

复杂地质条件下陆上风电项目基础施工关键技术

桂敬峰

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司 贵州省毕节市 553100

摘要：随着风力发电的广泛应用，陆上风电项目在复杂地质条件下的建设面临诸多挑战。本文聚焦于复杂地质条件下陆上风电项目基础施工关键技术展开研究。阐述了复杂地质条件给风电基础施工带来的诸如承载能力不足、稳定性差等问题。从地质勘察技术、基础选型技术、地基处理技术、基础施工工艺以及质量控制技术五个大方面进行深入探讨，每个大方面又细分若干小点，旨在为复杂地质条件下陆上风电项目基础施工提供全面的理论指导，确保风电项目基础施工的安全性、稳定性和可靠性，推动陆上风电项目在复杂地质环境中的顺利建设。

关键词：复杂地质条件；陆上风电项目；基础施工；关键技术

1. 引言

近年来，风力发电作为清洁能源的重要组成部分，发展势头迅猛。陆上风电项目的建设规模不断扩大，然而，其面临的地质条件愈发复杂。复杂的地质状况，如岩溶地貌、软土地基、高陡边坡等，给风电项目基础施工带来了诸多难题。基础作为风电项目的关键支撑部分，其施工质量直接关系到整个风电场的安全与稳定运行。在此背景下，深入研究复杂地质条件下陆上风电项目基础施工关键技术具有重要的现实意义。通过对这些关键技术的理论探讨，能够为实际施工提供科学依据，有效应对复杂地质带来的挑战，保障风电项目的顺利建设和长期稳定运行。

2. 复杂地质条件下陆上风电项目基础施工关键技术

2.1 地质勘察技术

2.1.1 多方法综合勘察

在复杂地质条件下，单一的勘察方法往往难以全面准确地获取地质信息。因此，需要采用多种勘察方法进行综合勘察。常见的勘察方法包括地质调查、地球物理勘探和钻探等。地质调查可以对地表地质现象进行直观观察和记录，了解地质构造、地层分布等基本信息。地球物理勘探利用物理原理，如电法、地震波法等，对地下地质结构进行探测，能够快速获取大面积的地质信息，推断地下地质体的分布和性质。钻探则可以直接获取地下岩芯样本，准确确定地层岩性、岩石强度等参数。通过将这些方法有机结合，能够从不同角度、不同层面获取全面而准确的地质信息，为后续的基础施工提供可靠依据^[1]。

2.1.2 精细化勘察要求

复杂地质条件要求地质勘察工作具备更高的精细化程度。这包括对勘察区域的详细划分，针对不同地质单元进行有针对性的勘察。在勘察过程中，要精确确定地质界线、断层位置、岩土体物理力学参数等^[2]。对于一些关键区域，如风电基础预计布置区域，要进行加密勘察，获取更详细的地质信息。同时，要对勘察数据进行精细处理和分析，运用先进的地质软件建立三维地质模型，直观展示地下地质结构，为准确判断地质条件对基础施工的影响提供精细化的支持，确保基础设计和施工能够充分考虑地质细节。

2.1.3 动态勘察与反馈

地质条件在风电项目建设过程中可能会发生变化，或者前期勘察存在一定的局限性。因此，需要进行动态勘察与反馈。在基础施工前，根据施工准备情况进行再次勘察，核实前期勘察结果。在施工过程中，密切关注地质条件的变化，如遇到异常地质情况，及时进行补充勘察。将勘察得到的新信息及时反馈给设计单位和施工单位，以便对基础设计方案和施工工艺进行调整。通过这种动态的勘察与反馈机制，能够及时应对地质条件的不确定性，保证基础施工始终基于准确的地质信息，提高施工的安全性和合理性。

2.2 基础选型技术

2.2.1 适应地质条件的选型原则

基础选型首先要遵循适应地质条件的原则。不同的地质条件对基础的要求差异很大。例如，在软土地基上，需要选择能够有效扩散荷载、增强地基承载能力的基础形式，如

桩基础。而在岩石地基上，则可以根据岩石的完整性和强度，选择岩石锚杆基础等更经济合理的基础形式。要根据地质勘察结果，综合考虑地质构造、岩土体性质、地下水位等因素，选择最适合该地质条件的基础类型，确保基础能够与地质环境良好匹配，为风电设备提供稳定的支撑^[3]。

2.2.2 常见基础类型特点与应用

在陆上风电项目中，常见的基础类型有扩展式基础、桩基础、岩石锚杆基础等。扩展式基础适用于地质条件较好、承载能力较高的场地，其施工相对简单，成本较低。桩基础能够将上部结构的荷载传递到深层地基中，适用于软土地基、承载能力不足的场地，通过不同类型的桩（如灌注桩、预制桩等）可以适应不同的地质情况。岩石锚杆基础则是利用锚杆将基础与岩石紧密连接，适用于岩石地基，能够充分利用岩石的高强度特性。了解这些常见基础类型的特点和适用范围，有助于根据具体地质条件做出合理的基础选型决策。

2.2.3 基础选型的综合评估

基础选型不能仅仅考虑地质条件，还需要进行综合评估。这包括对基础建设成本、施工难度、工期要求、环境影响等因素的综合考虑。例如，某些基础类型虽然适应地质条件良好，但施工难度大、成本高，可能需要额外的施工设备和技术，对工期也有较大影响。在选型时，要对各种基础类型进行全面的技术经济比较，权衡利弊，选择在满足地质条件和工程安全要求的前提下，综合效益最优的基础方案，实现技术与经济的平衡。

2.3 地基处理技术

2.3.1 软土地基处理方法

软土地基具有承载能力低、压缩性高的特点，对风电基础施工极为不利。常见的软土地基处理方法有换填法、强夯法、水泥搅拌桩法等。换填法是将软弱土层挖除，换填为强度较高、压缩性较低的材料，如砂石等，从而提高地基的承载能力。强夯法通过重锤的自由落体冲击，使软土地基得到加固，提高地基的密实度和强度。水泥搅拌桩法是通过向软土中注入水泥浆，与软土搅拌形成水泥土桩，增强地基的整体性和承载能力。根据软土地基的具体性质和工程要求，选择合适的处理方法，能够有效改善软土地基的工程性能，为基础施工提供良好的基础条件^[4]。

2.3.2 岩溶地基处理措施

岩溶地基由于其特殊的地质构造，存在溶洞、溶沟等不良地质现象，给风电基础施工带来很大风险。对于岩溶地基，首先要进行详细的探测，确定溶洞、溶沟的位置、大小和分布情况。处理措施包括填充法，对于较小的溶洞，可以采用混凝土、砂石等材料进行填充，提高地基的稳定性。对于较大的溶洞，可能需要进行梁板跨越或桩基础穿越等处理方式，确保基础能够安全地跨越或穿过岩溶区域。同时，要对岩溶地基进行长期的监测，及时发现和处理可能出现的问题，保障风电基础的长期安全。

2.3.3 特殊地质条件处理策略

除了软土地基和岩溶地基，复杂地质条件下还可能存在高陡边坡、膨胀土等其他特殊地质条件。对于高陡边坡，需要采取边坡支护措施，如锚杆支护、挡土墙等，防止边坡失稳对基础造成影响。对于膨胀土，由于其遇水膨胀、失水收缩的特性，需要对膨胀土进行处理，如采用换填非膨胀土、设置保湿层等方法，控制膨胀土的体积变化，减少对基础的不利影响。针对不同的特殊地质条件，制定相应的处理策略，是确保风电基础在复杂地质环境下安全稳定的关键。

2.4 基础施工工艺

2.4.1 基础开挖工艺

基础开挖是风电基础施工的重要环节。在复杂地质条件下，基础开挖需要根据地质情况选择合适的开挖方法和支护措施。对于土质较好的场地，可以采用放坡开挖的方式，但要根据边坡的稳定性要求确定合理的坡度。对于地质条件较差、容易发生坍塌的场地，需要采用支护开挖，如土钉墙支护、排桩支护等。在开挖过程中，要严格按照设计要求控制开挖尺寸和深度，避免超挖或欠挖。同时，要注意保护周围的地质环境，防止因开挖不当导致地质条件恶化，为基础施工创造良好的作业条件。

2.4.2 钢筋混凝土施工要点

风电基础通常采用钢筋混凝土结构，钢筋混凝土施工质量直接影响基础的性能。在钢筋施工方面，要确保钢筋的品种、规格、数量符合设计要求，钢筋的加工和绑扎要符合规范，保证钢筋骨架的强度和稳定性。在混凝土施工方面，要严格控制混凝土的配合比，确保混凝土的强度、耐久性等性能指标。混凝土的浇筑过程要连续、均匀，避免出现施工缝。同时，要做好混凝土的养护工作，保证混凝土的强度正

常发展。严格控制钢筋混凝土施工的各个要点，是保证风电基础质量的关键环节^[5]。

2.4.3 基础施工的防水与防腐

风电基础长期处于自然环境中，面临着水和腐蚀的威胁。因此，基础施工要注重防水与防腐处理。在防水方面，要做好基础的密封处理，防止地下水、雨水等渗透到基础内部，影响基础的耐久性。可以采用防水卷材、防水涂料等措施进行防水处理。在防腐方面，对于钢筋要采取防腐措施，如涂抹防腐涂料、采用防腐钢筋等。对于混凝土结构，可以通过添加防腐剂、提高混凝土的密实度等方式提高其抗腐蚀能力。做好基础施工的防水与防腐工作，能够延长风电基础的使用寿命，确保风电项目的长期稳定运行。

2.5 质量控制技术

2.5.1 施工过程质量控制

在风电基础施工的复杂进程中，对各环节实施严格的质量控制是保障工程安全与稳定的核心要义。这一控制体系始于原材料的质量检验，水泥作为混凝土的胶凝材料，其强度等级、安定性等指标直接关乎基础的强度与耐久性，必须严格检测以确保符合设计要求与规范标准；钢材承担着主要受力功能，对其力学性能和化学成分的检验不容有失，防止因材质不佳引发结构安全隐患；砂石的颗粒级配、含泥量等也需精准把控，不合理的参数会影响混凝土的质量。

对施工工艺的监控同样关键，每一道工序都应严格遵循施工方案和规范操作。基础开挖时，要仔细检查开挖尺寸是否精准，边坡稳定性是否达标，避免出现超挖、欠挖或边坡失稳问题；钢筋混凝土施工中，钢筋绑扎的间距、数量以及连接方式要符合设计，混凝土浇筑要保证密实度，养护阶段需严格控制温湿度，防止出现裂缝。通过全过程的精细质量控制，能及时察觉并纠正施工中的偏差，确保基础施工质量达到预期标准，为风电项目的长期稳定运行筑牢根基。

2.5.2 质量检测与监测技术

为切实保障风电基础的质量，运用先进且全面的质量检测与监测技术是必不可少的举措。在质量检测方面，涵盖多个关键领域。对原材料的检测是基础，像水泥的强度、凝结时间，钢材的力学性能与化学成分，砂石的颗粒级配和含泥量等，都需严格检测，确保其符合设计要求与规范标准，从源头上杜绝质量隐患。对混凝土强度的检测，可采用无损检测技术，如超声波检测能通过分析声波在混凝土中的传播

特性，精准判断内部是否存在缺陷；回弹法检测则利用回弹仪测量混凝土表面硬度来推算强度。对钢筋力学性能的检测也至关重要，能保证其承载能力达标。

与此同时，对基础进行长期监测不可或缺。基础的沉降监测和倾斜监测能有效掌握其变形情况。通过安装高精度的监测传感器，可实时获取基础的变形数据。一旦发现不均匀沉降、倾斜等问题，能迅速为采取加固、纠偏等相应措施提供科学依据，从而全方位保障风电基础的安全稳定运行。

2.5.3 质量验收标准与规范

风电基础施工圆满完成后，严谨且细致地依据严格的质量验收标准与规范开展验收工作，是保障整个风电项目质量与安全的关键环节。验收内容丰富且全面，涵盖基础的外观质量、尺寸偏差、混凝土强度、钢筋配置等多个重要方面。

在外观质量检查中，需仔细查看基础表面是否平整光滑，有无裂缝、蜂窝、麻面等缺陷，这些瑕疵不仅影响美观，更可能暗示内部存在质量问题。尺寸偏差方面，要严格对照设计图纸，精确测量基础的长度、宽度、高度以及轴线位置等，确保其在允许的误差范围内。对于混凝土强度，通过现场取样制作试件，经标准养护后进行强度试验，以验证其是否达到设计要求。钢筋配置验收则要检查钢筋的品种、规格、数量、间距以及锚固长度等是否符合规范。

只有当基础的各项指标都严格符合质量验收标准与规范要求时，方可判定基础施工质量合格。严格执行这些标准与规范，犹如筑牢了一道坚实防线，为风电基础的质量保驾护航，进而确保风电项目能够安全、稳定地运行。

3. 结论

复杂地质条件下陆上风电项目基础施工面临着诸多挑战，通过深入研究相关的关键技术，包括地质勘察技术、基础选型技术、地基处理技术、基础施工工艺以及质量控制技术等方面，能够为解决这些挑战提供有效的理论支持。在实际的风电项目基础施工中，要充分结合具体的地质条件，综合运用这些关键技术，确保基础施工的安全性、稳定性和可靠性。随着风力发电行业的不断发展，对于复杂地质条件下风电项目基础施工技术的研究也需要不断深入和完善，以适应新的地质条件和工程要求，推动陆上风电项目在更广泛的复杂地质环境中得以顺利建设和发展，为清洁能源的开发利用做出更大贡献。

参考文献：

- [1] 谭文浩 . 复杂地形高边坡风电场运输道路施工关键技术 [J]. 建筑技术开发 ,2025,52(08):85–87.
- [2] 张广飞 . 复杂地质条件下超深基坑施工关键技术研究 [J]. 科技创新与生产力 ,2022,(11):85–87.
- [3] 张俊山 . 复杂地质条件下超深基坑施工关键技术研究 [J]. 建筑技术开发 ,2020,47(01):77–79.
- [4] 张春生 . 陆上风电机组混合塔筒施工技术及质量控制要点研究 [J]. 电力设备管理 ,2025,(09):212–214.
- [5] 齐建飞 . 复杂山地大型风电工程施工关键技术 [J]. 人民黄河 ,2022,44(S2):217–218+220.

作者简介：桂敬峰 出生年月日 :1993.06.21 性别 : 男 民族 : 回族 籍贯 : 云南省宣威市 学历 : 大学本科 职称 : 初级从事的研究方向 : 新能源项目建设管理