

复杂山地风电场大部件运输道路拓宽与转弯半径优化技术

唐泽海

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 四川 成都 611130

【摘要】：复杂山地地形起伏大、地形遮挡多，极易造成运输卡顿、车体刮蹭、车辆侧倾等安全隐患，影响山地风电工程建设进度和施工安全。本文根据山地风电场地形特点和大件运输车辆通行特点，对山地道路通行瓶颈问题进行系统分析，提出有针对性的道路拓宽改造和技术方案。经过实践证明，该优化技术可以有效地提高山地风电场大件运输通行能力，降低运输安全风险和工程改造成本，可以给同类山地风电项目道路改造工程提供技术参考。

【关键词】：复杂山地；风电场；大部件运输；道路拓宽；转弯半径；线形优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.088

1 复杂山地风电场道路通行现存核心问题

1.1 道路路面宽度不足，通行余量匮乏

山地风电场原始道路建设标准低，初始路面宽度大多在3.5~4.5米左右，只能保证小型施工车辆通行。大件运输车辆装载风机叶片、塔筒之后，整体通行宽度急剧增大，车身两侧留下的安全余量非常小。同时山地道路大多面临山体、沟壑的限制，单侧或者双侧受山体、沟壑影响，可拓宽的空间很少，直线段通行已经勉强，弯道处极易发生车体与山体边坡、护栏刮蹭的情况，不能满足大件运输的安全通行规范要求。

1.2 转弯半径偏小，线形适配性差

转弯半径是决定大件车辆能否通过的主要参数。山地道路由于地形高差、山体走向的限制，有很多小半径回头弯、急弯路段，原有的弯道最小转弯半径一般小于25米。大件运输车辆轴距大、转弯半径小、转向反应迟缓，小转弯半径会引起车辆转弯内、外轮差过大，造成车辆行驶时不断倒车调整姿态，大大降低了运输速度，并且增大了车辆侧翻和设备偏移的安全隐患。

1.3 道路配套设计缺失，通行稳定性不足

大部分山地改造道路只考虑路面拓宽，不考虑弯道超高、路面横坡、边坡防护等配套设计。弯道处没有合理的超高，车辆转弯时侧向受力不均，容易造成侧向滑移的趋势。部分拓宽路段路基压实度不够，边坡开挖之后没有立即做防护施工，长时间受到车辆荷载和雨水冲刷的影响，容易引发路基沉降、边坡溜塌、路面破损等状况，对道路整体承载能力及通行安全性造成不利影响。

2 大部件运输道路优化核心原理与参数标准

2.1 大件车辆转弯通行机理

山地风电场大件运输大多使用后轮转向专用半挂车，车辆

转弯时会存在明显的车身外摆、内轮差现象。车辆转弯时车身外侧最大摆动距离、内侧最小通行范围决定弯道的通行宽度、转弯半径。稳态转弯时，车辆转弯轨迹是连续的圆弧，最小转弯半径与车辆行驶速度、路面侧向附着力、路面超高有关。合理的转弯半径可以有效地抵消车辆转弯产生的离心力，减小车身的偏移量，保证行驶的平稳性。

2.2 核心设计参数确定

最小平曲线半径按运输控制车速、路面超高率、侧向力系数综合计算得出，适用于山地低速重载运输。路面拓宽宽度按照大件设备最大外廓尺寸、车辆外摆值、安全余量综合来确定，还要考虑路基稳定性及地形适应性。根据工程实践确定核心优化参数标准，大件运输控制车速不大于15公里每小时，弯道最小转弯半径不小于40米，常规直线路段路面拓宽到6.5米，弯道路段根据半径大小增设加宽值，最大加宽宽度不大于9米。弯道超高率控制在4%~6%，路面横坡保持在2%左右，保证车辆转弯侧向稳定。

3 道路拓宽与转弯半径优化关键技术

3.1 差异化道路拓宽技术

根据复杂山地地形的不同，采取不同的拓宽方式，防止统一拓宽造成资源浪费、地形破坏。地形开阔、无沟壑遮挡的直线路段，采用双侧对称拓宽的方式，均匀提高路面通行宽度，改善行车视野。对临山临崖、地形狭窄的弯道路段，用外侧单侧拓宽的方式，依靠外侧空旷地带来扩大通行空间，减少内侧山体开挖量，保护原生山体植被，缩减边坡防护工程。拓宽施工过程中严格控制路基施工质量，对拓宽区域基底进行清理、换填、分层压实。拓宽路面与原有路面采用错缝搭接的方式连接，搭接宽度不小于50cm，防止路面裂缝、沉降不均等问题的出现。

3.2 弯道半径精细化优化技术

对山地小半径急弯、回头弯等瓶颈路段，用半径扩大、线形顺接、裁弯取直相结合的方式进行优化。对于地形条件允许的弯道，采用外侧开挖、内侧修整的方式增大平曲线半径，将原来的弯道改造成符合大件通行标准的圆弧弯道，消除轨迹突变。对于地形极其狭窄、无法大幅度扩大转弯半径的回头弯路段，采取局部裁弯取直的方式，改变弯道圆心的位置，改变圆弧的形状，缩短车辆转弯行驶的距离。另外需要对弯道线形做精细化顺接设计，改善直线与曲线、曲线与曲线之间衔接过渡，设置适当的缓和曲线消除线形突变点，保证车辆行驶轨迹连续平滑。

3.3 边坡防护与道路加固配套技术

道路拓宽、弯道开挖会破坏原有的山体边坡稳定性，应同时采取防护加固措施。对于土质边坡、风化岩边坡，用锚杆框架梁结合植草防护的方法来固定边坡岩土体，防止雨水冲刷造成坍塌。对岩石边坡、陡坡路段用挂网喷浆防护，提高边坡整体强度。所有拓宽改造路段边坡均设置截排水系统，边坡顶部设截水沟，底部分设排水沟，防止雨水滞留浸泡路基边坡。对于经常通过的重载车辆主要路段，对原来的路面进行加固处理，采用沥青薄层罩面或者水泥混凝土加厚铺装的方式提高路面的承载能力，减少路面破损、沉降等病害，保证大件运输长期安全通行。

4 工程案例应用与效果分析

4.1 工程概况

本文以西南某复杂山地风电场工程为例进行研究，风电场总装机容量 50MW，共有 12 台 4.2MW 风力发电机组，风机叶片最长 78 米，单节塔筒最重 52 吨。项目场址处于山地丘陵地带，地形最高点高出地面 210 米，场内已有的施工道路总长为 8.6 公里，道路弯道较多，共有大小弯道 32 处，其中半径小于 25 米的急弯有 18 处，原有的路面宽度为 3.5 米到 4.5 米，不能满足大件运输的要求。项目使用本文优化技术对道路拓宽和弯道改造进行系统优化，得到道路线形和通行参数的改善。

4.2 改造方案参数对比

根据项目地形条件和运输要求，制定出详细的改造方案，

对全场道路进行分级优化，核心路段改造前后参数见表 1。

表 1 改造方案参数对比

路段类型	改造前参数	改造后参数	优化方式
直线常规路段	路面宽度 4.2m， 路基压实度 93%	路面宽度 6.5m， 路基压实度 96%	双侧拓宽、 路基加固
普通弯道路段	转弯半径 20 至 25m，无超高，路 面宽度 5.0m	转弯半径 40m， 超高 5%，路面宽 度 7.5m	外侧拓宽、 半径扩容、 超高设置
回头弯瓶颈路段	转弯半径 15 至 20m，线形突变， 路面宽度 4.0m	转弯半径 35m， 增设缓和曲线， 路面宽度 8.5m	裁弯取直、 单侧拓宽、 线形顺接

4.3 应用成效分析

本项目以道路拓宽、转弯半径系统性改善为途径，完全解决山地道路大件运输通行难题。改造后全场所有路段都可以满足 78 米叶片、超大吨位塔筒的安全通行，车辆不需要倒车调整姿态，单次大件运输通行时间由原来的平均 90 分钟缩短到 35 分钟，运输效率提高 61%。从长期运行效果来说，经过优化的道路线形流畅、通行稳定，可以满足施工期大件运输的需求，也可以适应后期运维车辆的长期通行，大大降低了道路的运维成本，综合经济效益和生态效益明显。

5 结语

由于复杂的山地地形造成道路宽度不够、转弯半径小、线形不适应，成为风电大件安全运输的主要问题。本文所提出的差异化道路拓宽、弯道半径精细化优化、配套防护加固一体化技术体系，精准匹配山地风电场复杂工况，较好地解决了传统道路改造粗放、通行安全性差、改造成本高问题。经过工程实践的检验，该技术方案优化效果明显、实用性好，可以有效地提高山地风电场大件运输通行效率和安全系数，节省工程投资，保护山地生态环境，可以给国内同类复杂山地风电项目道路改造和线形优化提供可靠的参考，具有较好的推广应用前景。

参考文献：

[1] 齐花炳.拓宽道路路基变形特性及土工格栅处治研究[J].工程建设与设计,2026,(7):108-110.
[2] 占莉.城市道路路基拓宽的损坏模式和设计标准[J].大众标准化,2026,(3):60-62.
[3] 秦登伟.道路拓宽改造工程质量控制关键技术研究[J].交通科技与管理,2026,7(2):119-121.