

# Research on Foundation Construction Technology of Wind Turbine in Complex Terrain

Dengmin Yu

China Electric Construction Group Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

## Abstract

This paper focuses on the difficult construction problems and foundation construction technology of wind turbines under complex terrain conditions. Complex terrain has many problems, such as complex geological conditions, large terrain undulation, inconvenient traffic, bad climate at high altitude, etc. In order to improve the construction quality and foundation stability of wind turbine, this paper introduces the cooperative treatment technology of multi-layer composite foundation, adaptive design technology of special-shaped expansion foundation and modular prefabrication foundation construction technology, covering survey, design, production and installation.

## Keywords

complex terrain; wind turbine; foundation construction

# 复杂地形条件下风电机组基础施工技术研究

余登敏

中国电建集团贵州工程有限公司, 中国·贵州 贵阳 550003

## 摘要

本文聚焦复杂地形条件下风电机组施工难题与基础施工技术。复杂地形存在地质条件复杂、地形起伏大、交通不便、高海拔气候恶劣等问题,影响施工安全、品质与效率。为此,介绍了多层复合地基协同处理技术、异形扩展基础自适应设计技术、模块化预制装配基础建造技术,涵盖勘察、设计、生产、安装等环节,通过具体案例展示了技术的应用效果,旨在提高风电机组施工品质与地基稳定性。

## 关键词

复杂地形条件下; 风电机组; 基础施工

## 1 引言

随着风电产业的快速发展,风电机组建设规模不断扩大,复杂地形条件下的风电机组施工面临诸多挑战。复杂地形具有地质条件多变、地形起伏大、交通不便以及高海拔地区气候恶劣等特点,这些因素给风电机组施工带来极大困难,影响施工安全与品质。因此,研究适用于复杂地形条件的风电机组基础施工技术具有重要的现实意义,有助于保障风电机组建设顺利进行,推动风电产业可持续发展。

## 2 复杂地形条件下风电机组施工难题分析

在复杂地形条件下,风电机组施工作业受诸多条件影响,其中地质条件复杂,岩土性质多变,使得施工活动难以开展;例如在山区可能存在岩石、碎石、粘性土等多种岩土类型,而在岩土区域,同样易发生崩塌,且不同区域环境条

件存在差异,需采取不同防护措施,这对基础材料的使用也提出了更高要求;同时在复杂地形中常存在滑坡、泥石流、溶洞等不良地质现象,比如在风电场选址时,基础可能位于陡坡上,在风机运行过程中受震动及荷载影响,容易诱发滑坡,导致基础失稳;而在溶洞区域,基础施工可能遇到溶洞坍塌、涌水等问题,影响基础浇筑质量和施工安全。

除了地质条件多变,相关区域地形起伏较大也会影响施工安全,山区地形起伏大,可用于施工的场地有限,在一些陡峭山坡上可能仅有很小平台可供施工设备、材料堆放,这给设备进场安装和材料运输带来极大困难。再加上复杂地形条件下交通不便利,部分大型机械设备无法进场,也导致基础施工活动无法稳步高效推进。

除此之外,在部分高海拔地区,由于气候条件恶劣,在基础施工过程中,混凝土的凝固过程和最终强度会受严重影响,需采取额外保温措施,而且空气稀薄会导致施工机械效率低下,严重影响施工品质和效率。总体来说,在复杂地形条件下,风电机组施工面临多方面问题,工程师需做好对

【作者简介】余登敏(1984-)女,中国贵州清镇人,硕士,高级工程师,从事风力发电等研究。

环境的深层次调研分析,做好对施工过程中人、机、料、法、环的有效管控,以此来提高施工品质。

### 3 复杂地形条件下风电机组基础施工技术

#### 3.1 多层复合地基协同处理技术

多层复合地基协同处理技术可保证基础施工品质,在此过程中,工程师需做好详细地质勘察;在复杂地形条件下,工作人员需对风电机组施工区域进行全方位、多层次勘察评估,可采用钻探、原位测试等方式,了解相关区域土壤土层的物理力学性质,对其厚度、密度、压缩模量和抗剪强度等核心指标进行搜集整理;之后从相关数据信息中梳理出相关区域潜在的软弱土层、岩石夹层等特殊地层,并做好地形图绘制。基于上述勘察结果,工程师需做好对地质条件的深入分析,评估各土层的承载能力和变形特性,判断是否存在不均匀沉降风险,并分析不同土层间的相互作用,确定需要进行协同处理的关键土层组合,为多层复合地基的协同处理方案的制定提供依据<sup>[1]</sup>。

接着工程师需根据地质条件分析结果选择合适的多层复合地基类型,常见的多层复合地基包括桩-土复合地基、桩-筏复合地基;在复杂地形条件下,不同地基组合方式可针对不同地质条件提升地基稳定性,其中针对上部为较为柔软土层、下部为较为坚硬土层的情况,可采用上部设置柔性桩、下部设置刚性桩等方式来提升地基承载能力。后续,设计师需确定多层复合地基中各组成部分的协同参数,包括桩的直径、长度、间距、桩体材料强度和模量,以及褥垫层的厚度和材料等,通过理论计算和数值模拟分析各参数对复合地基整体性能的影响,以保证各层之间能够协同工作,共同承担上部风电机组的荷载。因此,设计师需引进多层复合地基协同处理技术来提高地基的稳定性。

#### 3.2 异形扩展基础自适应设计技术

##### 3.2.1 规划

异形扩展基础自适应技术可提升地基结构的稳定性,在实践环节,工作人员需基于上述数据调研,了解相关区域地基情况,其中还需重点对地质环境的物理力学性质进行剖析,从土层厚度、密度、压缩模量、抗剪强度等多个层面全面分析地质构造特征。之后,做好对异形扩展基础的设计规划,其中设计师需基于风电机组荷载初步确定异形扩展基础形式,如不规则多边形、带凸台或凹槽的基础结构。此外,基础设计需充分考虑承载能力和稳定性,需对基础尺寸范围,如长度、宽度、高度以及异形部分的形状、尺寸进行设计规划,使基础在满足荷载条件下能够适应地形变化。紧接着,设计师需做好对风电机组在基础上荷载的详细分析,对其竖向荷载、水平荷载和弯矩进行设计规划,并根据荷载大小和作用方向,规划荷载在异形扩展基础中的传递路径,合理设计基础的结构,使荷载能够均匀、有效地传递到地基中,避免应力集中;并考虑基础与周围土体的相互作用,以保证

基础的稳定性<sup>[2]</sup>。

随后,设计师对基础尺寸进行了细致规划,基础主体长度确定为12米、宽度10米、高度3米,同时在基础的东北和西南角分别设置了尺寸为2米×2米×1米的凸台,以增强基础在复杂地形下的稳定性。在荷载分析环节,设计师明确该风电机组的竖向荷载为5000kN、水平荷载为800kN、弯矩为1200kN·m,并规划了荷载传递路径:竖向荷载通过基础主体均匀传递至地基,水平荷载和弯矩则通过凸台与主体结构的协同作用,分散到周围土体中,避免了应力集中现象的出现,同时充分考虑了基础与周围土体的相互作用,确保基础在承受荷载时能够保持稳定。

##### 3.2.2 模拟

在完成以上设计规划之后,设计师需通过数值模拟进一步优化设计方案,其中可同步利用有限元软件等工具建立异形扩展基础的精细化数字模型,该模型将地形、地质、荷载等环境指标进行一一对应关联,通过模拟分析可反映出实际情况,需计算异形扩展基础在不同工况下的应力、应变和变形情况;评估基础承载能力、稳定性和变形性能是否满足要求;并分析基础在不同部位的受力特点和薄弱环节,从而为优化设计提供依据。而根据模拟分析结果,可得出多个优化方案,并对不同方案进行比较和分析,综合考虑基础的安全性、经济性和施工可行性等因素选择最优设计方案,并对其进一步优化和完善,使异形扩展基础的设计更加合理可靠。

例如,完成设计规划后,设计师借助有限元软件ANSYS建立了该异形扩展基础的精细化数字模型。模型中将场地的地形地貌、各土层的物理力学参数以及风电机组的荷载条件一一对应关联,真实地模拟了基础在实际工作环境中的受力情况。通过对正常运行工况、极端风工况等不同工况的模拟分析,计算得出了基础在不同工况下的应力、应变和变形数据。在正常运行工况下,基础底面的最大压应力为150kPa,小于地基的承载力特征值200kPa,基础的最大竖向位移为3mm;在极端风工况下,基础底面的最大拉应力为20kPa,满足规范要求,基础的最大水平位移为5mm,均在允许的变形范围内。同时,分析发现基础凸台与主体连接部位的应力相对较高,是整个基础的薄弱环节。根据模拟分析结果,设计师提出了多个优化方案,如增加凸台与主体连接部位的配筋率、调整凸台的尺寸和形状等,并对不同方案进行了安全性、经济性和施工可行性的综合比较。最终选择了增加连接部位配筋率的方案,该方案在不显著增加施工难度和成本的前提下,有效提高了基础的承载能力和稳定性,使异形扩展基础的设计更加合理可靠。

#### 3.3 模块化预制装配基础建造技术

模块化预制装配基础建造技术可应对复杂地形条件下的施工需求,由于施工场地受限,无法在现场开展部分施工作业,为此可采取预制化生产的方式,优先在远端的预制

工厂完成模块设计规划、生产设备,再运输到现场进行安装即可。

### 3.3.1 勘察与设计

在实践环节,工程师需进行详细勘察,对复杂地形的坡度、起伏、地质条件进行分析评估,了解风电机组的空间尺寸限制以及运输和吊装条件,以此来确定模块化预制装配基础的整体布局和模块划分原则;紧接着根据地形和基础需求,设计师需做好模块标准化规划,确定模块的基本尺寸、形状和连接方式,使模块具有通用性和互换性,其中可设计标准尺寸底板模块、侧板模块和连接节点模块,并考虑这些模块在运输和吊装过程中的便利性,同步做好对其重量、尺寸的合理设计规划,避免过大或过重导致运输和吊装困难。并且,在模块设计中融入结构强度计算,保证模块在承受风电机组荷载和复杂地形作用下的安全性;之后做好对模块的标准化设计,需确定模块的基本尺寸、形状和连接方式,使模块具有通用性和互换性。

### 3.3.2 生产

在生产环节,设计师需选择适合复杂地形条件和风电机组要求的建筑材料,如高强度混凝土、耐腐蚀钢材,对原材料进行严格的质量检验,以确保其性能符合设计要求,并建立起原材料的质量追溯体系,以便在出现问题时能够及时查找原因并采取措施。在预制工厂内,工程师可采用先进的预制工艺进行模块生产,控制混凝土浇筑、振捣和养护等一系列过程,以保证混凝土密实度和强度。其中可运用自动化生产线和数字化管理系统,以提高预制效率和质量稳定性。在完成生产之后,需要对预制模块进行标识和编号,以便于后续运输、吊装和安装<sup>[3]</sup>。

例如,在上述项目中,在距离现场 80 公里的预制工厂内,技术人员严格遵循标准化流程生产模块:首先选用强度等级 C40 的商品混凝土和屈服强度 345MPa 的耐候钢材,对每批进场的水泥、钢筋、外加剂进行抗压强度、拉伸试验等 12 项指标检测,并通过二维码系统记录原材料批号、检测时间、生产厂家等信息,建立起可追溯至每个模块的质量档案。进入预制环节,自动化生产线的混凝土浇筑系统以 0.8m<sup>3</sup>/min 的速度向模具内注入混凝土,同时 4 台振捣机器人按照“边缘 30 秒+中心 20 秒”的频率进行振捣,随后养护窑以 25℃ 恒温、90% 湿度对构件进行 72 小时蒸汽养护,使混凝土早期强度达到设计值的 80%。针对侧板模块的钢混结合部位,采用预埋钢板与混凝土榫槽的连接工艺,通过超声检测仪对每个结合面进行密实度检测,确保钢混协同工作性能。所有模块出厂前均进行编号喷涂,如底板模块标注:FD-07-DB-01(代表 07 号机组底板模块 1 号),侧板标注:

FD-07-CB-01-08,并附带包含几何尺寸、强度数据、检测时间的电子档案。

### 3.3.3 安装

在完成生产以及运输之后,工作人员需要做好现场安装匹配,需采用合适的吊装设备,如起重机、履带吊将模块吊装到指定位置,在吊装环节需注重控制模块的速度和姿态,避免碰撞和损坏;在模块就位之后进行精确调整和固定;在安装环节,工程师还需做好对模块安装位置、连接质量、垂直度和水平度等指标的检测评估,看其是否符合标准,而对于发现的问题需要及时整改,确保装配质量达到标准。并且这一过程需利用 BIM 系统、MR 系统以及大数据库进行可视化管理,通过建立起装配质量档案,记录每个模块的安装情况和检查情况,以便为后续监测和异常处理提供参照依据。

例如,模块运输至现场后,施工团队采用 50 吨履带吊配合北斗定位系统进行吊装作业,通过车载终端实时监控吊装速度(控制在 0.5m/min 以内)和模块姿态(倾斜角度不超过 1°),确保首个底板模块在坡度 18° 的斜面精准就位。在模块连接环节,工人使用扭矩扳手按照 1200N·m 的设计扭矩紧固螺栓,同时利用 BIM 模型对每个节点进行三维比对,发现 2 号侧板模块与底板连接孔存在 3mm 偏差后,立即通过液压千斤顶微调模块位置,避免了强行连接导致的结构应力集中。安装过程中,测量人员使用徕卡全站仪每 30 分钟监测一次基础垂直度和水平度,要求塔筒安装基准面的水平度误差不超过 2mm/m、整体垂直度偏差小于 0.1%,一旦发现某侧板模块垂直度偏差达 0.15%,立即通过底部可调支墩进行校准。

## 4 结语

总体来说,本文深入分析了复杂地形条件下风电机组施工面临的难题,并详细阐述了多层复合地基协同处理技术、异形扩展基础自适应设计技术、模块化预制装配基础建造技术。这些技术通过详细的勘察、合理的设计规划、严格的生产过程以及精准的现场安装匹配,有效解决了复杂地形带来的施工问题,提高了风电机组施工品质和地基稳定性。

### 参考文献

- [1] 温泰,刘哲锋,袁力军,等. 叶片气动不平衡对锚栓式风电机组基础疲劳性能的影响研究[J]. 风能, 2025, (03): 86-93.
- [2] 张强,常峰,王玉玉,等. 环形风电机组基础底板中预应力技术的应用[J]. 能源与节能, 2024, (09): 42-45+49.
- [3] 魏焕卫,宋志鑫,雷树立,等. 基于残差网络的风电机组基础健康监测数据修复研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (04): 143-150.