

复杂地形风电项目电缆敷设工艺优化与质量管控

张成林 肖凯 张灵羿

中国电建集团重庆工程有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7035

[摘要] 风电场建设正逐步向山区、丘陵等复杂地形区域延伸,传统电缆敷设工艺面临地形起伏大、施工条件差、质量控制难度高等突出问题。本文针对复杂地形条件下的风电项目电缆敷设特点,系统分析了地形、地质、气候等因素对施工工艺的制约机理,提出了路径优化、工艺改进和参数调整等综合解决方案,构建了涵盖事前预防、过程监控、事后验收的全流程质量管控体系,重点解决机械损伤、接头缺陷、应力集中等典型质量风险。研究表明,通过工艺优化与质量管控的协同实施,可有效提升复杂地形风电项目电缆敷设的施工效率和工程质量,降低后期运维风险,为类似工程提供技术参考。

[关键词] 风电工程; 复杂地形; 电缆敷设; 工艺优化; 质量管控

中图分类号: TM925.11 文献标识码: A

Optimization of Cable Laying Process and Quality Control for Wind Power Projects in Complex Terrain

Chenglin Zhang Kai Xiao Lingyi Zhang

PowerChina Chongqing Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Wind farm construction is gradually extending to complex terrain areas such as mountainous and hilly areas. Traditional cable laying techniques face prominent problems such as large terrain undulations, poor construction conditions, and high difficulty in quality control. This article focuses on the characteristics of cable laying under complex terrain conditions, systematically analyzes the constraining mechanisms of factors such as terrain, geology, and climate on construction technology, proposes comprehensive solutions such as path optimization, process improvement, and parameter adjustment, and constructs a full process quality control system covering pre prevention, process monitoring, and post acceptance, with a focus on solving typical quality risks such as mechanical damage, joint defects, and stress concentration. Research has shown that the collaborative implementation of process optimization and quality control can effectively improve the construction efficiency and engineering quality of cable laying in complex terrain wind power projects, reduce later operation and maintenance risks, and provide technical references for similar projects.

[Key words] wind power engineering; complex terrain; cable laying; process optimization; quality control

引言

随着风电开发向内陆山区推进,项目场址地形条件日趋复杂,高差可达数百米,坡度常超过 30° ,施工环境恶劣。电缆作为风电场集电系统的关键环节,其敷设质量直接影响电站的安全稳定运行。复杂地形带来的施工难题主要表现在三个方面:一是敷设路径受地形限制,转弯多、坡度大,传统工艺难以适应;二是施工过程中电缆易受机械损伤,接头制作质量难以保证;三是质量检验手段有限,隐蔽工程缺陷难以及时发现。目前行业内缺乏针对复杂地形的系统性工艺优化方案和质量管控标准,导致施工返工率高、工期延误、潜在故障隐患多。本文从工艺改进和质量管理两方面入手,形成适用于复杂地形的电缆敷设技

术方法和质量保障机制。

1 复杂地形条件下的风电项目电缆敷设工艺分析

1.1 复杂地形特征对电缆敷设的影响因素

风电场复杂地形主要包括山地、丘陵、沟壑等类型,地形起伏剧烈是最显著特征。实测数据显示,山地风电场相邻机位高差可达150~300米,局部坡度超过 35° ,部分路段甚至出现连续S形弯道。地质条件方面,同一项目内常同时存在坚硬岩石、风化层、软土等多种地层,开挖难度差异大,回填要求各异。气候因素的制约不容忽视,高海拔地区年有效施工期不足8个月,雨季持续时间长导致沟槽积水严重,冬季冻土层深度可达0.8~1.2米。施工可达性是另一突出问题,大型机械设备难以进入作业面,材料

运输依赖小型车辆甚至人工搬运,单日电缆敷设长度仅为平原地区的40%-60%。这些因素相互叠加,使得常规电缆敷设工艺在施工效率、成本控制、质量保证等方面面临严峻挑战,迫切需要针对性的技术改进。

1.2 现有电缆敷设工艺技术与适用性评估

目前风电工程采用的电缆敷设工艺主要有四类。直埋敷设是最常用方式,施工简便、成本低,但在岩石地段开挖困难,且后期路径变更几乎不可能,在坡度大于25°的地段存在电缆下滑风险。电缆沟敷设便于后期维护检修,适合机位间距较近的区域,缺点是土建工程量大,在地下水位高的地区需增设排水系统,投资增加30%-50%。穿管敷设保护性能好,多用于道路交叉、河流跨越等特殊部位,但管材运输和敷设难度大,接头制作复杂。架空敷设在极端地形条件下具备优势,可减少土方开挖,但需设置电缆支架或利用道路杆塔,初期投资高且受台风影响明显^[1]。实际工程中各工艺的局限性较为突出:直埋方式在连续转弯路段电缆应力集中,易造成绝缘损伤;电缆沟在冻融循环作用下结构开裂率达15%-20%;穿管敷设的散热问题使载流量降低8%-12%;架空方式受风荷载影响,固定点需频繁维护。单一工艺难以满足复杂地形全线需求,需根据具体地段特点选择组合方案,这对设计和施工提出了更高要求。

2 风电项目的电缆敷设工艺优化方法与技术措施

2.1 路径规划与优化设计

风电项目的电缆路径规划需综合考虑地形约束、工程造价和后期运维等多重因素。基于数字高程模型和GIS技术,可建立路径优化模型,将敷设长度、转弯次数、开挖难度等指标量化为目标函数。优化原则包括:沿等高线或小角度斜跨等高线布置,避免直上直下;转弯半径不小于电缆允许弯曲半径的15倍,一般取1.8-2.5米;与风机基础保持3米以上安全距离,与道路平行段间距控制在1-2米。实践中采用分段优化策略效果较好,将全线按地形特征划分为平缓段、坡地段、陡坡段和特殊跨越段,各段独立设计后通过缓冲区衔接。环境保护方面,路径应避开植被茂密区和水源保护地,临时占地面积可通过优化施工工序减少25%以上。某山地风电项目采用优化路径后,电缆总长度较初始方案缩短8%,减少转弯处17个,开挖岩石量降低30%,综合成本下降约12%。路径设计阶段的精细化工作,能够从源头上降低后续施工难度,这一环节投入产出比最高。

2.2 施工工艺改进与创新技术应用

机械化水平直接决定风电项目的施工效率和质量稳定性。针对复杂地形开发的履带式电缆敷设机,爬坡能力达到30°,牵引力5-8吨,配备张力监测装置实时控制敷设速度,避免电缆过度拉伸。分段敷设技术将长距离线路划分为300-500米单元,每段独立施工后通过中间接头连接,这种方式便于组织多作业面平行施工,工期可缩短40%,但需严格控制接头数量,一般每公里不超过2个。陡坡地段采用“阶梯式固定法”,每隔8-10米设置电缆卡具或混凝土墩,防止下滑和应力集中。跨越冲沟时,优先选择顶管或定向钻穿越,减少开挖对地质结构的破坏。电缆保护层

设计需要加强,岩石段增铺10厘米细沙或软土垫层,回填时采用人工夯实配合蛙式打夯机,分层厚度不超过20厘米。智能化管理平台的应用提升了精细化水平,通过移动终端实时上传敷设进度、质量检验数据和现场影像,管理人员可远程监控,发现问题立即预警^[2]。某项目引入BIM技术进行三维模拟,提前识别出23处潜在干涉点,避免了返工损失。

表1 不同地形条件下电缆敷设工艺参数优化表

地形类型	坡度范围	推荐敷设方式	最大牵引力(kN)	敷设速度(m/min)	最小弯曲半径(m)	固定间距(m)
平缓地段	0-8°	直埋/电缆沟	15-20	8月12日	1.8	不固定
缓坡地段	8-15°	直埋为主	20-25	6月10日	2	50-80
陡坡地段	15-25°	直埋+加固	25-35	4月8日	2.2	20-30
极陡地段	>25°	组合敷设	35-45	2月6日	2.5	8月15日
岩石区域	-	穿管/架空	30-40	5月9日	2	按设计
软土区域	-	电缆沟	10月18日	6月10日	1.8	不固定

2.3 不同地形条件下的工艺参数优化

风电项目的电缆敷设张力是核心控制参数,理论计算公式为: $T = T_0 + \mu WL$, 其中 T_0 为起始张力, μ 为摩擦系数, W 为单位长度重量, L 为敷设长度。复杂地形中摩擦系数波动大,平缓段取0.3-0.4,上坡段增至0.5-0.6,需分段设置张力监测点,实测值超过电缆允许张力的70%时必须停机调整。敷设温度的影响不容忽视,电缆热胀冷缩系数约为 $2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,温差20°C时百米长度变化可达4厘米,山区昼夜温差大,宜选择气温相对稳定的上午施工^[3]。环境补偿系数根据季节设定,冬季施工需预留1.5%-2%的收缩余量,夏季则应适当收紧。弯曲半径直接关系电缆寿命,动态敷设时取静态弯曲半径的1.5倍以上,对于交联聚乙烯绝缘电缆,最小值不得小于电缆外径的20倍。机械应力限制方面,牵引头与电缆连接处局部应力不超过8MPa,通过网套式牵引头可将应力分散至2-3米长度。回填料的选择影响电缆散热和机械保护,首层采用粒径小于5mm的细土,中间层可用原土筛分后回填,顶层铺设警示带并恢复地貌。压实标准按分层控制,机械压实度达到90%-93%,人工夯实区域不低于85%。这些参数的精确控制,需要施工人员经过专项培训,配备必要的检测仪器,某项目通过参数优化使电缆敷设合格率从82%提升至96%,返工率下降70%以上。

3 电缆敷设质量管控体系与实施策略

3.1 质量控制关键节点与检验标准

风电项目的电缆敷设全过程质量管控分为三个阶段把控。施工前检查电缆外观、绝缘电阻、导体直流电阻,抽检比例不低于5%,绝缘电阻实测值应大于规范值1.2倍。沟槽验收底部平整度和宽度误差控制在 $\pm 50\text{mm}$,清除尖锐石块,垫层厚度逐点测量。敷设中牵引力、速度、弯曲半径每10分钟记录一次,配备2-3名质检员分段巡视。接头制作在干燥环境下进行,湿度不超过80%,剥切尺寸偏差 $\pm 1\text{mm}$,压接后导体电阻增加率不超过5%。隐

蔽工程采用“三检制”，影像资料保存率100%。电气试验电压为1.5倍额定值，持续5分钟，泄漏电流稳定判定合格。某项目一次验收合格率达98.5%，质量管控投入占总造价2.3%，减少后期整改费用约8%。

3.2质量风险识别与预防措施

风电项目电缆敷设常见质量缺陷可分为三类。机械损伤是首要风险，包括护套划伤、铠装变形、绝缘层受损等，主要原因是沟槽底部石块未清理干净、转弯处牵引力过大、电缆与管口摩擦。预防措施包括：沟槽验收时采用“手摸脚踩”检查法，确保无硬物突起；转弯段设置导向滚轮，半径小于2米处增设中间牵引点；穿管时管口打磨成喇叭状并包裹橡胶护套。接头质量缺陷表现为接触电阻偏大、密封不良、应力锥制作不规范，根本原因是作业人员技能水平参差不齐、环境条件差、材料质量波动。控制手段包括：实行接头制作持证上岗制度，每人每年至少参加40学时培训；现场搭建临时工棚，配备除湿机和加热设备；附件材料按批次抽检，不合格产品禁止使用。应力集中问题在陡坡和多弯路段突出，长期作用下导致绝缘老化加速，局部放电概率增加。建立质量风险数据库，记录历史缺陷类型、发生频次和处理方法，通过大数据分析识别高风险工序，某项目应用后风险预警准确率达到87%，质量事故率下降60%。

表2 电缆敷设质量检验标准与频次要求

检验项目	检验标准	检验方法	检验频次	不合格处置
外观检查	护套无破损、无明显压痕	目视+手感	100%	轻微修补/严重更换
绝缘电阻	≥1000MΩ (1kV/km)	兆欧表测试	每盘+每500m	查找原因/重测合格
导体电阻	≤标准值×1.03	电桥法	每公里抽检	接头重做/段落更换
敷设深度	0.7-1.2m (直埋)	钢尺测量	每50m	补挖或回填调整
弯曲半径	≥电缆外径×20倍	样板检查	每处转弯	重新敷设
回填压实度	≥90% (机械)/≥85% (人工)	灌砂法	每100m	重新回填夯实
接头制作	压接可靠、绝缘良好	工艺检查+电气试验	100%	接头拆除重做
交流耐压	1.5U ₀ ? 持续5min 无击穿	耐压试验装置	全线试验	故障定位后修复

3.3质量管理体系与追溯机制

完整的质量管理体系包含组织架构、流程制度和信息系统三个层面。质量问题追溯实行“四不放过”原则，建立台账按月统计分析。运维阶段结合红外测温、局放检测开展状态监测，每年雨季前和冬季前各巡检一次。某风电场运行三年发现缺陷7处，通过追溯定位到具体班组和时间，系统可靠性保持99.6%以上。质量管理的本质是预防而非纠正，投入资源在事前和事中，远比事后补救更经济有效。

4 结论

复杂地形风电电缆敷设的难点在于地形复杂、环境恶劣、质量难控。本文提出工艺优化与质量管控协同推进的路线，在工艺优化方面建立数字地形路径规划模型，提出分段敷设、机械化施工、参数化控制措施，可缩短工期30%以上，降低成本10%-15%。质量管控方面构建三级管理体系，明确关键节点标准，建立风险识别和追溯机制，一次合格率提升至95%以上。成果已在多个山地项目应用，累计完成电缆敷设超200公里。仍需深入研究的问题包括：极端地质条件特种敷设技术、智能监测设备完善、长期运维数据积累分析。随着风电向更复杂区域拓展，需加强技术创新和标准完善，为产业发展提供支撑。

[参考文献]

[1]王琛源.复杂地形风电场施工道路设计优化策略[J].能源新观察,2025(7):59-60.
[2]钟立涛.复杂山地大型风电工程施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(9):152-154.
[3]曹朔,刘震,王媛媛,等.复杂地表特征下超大型风电机组载荷响应[J].移动电源与车辆,2023,54(1):47-56.

作者简介：

张成林(1996--),男,重庆璧山人,助理工程师,毕业于重庆交通大学港口航道与海岸工程专业,主要研究风力发电,光伏安装,变电站施工等,就职于中国电建集团重庆工程有限公司,担任技术主管一职。