1) 当岩石单轴饱和抗压强度标准值 $f_{rk} > 30\text{MPa}$ 时, 可按嵌岩桩计算;

(2) 当岩石单轴饱和抗压强度标准值 $f_{rk} < 10\text{MPa}$ 时, 可按灌注桩计算;

(3) 当岩石单轴饱和抗压强度标准值 f_{rk} 在 10MPa~30MPa 之间时, 根据岩体的结构和成分, 综合分析其与桩身的相互作用特性, 确定计算方法。

5.2.5.11 覆盖层土对嵌岩桩的水平抗力, 当覆盖层较薄且强度较低时, 不宜计入覆盖层土的作用; 当覆盖层较厚或有一定厚度且强度较高时, 可计入覆盖层土的作用。

5.2.6 群桩效应

5.2.6.1 当桩距小于 8 倍桩径时, 应考虑群桩效应; 对于斜桩群桩, 桩间距为承台底面处桩中心间距。

5.2.6.2 在砂性土中, 可不考虑群桩效应对承载力的影响。在粘性土中的群桩, 当桩距小于 8 倍桩径时, 应考虑群桩效应对承载力及变形特性的影响。具体应符合 CCS《浅海固定平台建造与检验规范》第 2 篇第 6 章中有关群桩效应的要求。

5.2.7 桩基础防冲刷设计

5.2.7.1 风电机组基础冲刷包含海床演变和桩基础局部冲刷, 宜通过数值模拟、物理模型试验进行评估。有条件的地区, 应收集不同时期海底地形资料进行海床演变分析。

5.2.7.2 在风电机组基础稳定性、结构应力、变形、模态分析与疲劳计算中, 应包括桩基础可能受到的最大淤积与冲刷状况。

5.2.7.3 风电机组基础防冲刷保护范围应根据波浪、海流、冲刷强度和海床地质条件确定。

5.2.7.4 风电机组基础应根据冲刷评估成果, 采用预留冲刷深度或防冲刷措施进行防冲刷设计, 运行期应进行定期监测和检查。

第3节 重力式基础

5.3.1 一般规定

5.3.1.1 为了确保重力式基础能正常工作，在极端环境条件下亦有一定的安全度。应对基础的承载力，各种稳定性，变形和振动进行分析计算，在有冲刷的地区，设计中应考虑其影响。

5.3.2 基础承载力和结构的整体稳定性

5.3.2.1 基础的设计必须提供足够的安全度以抵抗在最大载荷组合作用下的基础承载力的丧失、基础的滑动和倾覆。这种破坏包括沿任何可能的滑裂面的滑动，特别要考虑软土层的作用和重复载荷的影响。周期性载荷的破坏应作为一个单独的破坏类型加以考虑。

5.3.2.2 基础的承载力应满足下式：

$$P_{\max} \leq \frac{Q_d}{K}$$

式中： Q_d ——基础承载力标准值，一般按公认的方法计算（kN）；

$P_{\max}$ ——海上风机对基础底面产生的最大压力（kN）；

K ——安全系数，可按表 5.1.2.1 选取。

5.3.2.3 计算基础的抗滑稳定性时，在设计载荷作用下，作用在海上风机结构上的同一时刻的水平力合力须满足下式：

$$T \leq \frac{P \tan \varphi + A \cdot c}{K}$$

式中： T ——作用在海上风机结构上水平力的合力（kN）；

P ——作用在海上风机结构上竖向力的合力（包括支撑结构在水中的重量和相应条件下的波浪力）（kN）；

φ ——重力式基础底部土的内摩擦角（°）；

A ——重力式基础与土的接触面积（m²）；

c ——土的粘聚力（kPa）；

K ——安全系数，可按表 5.1.2.1 选取。

5.3.2.4 计算基础的抗倾稳定性时，在设计载荷的作用下，基础应具有足够的重力载荷以使它能承受来自任何方向的风和波浪力等作用下形成的最不利的合成倾覆力矩。整体基础抗倾稳性的安全系数 K 按下式计算：

$$M_q \leq \frac{M_w}{K}$$

式中： M_q ——倾覆力矩总和（kN·m）；

M_w ——抗倾覆力矩总和（kN·m）；

K ——安全系数，可按表 5.1.2.1 选取。

5.3.3 水力稳定性

5.3.3.1 需要研究由于渗透压力引起的土质软化和承载力的降低，并注意重复载荷的影响。

5.3.3.2 需要研究随着土的内部侵蚀形成的管涌。

5.3.3.3 重力式基础周围土体的冲刷范围、冲刷深度宜通过数值模拟、物理模型试验进行评估，冲刷评估内容应包括工程场区海床演变情况。运行期应对冲刷情况进行定期监测和检查。

5.3.4 基础的变形和振动

5.3.4.1 由于基础的变形和振动引起的结构运动和沉降不应妨碍支撑结构和风机的正常工作。

第 4 节 筒型基础

5.4.1 一般要求

5.4.1.1 筒型基础计算地基承载力时，应考虑风电机组运行载荷、波浪、风和海流等循环载荷长期作用下的土体强度和地基刚度的衰减，可进行试验研究，确定土体强度设计指标。

5.4.1.2 筒型基础地基承载力、稳定性和变形计算应考虑基础周围冲刷情况，冲刷深度与范围可根据数值模拟、模型试验或现场观测确定。

5.4.1.3 土层可能发生液化时，应进行专门研究论证。

5.4.1.4 单筒基础应按照 5.4.2、5.4.3、5.4.5、5.4.6 有关要求进行轴向承载力计算、抗滑及抗倾计算、沉放下沉阻力计算和包络线控制计算。

5.4.1.5 多筒基础应按照 5.4.2、5.4.4、5.4.5 有关要求进行轴向承载力计算、抗拔承载力计算和沉放下沉阻力计算。

5.4.2 竖向承载力及变形计算

5.4.2.1 筒型基础地基承载力计算时，可将筒型基础和筒内土体视为整体。

5.4.2.2 筒型基础底端地基承载力计算，应满足下式：

$$p_k \leq q_d$$

式中： p_k ——载荷效应的基本组合下，基础底面处平均压力（kPa）；

q_d ——筒型基础底端地基承载力设计值（kPa）。

5.4.2.3 基础底面的压力，宜按下列公式确定：

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A_{eff}}$$

式中： F_k ——载荷效应的基本组合下，上部结构传至基础底部的竖向力（kN）；

G_k ——筒型基础自重和筒基内的土重（kN）；

A_{eff} ——基础底面有效面积（m²）， $A_{eff} = \frac{1}{2}D^2 \arccos\left(\frac{2e}{D}\right) - e\sqrt{D^2 - 4e^2}$ ；

D ——筒型基础直径（m）；

e ——载荷偏心距（m）， $e = \frac{M_{base}}{V_{base}}$ ；

M_{base} ——基底力矩（kN·m）；

V_{base} ——竖向力（kN）。

5.4.2.4 筒型基础底端地基承载力设计值，可按下列公式确定：

（1）粘性土地基中

$$q_d = N_c \left[\left(\frac{s_u}{\gamma_m} \right) (1 + s_{ca} + d_{ca} - i_{ca}) + \gamma' h \right]$$

式中： N_c ——无量纲的承载力系数，由下式计算 $N_c = 2 + \pi \approx 5.14$ ；

s_u ——筒基底端土体不排水抗剪强度（kPa）；

γ_m ——承载力抗力系数，可按表 5.1.2.1 选取；

γ' ——筒型基础基底以上土的等效容重（kN/m³）；

h ——筒型基础埋深（m）；

i_{ca} ——载荷倾斜修正系数， $i_{ca} = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H_{base}}{A_{eff} \left(\frac{s_u}{\gamma_m} \right)}}$ ；

H_{base} ——基底水平力（kN）；

s_{ca} ——形状修正系数， $s_{ca} = 0.2(1 - 2i_{ca}) \frac{B_{eff}}{L_{eff}}$ ；

d_{ca} ——深度修正系数， $d_{ca} = 0.3 \arctan\left(\frac{h}{B_{eff}}\right)$ ；

B_{eff} ——筒型基础的等效宽度（m）， $B_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{B_e}{L_e}}$ ；

L_{eff} ——筒型基础的等效长度 (m), $L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{L_e}{B_e}}$;

B_e ——中间参数 (m), $B_e = D - 2e$;

L_e ——中间参数 (m), $L_e = \sqrt{D^2 - (D - B_e)^2}$ 。

(2) 无粘性土地基中

$$q_d = \frac{1}{2} \gamma' B_{eff} N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma + \gamma' h N_q s_q d_q i_q$$

式中: N_γ ——承载力系数, $N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right)$;

N_q ——承载力系数, $N_q = \left\{ \tan \left[\frac{\pi}{4} + 0.5 \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right) \right] \right\}^2 \cdot \left[\exp \left(\pi \frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right) \right]$;

γ_m ——承载力抗力系数, 可取可按表 5.1.2.1 选取;

i_q ——载荷倾斜修正系数, $i_q = 1 - 0.5 \left(\frac{H_{base}}{V_{base}} \right)^5$;

i_γ ——载荷倾斜修正系数, $i_\gamma = 1 - 0.7 \left(\frac{H_{base}}{V_{base}} \right)^5$;

s_q ——形状修正系数, $s_q = 1 + i_q \left(\frac{B_{eff}}{L_{eff}} \right) \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right) \right)$;

s_γ ——形状修正系数, $s_\gamma = 1 - 0.4 i_\gamma \left(\frac{B_{eff}}{L_{eff}} \right)$;

d_q ——深度修正系数, $d_q = 1 + 1.2 \left(\frac{h}{B_{eff}} \right) \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right) (1 - \sin \left(\arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\gamma_m} \right) \right))^2$;

d_γ ——深度修正系数, $d_\gamma = 1$ 。

5.4.2.5 筒型基础整体沉降与差异沉降计算, 可采用分层总和法或数值模拟方法。

5.4.2.6 分层总和法具体公式与参数选取可参考 NB/T 10105 和 JGJ 94 中规定条款, 宜适当考虑筒侧壁摩阻力提供的抗倾覆力矩。

5.4.2.7 采用数值模拟方法计算整体沉降和差异沉降时, 宜建立筒型基础和过渡段的整体模型进行计算。

5.4.3 筒型基础的抗滑及抗倾计算

5.4.3.1 筒型基础抗滑受荷状态如图 5.4.3.1, 非地震作用下, 地基抗滑移力与滑动力应满足下式:

$$H_s \leq H_d / \gamma_m$$

式中: H_s ——滑动力设计值 (kN), $H_s = Q_H$;

H_d ——抗滑移极限承载力 (kN), $H_d = E_p + R_H - E_a$;

γ_m ——抗滑移抗力系数, 可按表 5.1.2.1 选取;

E_a ——主动土压力, $E_a = \left[\frac{1}{2} \gamma' h^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2ch \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{2c^2}{\gamma'} \right] \cdot D$;

E_p ——被动土压力, $E_p = \left[\frac{1}{2} \gamma' h^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2ch \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \cdot D$;

R_H ——底面摩阻力, $R_H = (Q_v - Q_{out}) \tan \varphi + A \cdot c$;

c ——土的粘聚力;

A ——基础底面的面积 (m²);

Q_{out} ——筒外部侧壁摩阻力合力 (kN), $Q_{out} = f_s A_s$ 。

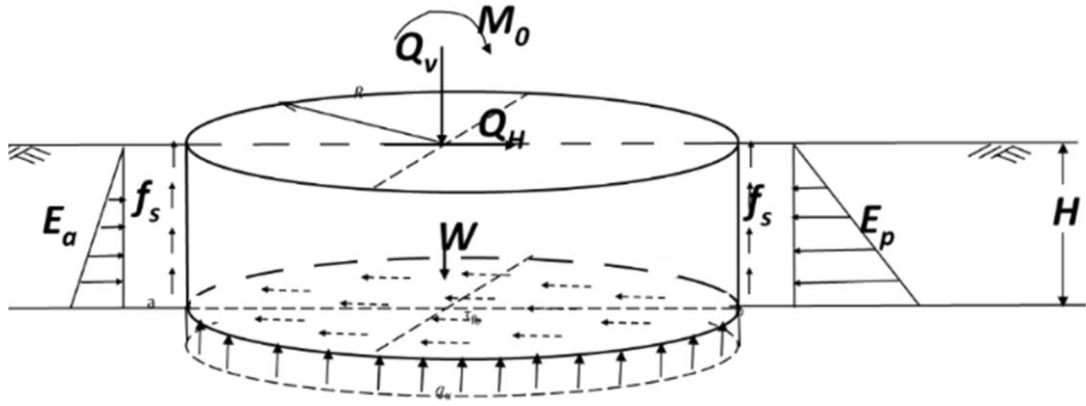


图 5.4.3.1 水平受荷状态筒型基础的受力图

5.4.3.2 地震作用下，抗滑移力与滑动力应满足下式：

$$H'_s \leq H'_d$$

式中： H'_s ——地震效应下滑动力修正值（kN）；

H'_d ——地震效应下抗滑移力（kN），应考虑地震作用导致的土体强度弱化。

5.4.3.3 非地震作用下，筒型基础倾覆最危险计算状况应满足下式：

$$M_s \leq M_R / \gamma_m$$

式中： M_R ——抗倾覆力矩（kN·m），当筒型基础长径比小于 2/3 时，宜按下文计算，长径比大于 2/3 时，可参照计算；

M_s ——倾覆力矩设计值（kN·m），计算方法见下文；

γ_m ——抗倾覆抗力系数，可按表 5.1.2.1 选取。

(1) 筒型基础抗倾受荷状态如图 5.4.3.3，假定筒型基础绕转动轴 mn 发生转动， mn 与 ab 垂直，交点为 x ，根据几何关系， $ox = \lambda R$ ， ab 与 Om 的夹角 $\delta = \arccos \lambda$ ；

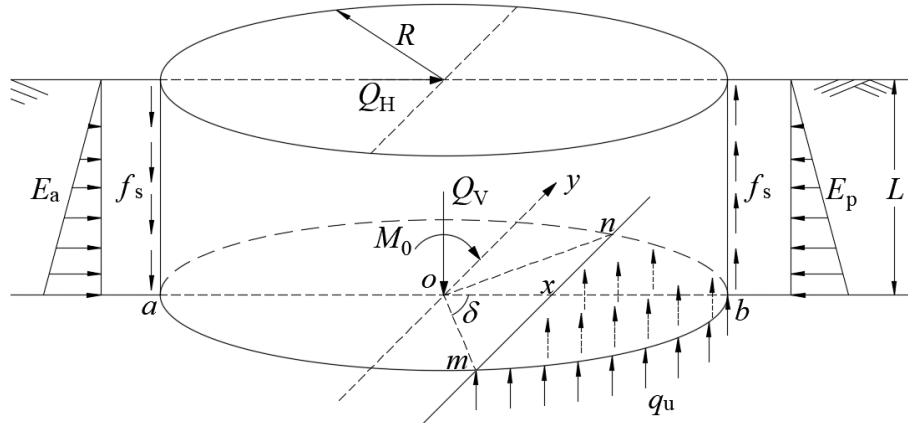


图 5.4.3.3 筒型基础倾覆受力图

(2) 抗倾覆力矩计算：

$$M_R = (Q_V + G)\lambda R + M_b + M_f + M_{Ep}$$

式中： Q_V ——竖向荷载（kN）；

G ——基础自重和筒内土重之和（kN）；

M_b ——地基极限承载力提供的抗倾覆力矩（kN·m）， $M_b = f_a A_x l_x$ ；

f_a ——修正后的地基承载力特征值（kPa）；

A_x ——地基反力面积（ m^2 ）， $A_x = (\delta - \lambda \sin \delta) R^2$ ；

l_x ——地基反力力矩（m）， $l_x = \left[\frac{\frac{2}{3}(1-\lambda^2)^{\frac{3}{2}}}{(\delta - \lambda \sin \delta)} - \lambda \right] R$ ；

M_f ——摩擦阻力抗倾覆力矩（kN·m）， $M_f = 2Q_{out} R (2 \sin \delta - 2\lambda \delta + \lambda \pi) / \pi$ ；

Q_{out} ——筒型基础外侧摩阻力 (kN)；

M_{Ep} ——被动土压力提供的抗倾覆力矩 (kN·m)， $M_{Ep} = 2hE_p\sqrt{(1-\lambda^2)}/3$ ；

(3) 倾覆力矩计算：

$$M_s = M_0 + Q_H h + M_{Ea}$$

式中： M_0 ——作用在筒顶面的力矩 (kN·m)；

Q_H ——水平向载荷 (kN)；

M_{Ea} ——主动土压力产生的倾覆力矩 (kN·m)， $M_{Ea} = 2hE_a\sqrt{(1-\lambda^2)}/3$ ；

(4) 筒型基础抗倾覆安全系数：

$$SF_t = M_R/M_S$$

(5) 通过迭代试算求得抗倾覆安全系数 SF_t 最小时，转动轴 mn 即为最有可能产生倾覆的轴线位置，此时 δ 、 λ 所对应的倾覆力矩及抗倾覆力矩即为 M_R 、 M_S 。

5.4.3.4 地震作用下抗倾覆稳定计算，其最危险计算状况应满足下式：

$$M'_S \leq M'_R$$

式中： M'_S ——地震效应下倾覆力矩修正值 (kN·m)

M'_R ——地震效应下抗倾覆力矩 (kN·m)，应考虑地震作用导致的土体强度弱化。

5.4.4 筒型基础的抗拔承载力计算

5.4.4.1 粘性土中，筒型基础抗拔承载力设计值可按下列公式确定：

$$V_t = W_G + \frac{\pi D^2}{4} p_a + \alpha \pi D h \frac{s_{u1}}{\gamma_m} + \min \left[\frac{\pi D^2}{4} \gamma' h, \alpha \pi D h \frac{s_{u1}}{\gamma_m} \right]$$

式中： V_t ——筒型基础抗拔承载力设计值 (kN)；

W_G ——筒型基础在水中重量 (kN)；

s_{u1} ——筒型基础基底以上土的不排水抗剪强度平均值 (kPa)；

γ_m ——承载力抗力系数，可按表 5.1.2.1 选取；

γ' ——筒型基础基底以上土的等效容重 (kN/m³)；

h ——筒型基础埋深 (m)；

p_a ——标准大气压 (kPa)；

α ——无量纲化系数， $\alpha = 1/S_t$ ， S_t 为土体灵敏度。

5.4.4.2 无粘性土中，筒型基础抗拔承载力设计值可按下列公式确定：

$$V_t = W_G + \frac{\pi D^2}{4} p_a + K \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} \tan(\arctan(\frac{\tan \delta}{\gamma_m})) + \min \left[\frac{\pi D^2}{4} \gamma' h, K \pi D \frac{\gamma' h^2}{2} \tan(\arctan(\frac{\tan \delta}{\gamma_m})) \right]$$

式中： K ——横向土压力系数，可取 0.8~1；

δ ——筒土界面摩擦角 (°)。

5.4.4.3 筒型基础抗拔承载力设计值计算时可考虑上拔过程产生的水力压差，但计算过程需经过 CCS 认可。

5.4.5 沉放下沉阻力计算

5.4.5.1 沉放阶段，应根据入土不同深度的端阻力和侧摩阻力确定施加压差，筒型基础入土下沉阻力可按下列公式确定：

$$Q = Q_{side} + Q_{tip} = A_{side} \eta_{side} f_s + A_{tip} \eta_{tip} q_u$$

式中： A_{side} ——侧壁面积，包括筒壁、分舱板及加强肋板侧面积 (m²)；

η_{side} ——考虑渗流、减阻环等因素的无量纲系数，可取 0.5~1，可根据试验及理论方法综合确定；

f_s ——平均单位侧摩阻力 (kPa)；

A_{tip} ——端面积，包括筒壁、分舱板及加强肋板端部面积 (m²)；

η_{tip} ——考虑渗流、减阻环等因素的无量纲系数，可取 0.5~1，可根据试验及理论方法综合确定；

q_u ——单位端阻力（kPa）。

5.4.5.2 单位侧摩阻力 f_s 和单位端阻力 q_u 可用强度参数方法和静力触探方法计算。

（1）强度参数方法

粘性土中单位侧摩阻力：

$$f_s(z) = \alpha s_u$$

式中： α ——无量纲化系数， $\alpha = 1/S_t$ ， S_t 为土体灵敏度；

s_u ——土的不排水抗剪强度（kPa）。

无粘性土中单位侧摩阻力：

$$f_s(z) = K p'_0(z) \tan \delta$$

式中： K ——横向土压力系数，可取 0.8~1；

$p'_0(z)$ ——上覆土压力（kPa）；

δ ——筒土界面摩擦角（°）。

粘土中单位端阻力：

$$q_u = N_c s_u + p'_0$$

式中： N_c ——承载力系数，按下式计算 $N_c = 6.2(1 + 0.34 \arctan(z/D))$

无粘性土中单位端阻力：

$$q_u = q_D N_q + \gamma' t_1 N_\gamma$$

式中： N_q 、 N_γ ——承载力系数，由筒端土体的 φ 值确定（图 5.4.5.2）；

q_D ——基底平面处的超载（kPa）， $q_D = \alpha_T p'_0$ ；

α_T ——系数，决定于基底面以上土体的 φ 值与 L/t_1 （筒壁入土深度/壁厚）的值（见表 5.4.5.2-1）；

t_1 ——壁厚（m）。

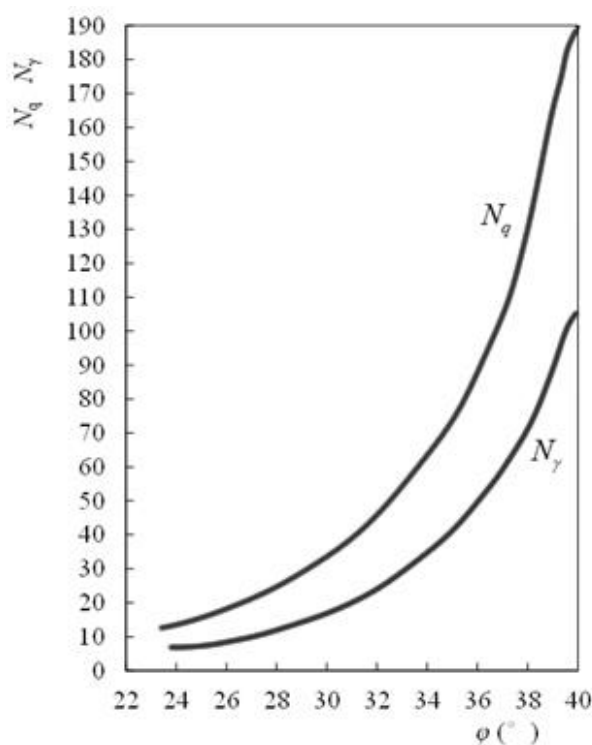


图 5.4.5.2 N_q 、 N_γ 与 φ 关系曲线

衰减系数 α_T 值

表 5.4.5.2-1

D/B	α_T			
	$\varphi=25^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=35^\circ$	$\varphi=40^\circ$
5	0.73	0.77	0.81	0.85
10	0.61	0.67	0.71	0.79
20	0.47	0.57	0.67	0.75
30	0.37	0.50	0.63	0.73

50	0.27	0.41	0.59	0.70
70	0.22	0.39	0.57	0.69

(2) 静力触探方法

单位侧摩阻力：

$$f_s(z) = k_f(z)q_c(z)$$

式中： $k_f(z)$ ——侧摩阻力经验系数，可按表 5.4.5.2-2 取值；

$q_c(z)$ ——静力触探端阻力（kPa）。

单位端阻力：

$$q_u = k_p q_c$$

式中： k_p ——端阻力经验系数，可按表 5.4.5.2-2 取值。

CPT 法经验系数值

表 5.4.5.2-2

土质	建议值		上限值	
	k_p	k_f	k_p	k_f
粘性土	0.4	0.03	0.6	0.05
无粘性土	0.3	0.001	0.6	0.003

注：（1）因局部管涌或结构水平运动的影响，土体表层 1.0 米到 1.5 米的 k_p 和 k_f 取值可比表中值 25% 至 50%，对于无管涌或结构运动影响的， k_p 和 k_f 值不降低；

（2）若筒型基础采取了增加筒端面积或加劲肋的构造措施， k_f 取值可降低；

（3）高度分层土体或砂粘互层土体的 k_p 和 k_f 取值介于粘性土和无粘性土之间。

5.4.5.3 应用适当的方法进行下沉期间屈曲分析，确保筒形基础下沉期间在任一入泥深度时，筒顶压差不会引起筒壁及筒内分舱板的局部屈曲。屈曲分析参照 CCS《海洋工程结构物屈曲强度评估技术指南》第 4 章执行，并结合数值模拟与试验综合确定。

5.4.5.4 不同入土深度均应校核土体渗透破坏临界条件。

5.4.5.5 筒型基础在无粘性地基中渗透破坏临界压差可采用试验、数值模拟或经验公式。在无经验算法或试验观测值时，渗透破坏临界压差应满足下式：

$$S_{crit} = 1.32\gamma' D \left(\frac{h}{D} \right)^{0.75}$$

式中： S_{crit} ——临界压差（kPa）；

γ' ——土体有效容重（kN/m³）；

D ——筒型基础直径（m）；

h ——筒壁入土深度（m）。

5.4.5.6 筒型基础在粘性土地基中压差沉放时，为防止内部发生过大土塞隆起，允许压差应满足下式：

$$\Delta u_a = N_c s_{u,tip}^{LB} + A_{inside} \alpha s_{u,D}^{av} / A_{in}$$

式中： N_c ——承载力系数， $N_c = 6.2 \left(1 + 0.34 \arctan \frac{L}{D} \right)$ ；

$s_{u,tip}^{LB}$ ——2/3 倍的筒端处不排水抗剪强度（kPa）；

A_{inside} ——筒型基础内部侧表面积，包括筒壁内侧、分舱板及加强肋侧面积（m²）；

α ——无量纲化系数， $\alpha = 1/S_t$ ；

S_t ——土体灵敏度；

$s_{u,D}^{av}$ ——筒壁入土深度范围内平均不排水抗剪强度（kPa）；

A_{in} ——筒型基础内部截面积（内部压差施加面积）（m²）。

5.4.5.7 对于成层土地基可通过试验方法和数值模拟方法确定土体渗透破坏的临界压差。

5.4.6 包络线控制计算

5.4.6.1 宜采用竖向-水平-力矩（V-H-M）包络面法校核筒型基础的设计承载能力，安全系数应不小于 1.4。

5.4.6.2 安全系数为筒型基础承载力设计值矢量与载荷设计值矢量模的比值，如图 5.4.6 中的安全系数为 $|AF|/|AB|$ 。

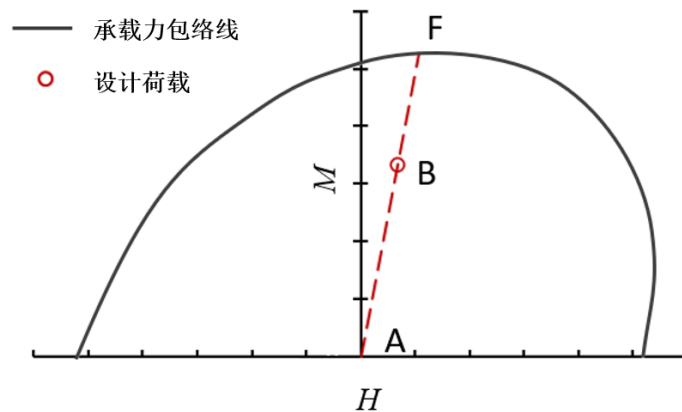


图 5.4.6.2 H-M 包络面及安全系数

5.4.6.3 有条件时，宜通过离心机试验和精细化数值分析方法确定筒型基础的承载力包络面。

5.4.6.4 通过单向加载方法得到筒型基础在特定竖向荷载条件下的水平向和倾覆单向承载力标准值，并根据相应的抗力系数得到特定竖向荷载条件下的单向承载力设计值。

5.4.6.5 通过常位移比法（Probe 法）或者扫掠法（Swipe 法）计算筒型基础在特定竖向荷载作用下的 H - M 承载力标准值包络线，并根据相应的抗力系数得到特定竖向荷载作用下的筒型基础 H - M 承载力设计值包络线。

5.4.6.6 绘制筒型基础承载力包络线时，宜以基础底面中心点作为荷载施加参考点。

5.4.6.7 通过离心机试验方法确定筒型基础承载力包络线时，应满足以下条件：

（1）保证基础几何尺寸、土层厚度、土体容重、土体强度和土体弹性模量等与工程实际相似；

（2）试验土体应具有良好的均匀性，不同试验点或不同试验组次中的土体性质应具有良好的 consistency。

5.4.6.8 通过数值分析方法确定筒型基础承载力包络线时，应满足以下条件：

（1）筒型基础和土体宜采用实体单元进行模拟；

（2）土体本构可采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则或 Tresca 屈服准则的理想弹塑性本构模型，有经验时也可采用修正的剑桥模型（MCC 模型）或邓肯-张模型（Duncan-Chang 模型）等土体本构模型；

（3）外荷载宜采用施加位移的方式进行模拟分析；

（4）应在基础与土体之间设置接触界面来模拟分析筒-土之间的相互作用；

（5）模型侧向边界距离筒型基础中心不宜小于 5 倍筒型基础水平向尺寸，模型底部地基边界距离基础端部不宜小于 4 倍筒型基础竖向尺寸，且不宜小于 3 倍筒型基础水平向尺寸；

（6）模型底部边界应施加三个方向上的位移约束条件，模型侧向边界应施加法向位移约束条件；

（7）模型中心筒型基础所在区域及周边的网格水平向尺寸不应大于 $1/40$ 的筒型基础水平向尺寸，筒型基础所在区域及周边的网格竖向尺寸不应大于 $1/40$ 的筒型基础水平向尺寸，且不应大于 $1/40$ 的筒型基础竖向尺寸；

（8）应根据荷载速率、地基排水条件等因素选取相应的总应力指标或有效应力指标，包括土体剪切强度指标、土体容重和泊松比等；

（9）计算中土体的弹性模量，如无其他参考资料，可选取 1~5 倍的土体压缩模量。

5.4.6.9 在没有试验或数值分析条件下,也可以采用经验方法确定筒型基础承载力包络面,其中粘性土中不排水加载条件下单筒基础的承载力包络面可以表达为:

$$\frac{H_{ult,v}}{H_{ult,v=0}} = 1 - \left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^{4.69}$$

$$\frac{M_{ult,v}}{M_{ult,v=0}} = 1 - \left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^{2.12}$$

$$\left(\frac{H}{H_{ult,v}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{ult,v}}\right)^2 - 2\alpha \frac{HM}{H_{ult,v}M_{ult,v}} = 1$$

式中: V ——竖向荷载(kN);
 H ——水平向荷载(kN);
 M ——倾覆力矩(kN·m);
 $H_{ult,v}$ ——筒型基础在一定竖向荷载作用下的水平向承载力(kN);
 $M_{ult,v}$ ——筒型基础在一定竖向荷载作用下的倾覆承载力(kN);
 V_{ult} ——筒型基础的竖向承载力(kN);
 $H_{ult,v=0}$ ——筒型基础的水平向承载力(kN);
 $M_{ult,v=0}$ ——筒型基础的倾覆承载力矩(kN·m);
 α ——包络线形状参数, $\alpha = 2(\eta - \lambda)D \frac{H_{ult,v}}{M_{ult,v}}$;
 η ——筒型基础的深径比;
 λ ——筒型基础在纯倾覆荷载作用下的旋转中心位置,可通过离心机试验或者数值分析方法获得,在没有相关条件时,可按表 5.4.6.9 插值求得;
 k ——为土体不排水抗剪强度随深度变化梯度;
 s_{u0} ——为土体表层不排水抗剪强度。

λ 参考取值表表 5.4.6.9

η	$k D/s_{u0}$								
	0	1	3	3.6	4.5	6	15	30	$+\infty$
1/6	0.04	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.13	0.20	0.31
1/3	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.23
1/2	0.25	0.26	0.28	0.29	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34
2/3	0.34	0.36	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.44	0.45
5/6	0.44	0.47	0.50	0.51	0.52	0.53	0.55	0.56	0.57
1	0.54	0.58	0.62	0.63	0.64	0.65	0.67	0.68	0.69

5.4.7 筒型基础刚度矩阵

5.4.7.1 宜采用数值模拟或经验公式计算等手段来确定筒型基础刚度矩阵。

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ V \\ M_x \\ M_y \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_H & 0 & 0 & 0 & -K_{HR} & 0 \\ 0 & K_H & 0 & K_{HR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{HR} & 0 & K_R & 0 & 0 \\ -K_{HR} & 0 & 0 & 0 & K_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix}$$

5.4.7.2 采用数值模拟确定筒型基础刚度矩阵时,有限元建模方法可参照 5.4.6.8。宜根据不同自由度方向分别对筒型基础顶盖中心作用点施加单位力,通过单位力作用下引起的位移得到筒型基础柔度矩阵,转换后得到筒型基础刚度矩阵。

5.4.8 筒型基础防冲刷

5.4.8.1 筒型基础防冲刷保护范围宜根据冲刷评估结果,并结合波浪、水流、冲刷强度和海床地质条件等因素综合确定,应覆盖全生命周期内冲刷坑范围。

5.4.8.2 筒型基础可采用抛石、固化土、砂袋、砂肋排等防冲刷保护措施。

第 6 章 运输与安装

第 1 节 运 输

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 支撑结构属于海上设施，其作为被拖物在海上的拖航应符合 CCS《海上拖航指南》的有关程序和要求。

6.1.1.2 对于海上自航运输，运输船舶的强度、稳性、绑扎与固定等应满足其装载手册和系固手册的相关规定。

第 2 节 安 装

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 支撑结构属于海上设施，其在海上的安装要求应符合 CCS《海上风电场设施施工检验指南》的有关要求。

6.2.1.2 单桩基础沉桩施工结束后，单桩基础在泥面处的倾斜角度应小于 3‰。

6.2.1.3 单桩基础计入施工误差后，泥面处整个运行期内循环累计总倾角不应超过 0.50° ；其余基础计入施工误差后，基础顶位置整个运行期内循环累计总倾角不应超过 0.50° 。

6.2.1.4 在 6.2.1.3 中规定的基础倾角测量方式可根据基础顶法兰平行度进行反推，如已对基础顶法兰进行过调平，需经 CCS 评估后进行认可。

6.2.2 沉桩

6.2.2.1 支撑结构常用的沉桩作业方法包括（1）冲击；（2）振动；（3）钻孔灌注。

6.2.2.2 在沉桩规划与设计阶段，应考虑土体条件、沉桩各阶段的限制环境条件等因素，具体应符合 CCS《海上风电场设施施工检验指南》关于沉桩的有关要求。

6.2.3 筒型基础安装

6.2.3.1 海上固定式风机筒型基础安装方法有：（1）负压贯入；（2）重力贯入。

6.2.3.2 重力贯入阶段，宜采用吊缆和控制各舱舱压的方法使基础均匀下沉，基础顶法兰面倾角不宜超过 1° 。

6.2.3.3 负压贯入阶段，不同入土深度均应校核筒体屈曲和渗透破坏临界条件，应符合 5.4.5 要求。

6.2.3.4 沉放未到设计要求深度时，宜根据预案及时处理。可采用筒内灌浆或灌砂、筒顶压载等处理措施，或移除该基础。