

风电场基础施工中的地质适应性与技术创新

周源桂 刘柯江 陈凌志 姜道城 王裕程
中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 610041

摘要: 随着全球能源结构向清洁化、低碳化转型,风能作为最具发展潜力的可再生能源之一,其装机容量持续快速增长。风电场基础作为风电机组与地基之间的关键连接结构,其设计与施工质量直接关系到整个风电项目的结构安全、运行稳定与经济性。然而,风电场多选址于地质条件复杂、环境敏感的区域,如沿海软土、山地丘陵、高寒冻土、岩溶发育区等,对基础施工提出了严峻挑战。本文系统梳理了不同地质条件下风电基础施工面临的主要问题,深入分析了地质适应性设计原则,并重点探讨了近年来在桩基础优化、复合地基处理、模块化施工、智能监测与数字孪生等领域的技术创新。研究表明,通过地质精细化勘察、结构-地基协同优化设计及先进施工技术的集成应用,可显著提升风电基础在复杂地质环境中的适应性与可靠性,为我国乃至全球风电产业的高质量发展提供技术支撑。

关键词: 风电场; 基础施工; 地质适应性; 复杂地基; 技术创新; 智能建造

引言

在全球应对气候变化和实现“双碳”目标的背景下,风能作为技术成熟、成本持续下降的清洁能源,已成为能源转型的核心力量。据全球风能理事会(GWEC)统计,截至2024年底,全球风电累计装机容量已突破1000GW,中国以超过400GW的装机量稳居世界第一。随着陆上优质风资源逐渐开发殆尽,风电项目不断向地质条件更为复杂的区域延伸,如深远海、高海拔山地、滨海滩涂、湿陷性黄土区及多年冻土带等。风电基础作为支撑百米高塔筒与百吨级机舱的关键结构,需承受巨大的竖向荷载、水平推力及反复交变弯矩。其设计不仅需满足结构强度与稳定性要求,更需与地基土体形成良好的协同工作机制。然而,复杂地质条件往往导致传统基础形式(如扩展基础、单桩基础)难以适用,易引发不均匀沉降、承载力不足、抗拔失效等问题,严重威胁风电设施安全。因此,如何在不同地质环境中实现风电基础的高效、安全、经济施工,已成为制约风电项目落地的关键技术瓶颈。

1 风电基础类型及其地质适应性分析

1.1 常见风电基础形式

目前,陆上风电场主要采用以下几类基础形式:

1.1.1 扩展基础(SpreadFoundation)

适用于承载力较高、压缩性较低的均质土层或岩石地基。结构简单、施工便捷,但对地基要求高。

1.1.2 桩基础(PileFoundation)

包括单桩、群桩及大直径嵌岩桩,适用于软弱土层、高地下水位或需控制沉降的场地。通过桩身将荷载传递至深层稳定土层或岩层。

1.1.3 岩石锚杆基础(RockAnchorFoundation)

在完整基岩上钻孔植入锚杆,通过预应力将基础板与岩体紧密连接,适用于山地风电场。

1.1.4 复合地基基础(CompositeFoundation)

结合桩与土体共同承载,如CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)、碎石桩等,用于处理软弱地基。

1.2 典型地质条件对基础施工的影响

1.2.1 软土地区(如滨海、河口、湖泊周边)

软土具有高压缩性、低强度、高含水量等特点。在此类地区,扩展基础易发生过大沉降甚至失稳;桩基础虽可穿越软土层,但侧摩阻力低,需增加桩长或采用扩底桩以提高承载力^[1]。此外,软土的流变特性可能导致长期沉降持续发展,影响风机运行精度。

1.2.2 湿陷性黄土地区

黄土在天然状态下具有较高强度,但遇水后结构迅速破坏,产生显著附加沉降。风电基础施工中若未充分考虑湿陷性,雨水或施工用水渗入地基将引发不均匀沉降,导致塔筒倾斜。需采取强夯、灰土挤密桩或防水隔离措施。

1.2.3 岩溶发育区

岩溶地区地下存在溶洞、土洞或破碎带,地质勘察难度大,基础持力层稳定性差。若桩端置于溶洞顶板,可能因顶板坍塌导致基础失效。需结合高密度电法、地质雷达等手段精细探查,并采用嵌岩桩或跨越式基础设计。

1.2.4 高寒冻土区

冻土在冬季冻结、夏季融化,产生冻胀与融沉。风电基础若置于季节性冻土层内,将经历反复冻融循环,导致结构开裂或位移。需将基础埋深置于最大冻深以下,或

采用热棒、通风管等主动降温技术维持地基冻结状态。

1.2.5 山地丘陵区

地形起伏大、基岩裸露、坡度陡峭。传统大型机械难以进场,施工便道修建困难。岩石锚杆基础虽适用,但钻孔精度要求高,且需评估岩体完整性与节理发育情况。此外,边坡稳定性亦需重点考虑。

2 风电场基础施工中的地质适应性设计原则

面对复杂地质条件,风电基础设计需遵循“因地制宜、安全可靠、经济合理、绿色低碳”的原则,具体包括:

2.1 精细化地质勘察

精细化地质勘察是地质适应性设计的前提。传统“点式”钻探难以全面反映场地地质的三维空间分布特征,尤其在岩溶发育区、软土层或断裂带等复杂区域易造成误判。因此,应采用“网格化+重点区域加密”的综合勘察策略,融合无人机航测获取地形地貌信息、三维地震勘探识别深部构造、跨孔CT成像技术精准刻画岩体完整性与裂隙分布,进而构建高精度三维地质模型。该模型可有效识别软弱夹层、溶洞、断层破碎带等不良地质体,为后续基础选型与参数优化提供科学依据。

2.2 结构-地基协同优化

结构-地基协同优化是提升风电基础整体性能的核心。风机系统在运行中承受复杂动态荷载(如风振、地震、偏航力矩等),若仅孤立设计基础而忽略土-结构相互作用(SSI),易导致结构响应失真或地基失效。应将风机、塔筒、基础与地基视为统一力学系统,借助PLAXIS、ABAQUS等有限元软件开展耦合数值模拟,综合考虑风荷载时程、地震动输入及地基非线性特性,对基础形式(如扩展基础、群桩基础、复合基础)、桩长、桩径、配筋率等关键参数进行多目标优化,在保障结构安全的前提下避免“保守设计”造成的资源浪费。

2.3 动态设计与施工反馈

推行动态设计与施工反馈机制,实现设计与施工的深度融合。地质条件具有高度不确定性,即便前期勘察详尽,施工开挖或打桩过程中仍可能揭露未预期的地质异常。此时应建立“勘察—设计—施工—监测”闭环体系,依据实时地质揭露与监测数据(如沉降、倾斜、孔隙水压力等)动态调整设计方案^[2]。例如,在岩溶区遇大型溶洞可改用微型桩群穿越或实施高压注浆加固;在深厚软土区可增加桩数、增大桩径或采用后压浆技术提升承载力,从而提升工程适应性与韧性。

2.4 环境友好型施工

环境友好型施工是实现绿色低碳发展的必然要求。在生态敏感区域(如湿地、草原、水源保护区),应优

先选用低扰动、低噪声、低排放的施工工艺,如静压桩、螺旋桩或预制装配式基础,最大限度减少土方开挖量、植被破坏与水土流失。同时,施工产生的泥浆、废水须经沉淀、过滤等处理后集中排放或回用,严禁直排污染地下水体。通过绿色施工技术与生态修复措施的协同,实现风电开发与生态环境的和谐共生。

3 风电场基础施工中的地质适应性技术创新

3.1 桩基础技术创新

桩基础作为风电结构的关键承重构件,其形式与工艺需根据地层特性灵活调整。大直径扩底灌注桩通过在桩端采用机械扩孔技术形成扩底结构,有效增大桩端承载面积,大幅提升端承力与抗拔性能,特别适用于软土、砂层等低承载力地层。预应力高强混凝土管桩(PHC桩)则凭借工厂预制、质量可控、施工高效等优势,广泛应用于中等软土地基,其标准化生产与快速接桩技术可灵活适应不同桩长需求,显著提升施工效率。针对岩溶发育区或地形受限的山地风电场,微型桩群基础成为理想选择。该技术采用小直径桩体(通常为150-300mm),通过合理布设形成群桩体系,利用群桩协同效应实现荷载有效传递,同时具备施工扰动小、适应性强、对地下空洞敏感度低等特点,适用于复杂地质条件下的基础稳定控制。

3.2 复合地基处理技术

在天然地基承载力不足或存在湿陷、沉降风险的区域,复合地基技术通过增强土体与人工加固体的协同作用,提升整体地基性能。CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基通过在原状土中设置刚性桩体,并结合褥垫层调节桩土荷载分担比例,形成“桩-土-褥垫层”三位一体的承载体系,有效控制沉降并提高承载力,尤其适用于湿陷性黄土、软黏土等不良地基。对于深厚软土地区,真空预压联合碎石桩技术则展现出显著优势:先通过真空负压加速土体排水固结,再插入碎石桩形成竖向排水通道,进一步促进固结并提升地基强度与稳定性^[3]。该组合工艺不仅缩短了地基处理周期,还显著提高了工后地基的长期稳定性。

3.3 模块化与装配式施工

面对山地、高海拔或交通不便区域的施工难题,模块化与装配式基础技术应运而生。该技术将基础结构拆分为标准化预制构件(如底板、侧墙、连接节点等),在工厂完成高精度制造后运输至现场进行吊装拼接。此举大幅减少现场湿作业、模板支设与混凝土养护时间,不仅提升施工效率与质量可控性,还显著降低对周边生态环境的扰动。同时,装配式施工缩短工期、减少人员投入,契合风电项目快速投运与绿色建造的发展趋势。

3.4 智能监测与数字孪生技术

为实现风电基础全生命周期的安全可控,智能监测与数字孪生技术正逐步融入基础工程。通过在基础关键部位嵌入光纤光栅(FBG)传感器、倾角仪、应变计等感知设备,可实时采集沉降、倾斜、应力等关键参数,并借助LoRa、5G等通信技术上传至云端平台,实现远程预警与动态评估。在此基础上,融合BIM(建筑信息模型)与GIS(地理信息系统)构建的数字孪生平台,可集成地质勘探数据、基础设计模型、施工进度与监测信息,支持施工前的虚拟建造模拟、机械路径优化及工序推演,并在运维阶段对基础性能退化趋势进行预测,为预防性维护提供决策支持。

3.5 新型材料与绿色技术

在材料层面,超高性能混凝土(UHPC)因其优异的抗压强度、抗裂性与耐久性,被用于基础关键受力节点,有效延长结构服役寿命。再生骨料混凝土则通过回收利用建筑废弃物作为骨料,降低天然资源消耗与碳排放,推动风电建设向循环经济转型^[4]。此外,在季节性冻土或多年冻土区域,地源热泵辅助温控技术可利用浅层地热能调节基础周围土体温度,抑制冻融循环引起的体积变化与结构损伤,保障基础长期稳定性。

4 案例分析:某复杂山地风电场基础施工实践

4.1 项目概况

某风电场位于西南某省,海拔2800-3200m,地形坡度25°-45°,基岩为强风化砂岩,节理发育,局部存在小型溶洞。风机单机容量5.0MW,塔筒高度110m。

4.2 地质挑战

场地狭窄,大型设备无法进场;岩体完整性差,传统锚杆基础锚固力不足;雨季易发生边坡滑塌,影响施工安全。

4.3 技术方案

采用微型桩群+钢筋混凝土承台复合基础;微型桩Φ273mm, L=18m,嵌入中风化岩层≥3m;承台分三块预制,现场拼装,减少混凝土浇筑量;边坡设置格构梁+植被护坡,增强稳定性;安装倾角传感器与雨量计,构建边坡预警系统。

4.4 实施效果

基础施工周期缩短至15天/台;单基础造价较传统方案降低18%;运行两年内最大沉降<8mm,倾斜率<0.1‰,满足规范要求。

5 挑战与展望

尽管风电基础技术取得显著进步,但仍面临诸多挑战:一是地质不确定性:隐伏构造、地下水动态变化等难以完全预判;二是标准体系滞后:现有规范对新型基础形式(如模块化、复合桩)缺乏明确设计方法;三是全生命周期成本优化不足:过度关注初期造价,忽视运维与退役成本;四是智能化水平待提升:监测数据利用率低,缺乏AI驱动的预测性维护模型。未来发展方向包括:发展“地质-结构-环境”多场耦合仿真平台,实现基础性能的精准预测;推动风电基础设计标准化与参数化,建立适用于不同地质分区的设计图集;深化数字孪生与AI技术融合,构建“感知-分析-决策-执行”闭环智能运维系统;探索可拆卸、可回收基础结构,支持风电场退役后的生态修复与资源循环。

6 结语

风电场基础施工的地质适应性是保障风电项目安全、经济、可持续运行的核心要素。面对日益复杂的地质环境,必须摒弃“一刀切”的传统设计思路,转向基于精细化勘察、系统性分析与动态反馈的适应性设计范式。近年来,桩基础优化、复合地基处理、模块化施工及智能监测等技术创新,显著提升了风电基础在软土、岩溶、冻土、山地等特殊地质条件下的适用性与可靠性。未来,随着数字化、智能化技术的深度融合,风电基础工程将迈向更高效、更绿色、更智慧的新阶段,为全球能源转型提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张雄.大型风电场基础工程设计与施工中的关键技术问题[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(23):119-121.
- [2]许海楠.某超高海拔风电场工程风机基础设计施工分析[J].水电站设计,2025,41(02):52-54+67.
- [3]张杰.风电场基础深基坑工程设计与施工技术研究[J].自动化应用,2024,65(S1):65-67+70.
- [4]陆上风电场工程风电机组基础施工规范:NB/T10906-2021[S].奔流电子音像出版(北京)有限公司,2021.