

复杂地形条件下风电塔基础设计与施工挑战应对策略

黄立根

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要：本文聚焦复杂地形条件下风电塔基础设计与施工挑战及应对策略。复杂地形带来地质条件复杂、基础类型选择难、荷载计算与分析难等设计挑战，以及施工难度大、工期紧张与成本控制难、安全风险高等施工挑战。针对这些问题，提出基础设计优化、施工技术创新与应用、完善施工管理与协调机制、强化安全管理与风险控制等策略，并展望了智能化设计、新材料应用等技术趋势及极端环境、海上风电等应用拓展方向。

关键词：复杂地形；风电塔基础；设计挑战；施工挑战；应对策略

1 复杂地形条件下风电塔基础设计挑战

1.1 地质条件复杂性

复杂地形伴随复杂地质条件，给风电塔基础设计带来巨大挑战。在山区，地形起伏大、地质构造复杂，存在断层、褶皱等现象。断层带岩石破碎、稳定性差，若基础位于其影响范围内，承载与稳定能力会受严重影响；褶皱地区岩层产状变化大、不同岩层力学性质差异明显，设计时需考虑岩层相互作用。丘陵地区虽地形相对平缓，但地质问题也不容小觑，可能存在泥岩、页岩等软弱夹层，其强度低、压缩性高，易致基础不均匀沉降；还可能存在岩溶地貌，地下溶洞、暗河发育，施工时若未及时处理溶洞，基础可能陷入，导致风电塔倾斜甚至倒塌。沿海地区除地质构造复杂外，还面临海水侵蚀与软土地基问题，海水中的氯离子会腐蚀钢筋，降低基础耐久性；软土地基含水量高、压缩性大、强度低，基础在其上易产生较大沉降和变形，影响风电塔正常运行。

1.2 基础类型选择困难

由于复杂地形地质条件的多样性，基础类型的选择变得十分困难。常见的基础类型有扩展基础、桩基础、岩石锚杆基础等，每种基础类型都有其适用条件和优缺点。扩展基础适用于地基承载力较高、地形相对平坦的地区。但在复杂地形中，如山区和丘陵地区，地基承载力往往不均匀，扩展基础难以满足承载力和变形要求。而且扩展基础的体积较大，在狭窄的地形中施工难度大，可能会对周围环境造成较大的破坏^[1]。桩基础具有承载力高、沉降小等优点，适用于软土地基和地质条件复杂的地区。然而，桩基础的施工成本较高，施工周期较长。在山区，桩基础的施工设备运输困难，施工场地受限，增加了施工难度和成本。岩石锚杆基础适用于岩石地基，具有施工速度快、成本低等优点。但在复杂地形中，岩石的强度和完整性差异较大，有些岩石可能存在

裂隙和风化现象，影响锚杆的锚固效果。而且岩石锚杆基础的耐久性也受到岩石性质和环境因素的影响。

1.3 荷载计算与分析难度

风电塔在运行过程中会受到多种荷载的作用，包括风荷载、地震荷载、塔架自重、叶片荷载等。在复杂地形条件下，荷载计算与分析的难度大大增加。风荷载是风电塔的主要荷载之一，其大小和方向受到地形、地貌、风速、风向等因素的影响。在复杂地形中，如山区和峡谷地区，气流运动复杂，容易产生湍流和风切变，导致风荷载的不确定性增大。传统的风荷载计算方法可能无法准确反映复杂地形下的风荷载特性，需要进行大量的现场实测和数值模拟研究。地震荷载也是风电塔设计需要考虑的重要因素，复杂地形地区的地震活动可能更加频繁和强烈，地震波的传播和反射也会受到地形的影响。在进行地震荷载分析时，需要考虑地形对地震动参数的影响，采用合适的地震动输入和地震反应分析方法。塔架自重和叶片荷载也会随着风电塔的高度和叶片长度的增加而增大。在复杂地形条件下，风电塔的倾斜和变形可能会导致荷载分布不均匀，增加了荷载计算与分析的难度。

2 复杂地形条件下风电塔基础施工挑战

2.1 施工难度大

复杂地形给风电塔基础施工带来了诸多困难。在山区，地形陡峭，施工场地狭窄，大型施工设备难以进入和操作。而且山区地质条件复杂，可能会遇到岩石坚硬、溶洞发育等问题，导致桩基础施工进度缓慢。在丘陵地区，虽然地形相对平缓，但地下水位较高，软土地基处理难度大。软土地基需要进行排水、加固等处理措施，如采用排水板、水泥搅拌桩等方法。这些处理措施的施工工艺复杂，质量难以保证，而且会增加施工成本和工期。在沿海地区，施工还受到海水潮汐和海浪的影

响。在潮间带进行基础施工时,需要合理安排施工时间,避免海水淹没施工场地。而且海水对施工设备和材料具有腐蚀作用,需要采取防腐措施,增加了施工难度和成本。

2.2 工期紧张与成本控制

风电项目通常有严格的工期要求,需要在规定的时间内完成建设并投入运营。在复杂地形条件下,由于施工难度大,可能会遇到各种不可预见的问题,导致工期延误。同时,复杂地形条件下的施工成本也较高,施工设备的运输和安装费用增加,施工材料的采购和运输成本也相应提高。而且为了应对复杂的地质条件和施工难度,可能需要采用更先进的施工技术和设备,进一步增加了施工成本。因此,如何在保证工程质量的前提下,合理安排工期和控制成本,是复杂地形条件下风电塔基础施工面临的重要挑战^[2]。

2.3 安全风险高

复杂地形条件下的风电塔基础施工安全风险较高。在山区施工中,施工人员可能会面临滑坡、泥石流等地质灾害的威胁。而且山区地形复杂,施工人员在高处作业时容易发生坠落事故。在桩基础施工过程中,钻孔设备的操作不当可能会导致坍塌、卡钻等事故,对施工人员的安全造成威胁。在沿海地区,施工还受到台风、海浪等自然灾害的影响,台风可能会导致施工设备损坏、施工场地被淹没等情况,海浪可能会冲垮施工围堰,影响施工安全,施工过程中的用电安全、消防安全等问题也需要引起重视。

3 复杂地形条件下风电塔基础设计与施工应对策略

3.1 基础设计优化策略

为了有效应对复杂地形条件下风电塔基础设计所面临的诸多挑战,实施科学合理的基础设计优化策略至关重要。首要任务是强化地质勘察工作,这是基础设计的基石。应积极采用先进的地质勘察技术和方法,如地球物理勘探,它能够通过测量地球物理场的变化来推断地下地质结构,为设计人员提供地下岩层的分布、厚度、性质等关键信息;钻探则可以直接获取地下岩土样本,进行实验室分析,准确了解地质条件。只有获取可靠的地质资料,才能为基础设计提供坚实的基础。其次,要依据详细的地质勘察结果和荷载特点,精心选择合适的基础类型。在复杂地形中,单一的基础类型往往难以满足要求,此时可以采用组合基础的形式。桩基础能够将荷载传递到较深的稳定土层,而扩展基础则可以分散上部结构的压力,二者相互配合,充分发挥不同基础类型的优点,显著提高基础的承载力和稳定性,确保风电塔

在复杂地形中的安全运行。另外,还可借助数值模拟和模型试验等方法对基础进行优化设计,数值模拟通过建立数学模型,利用计算机模拟基础在不同荷载作用下的应力、变形和稳定性情况,为设计人员提供直观的理论依据。模型试验则是对数值模拟结果的验证,通过制作缩小比例的基础模型,在实验室中进行加载试验,观察基础的响应,发现设计中可能存在的问题,并及时进行改进,从而不断完善基础设计方案。

3.2 施工技术创新与应用

针对复杂地形条件下风电塔基础施工所遭遇的重重困难,持续进行施工技术创新与应用是推动施工顺利推进的关键。在山区施工中,由于地形狭窄、陡峭,大型施工设备难以施展,此时采用小型化、轻量化的施工设备成为必然选择。这些小型化、轻量化的施工设备大大提高了设备的机动性和适应性,为山区风电塔基础施工提供了有力支持。对于软土地基处理,传统方法往往存在施工周期长、效果不理想等问题,而新型的地基处理技术则展现出明显的优势。真空预压法通过在软土地基表面铺设密封膜,利用真空泵抽取膜下空气,形成负压,使地基土中的水分排出,从而提高地基的承载力和稳定性;强夯置换法则是利用重锤自由落下的冲击能将软土层夯实,并在夯坑内填入碎石等硬质材料,形成置换墩,与周围软土共同承担荷载。这些新型技术施工速度快、效果好,能够有效解决软土地基处理难题。在沿海地区施工中,面临着风浪大、海水腐蚀性强等恶劣环境,因此需要采用抗风浪、抗腐蚀的施工技术和材料。

3.3 施工管理与协调机制

建立完善的施工管理与协调机制是确保复杂地形条件下风电塔基础施工顺利推进的核心要素。首先,加强施工进度管理是关键,制定科学合理的施工进度计划,明确各个施工阶段的时间节点和任务目标,并严格按照计划进行施工。在施工过程中,要密切关注实际进度与计划进度的偏差,及时分析原因,采取有效的调整措施,应对各种不可预见的问题,如恶劣天气、地质灾害等,确保施工进度不受影响。其次,加强施工成本管理至关重要,对施工过程中的各项费用进行详细核算,包括人工费用、材料费用、设备租赁费用等,建立成本控制台账。通过优化施工方案,合理安排施工顺序和资源调配,降低施工成本。加强与供应商的合作,建立长期稳定的合作关系,争取更优惠的材料采购价格,降低材料采购成本,提高项目的经济效益^[3]。另外,还需要加强施工各方之间的协调与沟通,建立有效的沟通机制,定期召开施工协调会,及时解决施工过程中出现的问题。

加强与设计单位、监理单位的沟通,确保施工符合设计要求和质量标准。设计单位要及时提供设计变更和技术支持,监理单位要加强对施工过程的监督和检查,发现问题及时督促整改,形成良好的施工协作氛围,共同推动风电塔基础施工的顺利进行。

3.4 安全管理与风险控制

安全管理与风险控制是复杂地形条件下风电塔基础施工的重要保障,关乎施工人员的生命安全和项目的顺利进行。制定完善的安全生产规章制度和操作规程,明确各级管理人员和施工人员的安全职责,确保安全管理工作有章可循。加强施工人员的安全教育和培训,通过开展安全知识讲座、安全技能培训、应急演练等活动,提高施工人员的安全意识和操作技能,使其熟悉施工过程中的安全风险和应对措施。在施工现场设置明显的安全警示标志,如“禁止入内”“当心坠落”“注意安全”等,提醒施工人员注意安全。配备必要的安全防护设备,如安全帽、安全带、安全网等,并确保施工人员正确佩戴和使用。对施工过程中可能出现的风险进行全面识别和评估,如高处坠落、物体打击、坍塌、触电、火灾等,根据风险等级制定相应的防范措施。建立风险预警机制,实时监测施工现场的安全状况,一旦发现安全隐患,及时发出预警信号。制定完善的应急预案,明确应急救援的组织机构、职责分工、救援流程和救援措施,定期组织应急演练,提高应对突发事件的能力。一旦发生安全事故,能够迅速启动应急预案,进行救援和处理,减少事故损失,保障施工人员的生命安全和项目的顺利进行。

4 复杂地形风电塔基础设计的未来发展趋势

4.1 技术趋势

4.1.1 智能化设计

随着信息技术的不断发展,智能化设计将成为复杂地形风电塔基础设计的未来发展趋势。通过建立地质信息数据库、荷载数据库等,利用大数据分析和人工智能算法,对基础设计进行优化。智能化设计可以根据不同的地质条件和荷载特点,自动生成最优的基础设计方案,提高设计效率和质量。智能化设计还可以实现设计过程的可视化和动态模拟。设计师可以通过虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,直观地观察基础的设计效果和施工过程,及时发现设计中存在的问题,并进行

改进。

4.1.2 新材料应用

新材料的研发和应用将为复杂地形风电塔基础设计带来新的突破。纤维增强复合材料具有重量轻、强度高、耐腐蚀等特点,可以用于制作基础的加固材料,提高基础的抗震性能^[4]。新型的防腐材料和防水材料也将得到广泛应用,提高基础在复杂环境下的耐久性。

4.2 应用拓展

4.2.1 极端环境应用

未来,复杂地形风电塔基础设计将向极端环境应用拓展。例如,在高寒地区,需要考虑低温对基础材料和施工工艺的影响,采用耐低温的材料和保温措施。在沙漠地区,需要考虑风沙侵蚀和地基沉降等问题,采用防风沙和加固地基的措施。

4.2.2 海上风电升级

随着海上风电的快速发展,复杂地形风电塔基础设计也将向海上风电升级。海上风电基础面临着更复杂的地质条件、海洋环境和荷载作用,需要采用更先进的基础设计技术和施工方法。同时,海上风电基础的防腐、防冲刷等技术也将不断发展和完善。

结束语

复杂地形条件下风电塔基础设计与施工面临诸多挑战,但通过实施科学合理的基础设计优化策略、持续进行施工技术创新与应用、建立完善的施工管理与协调机制以及强化安全管理与风险控制等措施,可有效应对这些挑战。未来,随着智能化设计、新材料应用等技术的发展以及在极端环境和海上风电等领域的拓展,风电塔基础设计与施工将迎来新的机遇,为风电行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]张晨.复杂地形条件下建筑基础设计的技术与对策[J].建筑工程技术与设计,2020,(24):115-118
- [2]高涛.复杂地形建筑基础设计中的水文因素分析与应用[J].岩土工程技术,2021,(8):23-28
- [3]孙钦中.新藏水电站调压室竖井混凝土滑模施工技术[J].技术与市场,2021,28(4):62-64.
- [4]代辉.浅析引流系统小断面竖井混凝土浇筑技术[J].技术与市场,2020,27(8):51-52.