

北方山地风电场建设关键技术优化实践研究

任光新

大唐黑龙江新能源开发有限公司，黑龙江 哈尔滨 150000

[摘要]为破解北方山地高海拔、高切变、严寒环境对风电场建设的制约，提升风电开发的经济性与安全性，文中以黑龙江勃利250MW风电项目、河北丰宁抽水蓄能配套风电场为研究对象，系统分析山地风电场在资源评估、微观选址、施工组织及生态保护中的核心技术难点。通过整合GIS三维建模、WASP尾流模拟、PSO算法优化等技术手段，提出“精准选址-高效施工-生态适配-寒区抗冻”全流程技术优化方案：选址阶段构建三级评估体系，尾流损失控制在12%以内；施工阶段建立模块化运输与协同吊装策略，解决寒区施工难题；生态保护阶段形成动态防护机制。实践表明，优化方案可使风电场年发电量提升11.5%，施工周期缩短18%，水土流失控制率达92%以上，度电成本降低15%。研究成果为我国东北、华北地区山地风电规模化开发提供技术参考。

[关键词]山地风电场；微观选址；寒区施工优化；尾流模型；水土保持；超高塔架技术

DOI: 10.33142/sca.v8i10.18300 中图分类号: TK89 文献标识码: A

Research on Key Technology Optimization Practice of Wind Farm Construction in Northern Mountainous Areas

REN Guangxin

Datang Heilongjiang New Energy Development Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150000, China

Abstract: In order to overcome the constraints of high-altitude, high shear, and severe cold environments in northern mountainous areas on wind farm construction, and to improve the economy and safety of wind power development, this paper takes the Boli 250MW wind power project in Heilongjiang Province and the Fengning pumped storage supporting wind farm in Hebei Province as research objects, and systematically analyzes the core technical difficulties of mountain wind farms in resource assessment, micro site selection, construction organization, and ecological protection. By integrating GIS 3D modeling, WASP wake simulation, PSO algorithm optimization and other technical means, a full process technical optimization plan of "precise site selection efficient construction ecological adaptation cold zone frost resistance" is proposed: a three-level evaluation system is constructed in the site selection stage, and the wake loss is controlled within 12%; Establish modular transportation and collaborative lifting strategies during the construction phase to solve construction difficulties in cold regions; A dynamic protection mechanism is formed during the ecological protection stage. Practice has shown that optimizing the plan can increase the annual power generation of wind farms by 11.5%, shorten the construction period by 18%, achieve a soil erosion control rate of over 92%, and reduce the cost of electricity by 15%. The research results provide technical references for the large-scale development of mountain wind power in Northeast and North China regions of China.

Keywords: mountain wind farm; micro site selection; optimization of construction in cold regions; wake model; water and soil conservation; ultra high tower technology

1 概述

1.1 研究背景

在“双碳”战略驱动下，我国风电产业已从平坦地形向复杂山地延伸，北方山地风能资源开发成为可再生能源利用的重要增长点。据《中国风能资源普查报告》数据，

我国山地丘陵面积占国土总面积的69%，东北大小兴安岭、华北燕山山脉等地区70m高度年平均风速超6.5m/s的区域占比达42%，100m以上高空风速较70m高度提升30%以上。然而，北方山地面临地形复杂、严寒低温（极端气温低至-33℃）、冻土分布广、风切变系数高等

特有挑战：传统风资源评估误差率高达 15%~20%；积雪结冰使施工机械通行效率不足平原地区的 35%；冻土融化引发边坡失稳风险较南方山地高出 50%；植被破坏引发的水土流失面积占施工区域的 25%~30%。以黑龙江勃利风电项目为例，未优化前尾流损失达 18%，单台风机施工周期因严寒延长 25d，综合成本增加 28%。开展北方山地风电场关键技术优化研究，是突破行业发展瓶颈的迫切需求。

1.2 研究现状

国内外学者已针对山地风电技术开展初步探索：选址领域以 WASP 软件与 Jensen、Park 等尾流模型结合为主要方法，但在北方特殊地形条件下，模型对高切变气流与湍流的模拟误差超 12%，难以量化冻土区地形粗糙度对风速的衰减效应。施工技术方面，专用吊装设备改善了作业条件，但北方冬季低温导致设备启动效率下降 30%，运输路径规划尚未形成适配寒区的智能决策系统；传统单管塔在 140m 以上高度的经济性与安全性不足。生态保护方面，现有研究多聚焦单一防护措施，缺乏全生命周期生态修复方案，植被恢复率不足 55%。此外，现有技术体系在寒区抗冻、超高塔架应用等北方特色需求方面存在短板，尚未形成覆盖全链条的技术优化体系，亟需结合工程实践深化。

1.3 研究内容与方法

本文采用“理论建模-案例验证-归纳总结”方法，选取黑龙江勃利 250MW 风电项目（海拔 320m~780m，坡度 15° ~40°，极端最低气温-33°C）和河北丰宁抽水蓄能配套风电场（海拔 850m~1300m，坡度 12° ~38°，冻土厚度 0.8~1.5m）为实证对象。通过建立多维度评估模型，重点研究三方面内容：一是基于机器学习算法优化风资源评估模型，构建微观选址决策系统；二是开发大型设备运输路径智能规划平台，集成模块化超高塔架技术与低温施工防护方案；三是设计三维生态防护体系，形成适配北方干旱半干旱地区的环保与水土保持技术方案。研究过程中通过现场监测数据与模拟结果动态比对，优化技术参数，确保成果实用性。

2 山地风电场建设核心技术难点

2.1 风资源评估与选址精准度不足

北方山地地形复杂，受高切变气流、冻土分布影响，风速、风向空间分布异质性显著。实测数据显示，相同海拔条件下，山脊与山谷风速差值可达 2.5m/s，100m 与 70m 高度风速差值达 1.8m/s，湍流强度波动范围 0.14~0.23。传统测风手段依赖单测风塔，覆盖范围有限，易造成资源

误判；Modified Park 模型在北方陡坡与高切变环境下误差率超 20%，无法精准模拟尾流效应；选址过程中缺乏对冻土区地基承载力、冬季施工可达性等关键约束条件的充分考量，为后续施工与运行埋下隐患。

2.2 施工组织与设备调度难题

北方山地风电场施工受“散、难、险、寒”制约显著。风机间距超 550m，施工点分散，冬季 4 个月积雪致人员设备转场效率较平原项目下降 45%；80t 塔筒因山区急弯陡坡及冰雪路面，破损率达 3.5%。基础施工方面，冻土开挖需爆破破冻，低温环境下飞石控制与振动防护难度大；冬季混凝土浇筑因冻融循环，承台裂缝发生率达 13%。此外，传统单管塔难以满足 140m 以上超高塔架需求，设备调度与施工组织缺乏适配寒区的系统性方案。

2.3 生态保护与水土保持压力

北方山地生态脆弱，风电场建设易引发生态问题。河北丰宁项目初期数据显示，未防护区水土流失模数达 4800t/(km²·a)，远超区域标准；设备运输与爆破产生的 88dB 噪音干扰野生动物活动；干旱半干旱地区植被恢复慢，施工迹地自然恢复率不足 40%。在环保政策趋严背景下，如何平衡施工进度、冬季安全与生态保护，成为北方山地风电建设的关键挑战。

3 山地风电场建设关键技术优化方案

3.1 微观选址与风资源评估优化

3.1.1 三级数据核验体系构建

构建由数据清洗、标准验证、空间补全组成的三级体系：依托气象中心与北方气象站数据，经 Python+MySQL 清洗无效数据；按国标对风速、风向等参数进行验证；运用克里金插值修正冻土区数据。应用后勃利风电场数据可信度从 76% 提升至 96%，为选址精准性奠定基础。

3.1.2 地形适配型尾流模型应用

采用差异化尾流模型优化布局：平坦山脊应用 WASP Park 模型，复杂区域切换 Modified Park 模型，结合 PSO 算法优化风机布局。设定间距、入流角等约束条件，引入 185m 超高塔架技术，充分利用高空高风速资源。优化后勃利项目尾流损失从 18% 降至 9.2%，年发电量提升 11.5%。

3.1.3 现场动态校准机制

实施“勘察-排查-复核”三步校准流程：通过 GIS 构建三维地形模型，标记地质敏感点；现场实测地基承载力、地形坡度等基建参数；联合设备厂家复核机位安全性与施工可达性。河北丰宁风电场通过该机制舍弃 8 个不适应机位、调整 15 个机位布局，风机故障率降低 65%。

3.2 施工过程与设备运维优化

3.2.1 大型设备运输路径优化

建立“评估-模块化-防护”运输体系：利用 GIS 技术评估运输路径可行性，对陡坡路段进行针对性改造；采用塔架模块化设计，整体减重 25%，降低运输难度；配备加热保温装置与实时监控系统，保障低温环境下设备运输安全。应用后勃利项目设备运输破损率降至 0.4% 以下。

3.2.2 吊装作业协同优化

采用主辅吊组合模式应对复杂地形，配备冬季施工保障系统；建立“爆破-清雪-吊装”协同流程，运用微差爆破技术减少冻土开挖对周边环境的影响；通过远程监控系统实时调度，提升吊装作业效率 35%，单台风机安装周期缩短至 10d，较优化前缩短 25d。

3.2.3 混凝土施工质量控制

采用“抗冻-温控-养护”全流程管理方案：选用早强抗冻水泥，掺入 25% 粉煤灰与引气剂，提升混凝土抗冻等级至 F200；设置 3 层冷却水管，将混凝土内外温差控制在 25°C 以内，避免冻融裂缝；浇筑完成后覆盖电热保温毯与防火棉被，采用蒸汽养护 10d 以上。黑龙江勃利项目应用后，承台裂缝发生率降至 1.0%，基础承载力达标率 100%。

3.3 环保与水土保持技术优化

3.3.1 污染源精准控制

施工区设置隔音屏障与移动式降尘设备，将设备噪音控制在 60dB 以下，TSP 浓度控制在 0.5mg/m³ 以内；在临时便道两侧修建沉淀池与集雪池，处理后的废水与融雪水回用率达 85%；合理安排施工时间，避开北方候鸟越冬与陆生动物冬眠期，减少生态干扰。

3.3.2 水土流失动态防护

采用“工程措施+生物措施”组合方案，构建多层次生态防护体系。工程防护层面，依据地形坡度精准施策：在边坡区域按等高线走向修建 U 型截水沟，沟壁采用混凝土预制块加固，有效拦截坡面径流；针对地质条件复杂区域，设置钢筋混凝土挡土墙与抗滑桩，通过三维有限元模拟优化桩间距与嵌入深度，确保结构稳定性。在坡度超过 35° 的陡峭区域，采用生态袋与土工格栅复合防护技术，生态袋内填充保水剂、营养土与草籽的混合基质，分层错缝码砌形成柔性挡墙，土工格栅与锚杆锚固连接，提升坡面整体抗冲刷能力。

生物防护方面，建立“先锋植物-草本-灌木”梯度恢复模式。施工完成后立即开展植被重建，优先种植沙棘、紫花苜蓿等固氮型先锋植物，快速覆盖地表；选用羊草、

披碱草等北方原生禾本科植物，其深根系可穿透压实土层，增强土壤固持力；搭配柠条、红柳等耐旱灌木，形成立体植被群落。同时引入滴灌系统，在植被恢复初期采用智能传感器监测土壤墒情，实现精准灌溉。

动态监测环节，沿风电场施工扰动区域布设 12 个水土流失监测点，采用自动雨量计、径流小区与无人机遥感相结合的监测技术。通过建立土壤侵蚀模数预测模型，将实时监测数据与模型预测结果对比分析，当监测数据偏离阈值 15% 时，自动触发防护措施优化机制。以河北丰宁风电场为例，通过该动态防护体系的应用，水土流失控制率从初始设计的 85% 提升至 92.5%，植被恢复率达到 95%，较传统防护方案缩短 30% 的恢复周期。

4 工程实践效果验证

以黑龙江勃利 250MW 风电项目和河北丰宁抽水蓄能配套风电场（装机容量 45MW）为验证对象，对比优化前后关键指标如下：

表 1 对比优化前后关键指标

指标	优化前 (勃利项目)	优化后 (勃利项目)	优化后 (丰宁风电场)
年发电量 (GWh)	112.8	125.8	98.6
尾流损失率 (%)	18.0	9.2	10.8
施工周期 (月)	20	16.4	15.2
设备运输破损率 (%)	3.5	0.4	0.3
水土流失控制率 (%)	72.3	92.8	92.5
度电成本降低率 (%)	-	15.0	13.2

数据显示，优化方案显著提升了北方山地风电场的经济性、安全性与生态效益，尤其在高切变风资源利用、寒区施工效率与生态修复方面效果突出，验证了技术体系的可行性和实用性。

5 结论

本研究通过理论与实践结合，构建北方山地风电场建设关键技术优化体系。选址上运用三级数据核验、地形适配尾流模型与超高塔架，精准开发高切变风资源；施工时以模块化运输、协同吊装及低温防护，破解寒区施工困境；生态保护制定污染源控制与水土流失防护方案，适配北方生态修复。该体系攻克“高切变、严寒、生态脆弱”难题，为东北、华北同类项目提供技术范本，助力山地风资源绿色开发。

[参考文献]

- [1] 李明. 风电场微观选址及风电机位的布局优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2024.

- [2] 王建华,刘志强.山地风电建设的工程技术难点与解决方案[J].风力发电,2025,31(1):45-52.
- [3] 张晓峰,陈明亮.山地风电场微观选址过程研究[J].可再生能源,2024,42(8):987-993.
- [4] 赵卫东.山地风电项目施工技术难点及解决策略研究[J].工程建设,2025,57(5):78-84.
- [5] 国家能源局.风电场风能资源评估方法: GB/T 37523-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [6] 中国气象局.风电场气象观测及资料审核、订正技术规范:QX/T74-2021[S].北京:气象出版社,2021.
- [7] 张国兴,李红梅.复杂地形下风电尾流效应数值模拟研究[J].太阳能学报,2023,44(3):891-897.
- [8] 陈勇,王磊.山地风电设备运输路径优化与安全控制[J].施工技术,2024,53(12):67-71.
- [9] 青岛华斯壮能源科技有限公司.全球首台 185 米构架式风电塔技术白皮书[Z].2025.

作者简介:任光新(1990.8—),性别:男,民族:汉,籍贯:吉林省松原市,最高学位:学士,职务:风场场长兼支部书记,职称级别:助理工程师,主要研究方向或主要从事工作:风电运行及风电工程建设工作。