

导管架式海上风电基础结构分析

张白贾

(中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519000)

【摘要】 本文针对导管架式基础结构进行了深入的分析研究。首先, 介绍了导管架式风电基础结构的特点。然后, 从结构设计、材料选择等方面, 详细阐述了导管架式风电基础的结构设计要点和关键技术问题。本文的研究成果对于优化导管架式基础结构设计、提高其性能和可靠性、推动海上风电产业的发展具有重要意义。同时, 本文的研究方法和技术路线也可以为其他类似结构的分析和设计提供参考和借鉴。

【关键词】 导管架式; 海上风电; 基础结构

一、引言

(一) 背景介绍

随着全球对可再生能源需求的不断增长, 海上风电成为能源发展的重要领域之一。在海上风电场建设中, 风电基础是至关重要的组成部分, 其结构形式和设计直接影响到风电场的性能和可靠性。导管架式基础是一种常见的结构形式, 具有较高的承载能力和稳定性, 适用于多种海洋环境条件。本文旨在深入探讨导管架式基础结构的分析和设计方法。首先, 介绍了海上风电场建设和风电基础的重要性, 以及导管架式风电基础的概况和应用现状。然后, 综述了导管架式基础结构的研究现状和发展趋势, 重点讨论了其结构设计、材料选择、施工工艺和性能评估等方面的问题。在此基础上, 本文提出了研究问题和目标, 以及研究方法和技术路线。

(二) 研究意义

本文的研究目标是深入了解导管架式基础结构的性能和可靠性, 探究影响其性能的关键因素, 并提出相应的优化措施。为此, 将采用理论分析、数值模拟和实验研究等方法, 对导管架式风电基础的结构设计、材料性能、制造工艺、安装方法等进行全面分析和评估。同时, 本文还将对导管架式风电基础在海洋环境下的耐久性和可靠性进行评估, 提出相应的维护和修复策略。最后, 将通过实际案例分析, 对本文提出的理论和方法的可行性和有效性进行验证和分析。

通过本文的研究, 可以深入了解导管架式基础结构的性能和可靠性, 为其优化设计和提高性能提供理论依据和技术支持。同时, 本文的研究成果还可以为其他类似结构的分析和设计提供参考和借鉴。因此, 本文具有重要的理论和实践意义。

二、导管架式基础结构概述

(一) 结构组成

导管架式基础的支撑结构为桩基, 管架式基础通常采用中小型钢管桩作为支撑结构, 桩基通过驱动或打桩等方式固定在海床上。第一, 框架结构。导管架结构由多根大直径钢管及钢构件组成, 呈现出类水平、倒置且相互连接的四边形框架形状。水平连接杆连接框架结构的不同部分, 在整体中增加结构的刚性和稳定性。第二, 桥梁支撑杆。桥梁支撑杆位于框架结构内部, 通过纵向与横向的支撑, 增强整个结构的抗压能力。风力涡轮机的塔筒将安装在管架结构的中心, 用于支撑风力涡轮机上部的发电系统。

结构特点在于强度与稳定性, 例如: 导管架式基础具有较高的抗风、抗浪和抗冲击能力, 能有效应对恶劣海上环境的影响。相对于固定式海上风电基础, 导管架结构可更容易进行拆卸和移动, 便于基础的重置或重新利用。导管架式基础适应性强, 可以根据实际情况调整框架的尺寸和形状, 以适应不同风力涡轮机的安装需求^[1]。此外, 相比于其他类型的海上风电基础, 如: 重力式、群桩式、漂浮式等, 管架式基础具有成本较低的优势, 可以在一定程度上降低工程投资。管架式基础通常采用钢材作为主要材料, 钢材具有良好的耐腐蚀性能, 能够适应海洋环境的长期使用。

(二) 导管架结构的特点

导管架式基础中的导管架结构是指支撑、固定和保护海底电缆或输气管道的组件。首先, 导管架结构用于支撑和固定海底电缆或输气管道, 确保其稳定性和安全性。导管架通过多根大直径钢管或其他合适的结构元素组成, 并与海床进行牢固连接。导管架结构可以为海底电缆或输气管道提供物理保护, 减轻外部

环境因素的影响，如水流、波浪、冲击等。导管架的设计通常考虑到环境条件和预期的外力情况，以保护所支撑的电缆或管道免受损坏。

其次，具有灵活性。导管架结构可以根据具体项目需求进行适应性设计和调整。根据海底地形、水深、基础类型和管道布置等因素，导管架的形状、尺寸和布置可以灵活变化，以满足工程要求。



图 1：不同形状、尺寸海上风电导管架式基础

最后，具有耐腐蚀能力。由于导管架结构处于海洋环境中，其材料选择和防腐措施应考虑到耐腐蚀性能。通常会采用涂刷防腐涂层、使用耐腐蚀材料或增加牺牲阳极等方法，以延长导管架的使用寿命并减少维护成本。导管架结构应具备便于施工和安装的特点，以提高项目效率^[2]。可以采用模块化设计、现场组装等方式，使导管架的制造、运输和安装更加方便。

三、导管架式海上风电基设计要素和考虑因素

（一）地质条件和海洋环境因素

导管架式基础的设计必须充分考虑地质条件和海洋环境因素的影响。这些因素包括海底土壤性质、海底地形、潮汐、波浪、水流等。

海底土壤性质是影响导管架基础稳定性的重要因素。土壤的强度、压缩性、渗透性等都会对基础的稳定性产生影响。因此，在设计导管架基础时，需要对海底土壤性质进行详细的勘察和研究。海洋环境因素包括潮汐、波浪、水流等，这些因素都会对导管架基础的稳定性产生影响。潮汐和波浪会导致基础的水平位移和垂直位移，而水流则会对基础的稳定性产生影响。因此，在设计导管架基础时，需要考虑这些因素的影响，并采取相应的措施来减少这些因素的影响。

同时，在考虑地质条件和海洋环境因素的影响时，需要进行相关的数据分析。例如，需要对海底土壤的性质进行测量和分析，以确定其强度和压缩性；需要对潮汐和波浪的数据进行测量和分析，以确定其对基础的影响程度；需要对水流的数据进行测量和分析，以确定其对基础稳定性的影响。

（二）结构设计标准和规范

基础设计标准通常基于海上风电场建设和运营

的经验和要求，对导管架式基础的载荷、强度、稳定性等进行了规定。例如，DNV-OS-J101 标准是挪威船级社发布的基础设计标准，该标准对导管架基础的载荷、强度、稳定性等进行了详细的规定和要求。根据 ISO 19901-1 和 DNV-OS-J101 等标准的要求，导管架基础的载荷、强度和稳定性等指标必须满足一定的要求。例如，基础的最大允许沉降量、水平位移量和垂直位移量等参数都有明确的规定^[3]。这些标准的数据分析可以帮助设计人员更好地了解 and 掌握基础结构的设计要求。

结构荷载规范对导管架基础所承受的荷载进行了分类和规定，包括风荷载、浪荷载、潮流荷载等。例如，中国国家标准 GB/T 50330-2016《建筑结构荷载规范》对各种类型的建筑结构荷载进行了规定，包括风荷载、浪荷载、潮流荷载等。根据 GB/T 50330-2016 等规范的要求，导管架基础所承受的荷载包括风荷载、浪荷载、潮流荷载等，这些荷载的大小和方向都有明确的规定。通过对这些荷载的数据分析，设计人员可以更好地了解 and 掌握基础结构所承受的载荷情况，从而进行更加准确的结构设计。

表 1：管架式海上风电结构设计标准和规范安装参数

管架式海上风电结构设计标准和规范安装		
工序	风速 / (m*s-)	有效波高 H. /m
浮吊移船定位	≤ 12	≤ 1
运输船定位	≤ 12	≤ 1
安装、拆除安装平台	≤ 12	≤ 1
基础桩起吊与沉桩	≤ 12	≤ 1
安装、拆除钻机	≤ 12	≤ 1
钻孔施工	≤ 18	无具体要求
灌浆施工	≤ 18	≤ 1.5
附属件吊装	≤ 12	≤ 1

此外，结构设计规范对导管架基础的结构设计进行了规定，包括材料选择、连接设计、构造要求等。例如，中国国家标准 GB 50017-2017《钢结构设计规范》对钢结构的材料选择、连接设计、构造要求等进行了详细的规定。根据 GB 50017-2017 等规范的要求，导管架基础的结构设计包括材料选择、连接设计、构造要求等。例如，材料的强度、稳定性和耐腐蚀性等指标都有明确的规定。这些规范的数据分析可以帮助设计人员更好地了解 and 掌握基础结构的材料选择和构造要求等情况，从而进行更加安全和可靠的结构设计。

（三）材料的选取和强度要求

导管架式基础结构中的材料选取和强度要求是非常重要的。基础导管架的制造材料通常包括钢、钢管、混凝土等。其中，钢管是最常用的建造材料，因为它具有良好的抗风、抗浪、抗腐蚀性能，而且易于加工和安装。

第一，对于钢材的选取。通常采用高强度、耐腐蚀的钢材，如Q345等。这些钢材具有较高的屈服强度和抗拉强度，能够承受复杂的海洋环境和风电设备运行带来的载荷。同时，为了提高钢材的耐腐蚀性能，通常需要进行防腐处理，如涂层防腐、热浸镀锌等。

第二，对于钢管的选取。通常采用无缝钢管或直缝钢管。这些钢管具有较高的强度和稳定性，能够承受海洋环境和风电设备运行带来的复杂载荷。同时，为了提高钢管的抗腐蚀性能，通常需要进行内外防腐处理，如涂层防腐、热浸镀锌等^[4]。

第三，对于混凝土材料的选取。通常采用高强度、耐腐蚀的混凝土，如高性能混凝土等。这些混凝土具有较高的抗压强度和耐久性，能够承受海洋环境和风电设备运行带来的载荷。同时，为了提高混凝土的抗腐蚀性能，通常需要添加防腐剂或采用特殊的配合比设计。

在材料的强度要求方面，需要根据不同的基础型式和使用环境进行具体的计算和分析。一般来说，基础材料的强度要求需要根据设计载荷和安全系数进行确定。同时，还需要考虑材料的弹性模量、屈服强度、抗拉强度等参数，以确保基础结构具有足够的强度和稳定性^[4]。

基于此，导管架式基础结构中的材料选取和强度要求是非常重要的。需要根据具体情况进行合理的材料选择和设计计算，以确保基础结构具有足够的强度和稳定性，保证风电设备的正常运行和安全性。

（四）疲劳寿命评估和可靠性分析

疲劳寿命评估是评估基础结构在各种疲劳荷载作用下的寿命。这些荷载包括风荷载、浪荷载、潮流荷载等，它们会在基础结构上产生交变应力，从而导致结构的疲劳损伤。为了评估这些疲劳损伤，通常采用基于S-N曲线和Palmgren-Miner线性累计损伤法则的疲劳寿命估算方法。这种方法可以根据材料的疲劳特性、应力水平、应力循环次数等参数，计算出结构的疲劳寿命和损伤程度^[1]。

可靠性分析是评估基础结构在各种荷载和环境条件下的可靠性、稳定性和安全性。这些分析需要考

虑多种因素，如材料的性能、结构的几何尺寸、连接方式、环境条件等。通过可靠性分析，可以确定基础结构的可靠性指标，例如：失效概率、可靠度等。这些指标可以用来评估基础结构的性能和质量，以及指导后续的设计和优化。

在疲劳寿命评估和可靠性分析中，还需要考虑多种因素对基础结构的影响，如材料的力学性能、结构的几何尺寸和形状、连接方式和制造工艺等。同时，还需要进行实验和测试，以验证评估和分析结果的准确性和可靠性。导管架式基础结构的疲劳寿命评估和可靠性分析不但可以帮助设计人员确定基础结构的可靠性、稳定性和安全性，从而保证风电设备的正常运行和使用寿命；还可以指导后续的设计和优化，提高基础结构的性能和质量^[5]。

四、讨论和结论

（一）研究成果的总结分析

综上所述，导管架式基础结构设计需要考虑多种因素，如风、浪、流等自然环境条件，地震、海啸等自然灾害，以及材料性能、制造工艺等。研究人员通过理论分析、数值模拟和实验研究等方法，对导管架基础的结构设计进行了深入研究，提出了多种优化设计方案，如自适应导管架基础、多桩导管架基础等。这些研究成果提高了导管架基础的适应性和可靠性，降低了成本和风险。

（二）实际工程的启示建议

导管架式基础结构的研究成果为实际工程提供了重要的指导和启示。在实际工程中，应该充分考虑和研究这些研究成果，以提高海上风电场的建设质量和安全性，降低成本和风险。同时，随着科技的不断进步和应用实践的不断深入，导管架式基础结构的研究成果还将不断涌现和完善，为未来的海上风电场建设提供更好的支持和参考。

参考文献：

- [1] 杨昊,王风云,李钦朋,徐一邱,梁宪超.海上风电导管架式基础钢管桩沉桩技术[J].水电与新能源,2023,37(03):69-73.
- [2] 尹迪.固定式海上风电基础结构动力分析[D].天津大学,2021.
- [3] 李辉,林振东.深水导管架式风机基础安装平台设计及施工[J].中国港湾建设,2021,41(02):62-66.
- [4] 陈晶.导管架式海上风电基础管架式基础结构分析[D].天津大学,2014.
- [5] 郜殿伟.海上风电导管架式基础结构安全性分析[D].哈尔滨工程大学,2014.