

风电大型设备运输对山地道路设计参数的影响研究

周翔

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 为了识别风电大型设备运输条件下山地道路的关键受限因素, 以典型山区风电场建设道路为例, 研究运输车组包络、纵坡受力与横向空间约束对道路几何参数的影响机制, 并提出平纵横要素的优化配置体系。结果表明, 基于包络重构与受力校核的设计参数可显著改善急弯半径不足、连续大纵坡比例偏高及横向安全裕度不足等问题, 验证道路在复杂地形中的运输适应性与结构安全性得到明显提升。

关键词 风电运输; 山地道路; 几何设计参数; 包络分析

中图分类号: TM61; U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.001

0 引言

大型风电机组装运规模持续扩大, 超长、超重构件的陆上运输愈发成为制约山地风电开发的重要环节。传统山区道路的线形、坡度及横向空间多以常规车辆特性为基准, 其安全裕度与力学边界难以满足特殊运输车组的包络需求, 导致工程建设阶段出现通行受限、改扩成本上升与安全风险累积等问题。深入揭示风电大型设备运输条件下的道路设计约束, 并构建适应复杂地形与极端工况的参数体系, 对于提升山地风电项目整体建设效率与运行安全具有关键价值。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

某风电项目位于典型山地丘陵地带, 场址海拔区间变化较大, 道路沿线高差在 120 ~ 380 m 之间, 坡面陡峭、地形起伏频繁, 路线需穿越多处山脊及 V 型沟谷, 整体地形条件限制明显。项目规划安装的风电机组额定功率多在 3.6 MW 以上, 其叶片长度普遍超过 100 m, 塔筒单段最大直径接近 4.5 m, 机舱运输总重量超过 90 t, 运输车组总长接近 80 m, 对道路空间条件和线形控制提出了较高要求。施工区域现状道路多为林区作业道和乡村简易路, 路基宽度普遍不足 5 m, 最小平曲线半径多小于 20 m, 纵坡变化频繁且局部坡度超过 9%, 难以满足超长叶片与重载设备的运输条件。为保障重型车辆、长大件运输车及挂车组合的通行安全与稳定性, 拟依托既有道路开展必要的路线复核、几何参数核定及局部路段的改扩建工程。

1.2 运输设备特性参数

本项目风电设备运输主要采用叶片工装牵引车、塔筒液压多轴平板车及机舱重载组合挂车等山地专用运输装备。运输车辆整体呈现“超长、超重、高重心、多轴组”的特征, 其中叶片单件长度普遍达到 100 m 以上, 进入场区后需更换为具备强牵引力的定制牵引车组, 匹配专用转盘支架及后轮自适应跟随系统, 整车组合总长接近 85 m, 转弯时尾部外摆显著增强。塔筒与机舱运输多采用 8 ~ 10 轴液压悬挂式平板车, 单组车重超 120 t, 轴载控制在 10 t 左右, 对路基承载能力与路面横坡设计形成直接约束。整体运输高度考虑车架、托盘结构及构件尺寸后一般控制在 5.5 m 左右, 对沿线净空构造(涵洞、门架、电缆)及边坡安全距离提出更高要求^[1]。

2 大型设备运输对道路设计参数的影响分析

2.1 平面线形影响分析

在风电大型设备运输条件下, 道路平面线形首先受到超长、超大组合车辆转弯包络的显著制约, 车辆总长接近 80 m、轴距超过 20 m, 使最小转弯半径远大于常规山地公路设计取值。现状林道中普遍存在最小平曲线半径小于 20 m 的急弯, 当特种运输车组进入此类弯道时, 内轮差和尾端外摆将导致车辆包络线大幅侵入对向车道甚至路缘外侧, 迫使道路在平面上必须通过加大弯道半径、延长缓和曲线以及对弯道外侧进行必要加宽来适配运输需求^[2]。结合设备几何参数与车辆转向特性, 可通过平面线形校核确定不同车速和

作者简介: 周翔(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源项目风电道路设计。

弯道半径下的车辆包络范围并形成“道路中心线—车辆外轮廓—边坡或防护构造物”的几何关系,如图1所示,其中清晰反映了在 $R=50\text{ m}$ 、车速 15 km/h 工况下,组合车辆内轮轨迹、外轮轨迹及叶片前端包络之间的相对位置变化。由此可见,平面线形的曲线半径、缓和曲线长度以及直曲组合方式不再仅以常规汽车行驶舒适性和安全性指标为控制,而是受到大型设备运输包络、会车条件和边坡稳定空间的综合影响,并将对纵断面控制及横断面布置形成联动约束。

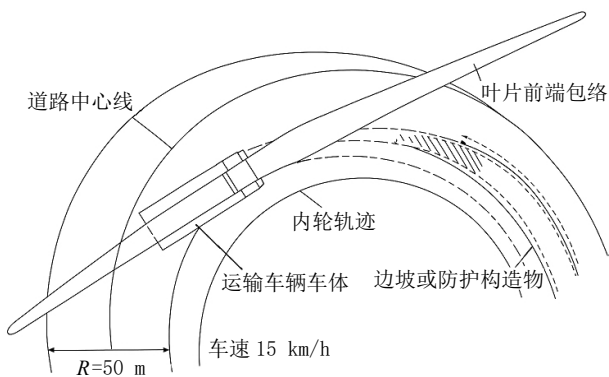


图1 大型风电设备运输车辆平面转弯包络关系

2.2 纵断面影响分析

在大型风电设备运输条件下,道路纵断面设计首先受到车组总质量与牵引性能的联合约束。多轴平板车与叶片运输车组合总重可超过 120 t ,在山地路段纵坡增加时,沿线路向分力显著增大,使得可采用的最大纵坡值远低于常规二级公路经验控制指标^[3]。若以牵引力平衡关系近似表示重载车在坡道上的运行条件,可写为:

$$F_t = G(i + f) \quad (1)$$

式(1)中, F_t 为车辆可提供的牵引力, G 为车组重力, i 为纵坡, f 为滚动阻力系数。在车组总质量给定且牵引能力接近极限时,纵坡参数的微小变化即会造成牵引力需求成倍放大,从而直接限制最大纵坡和连续长大坡段的布设长度。车辆离地间隙仅为 $0.25 \sim 0.35\text{ m}$,对竖曲线变坡点处的“托底”风险极为敏感,要求在纵断面设计中对凹形竖曲线半径和坡段组合进行专门校核。此外,重载车辆在下坡段制动距离显著增加,安全视距与制动视距控制反过来影响纵坡转换位置和高程布设,使纵断面几何形态与运输工况形成紧密耦合,也为横断面及构造物设计提供约束边界。

2.3 横断面影响分析

在大型风电设备运输条件下,道路横断面设计受到车组宽度、叶片外摆包络以及多轴平板车受力分布

的共同控制,其敏感性远高于常规公路的几何参数布设。由于运输车组整体宽度通常在 $3.2 \sim 3.5\text{ m}$,且叶片在小半径弯道处存在外摆加宽需求,使道路行车道宽度与路肩布置必须满足“车辆宽度+车体摇摆量+包络富余”的综合要求^[4];在下弯和逆坡组合路段,车辆重心高度可达 4.5 m 左右,侧向离心力增大会加剧车辆向外侧偏移,对横坡值及横向稳定性形成直接约束。

3 道路设计参数优化建议

3.1 平面线形优化

在平面线形优化上,应将大型风电设备运输车辆的转弯包络和侧向动力学条件同步引入路线设计控制中,通过“设计车组—控制半径—加宽量”一体化校核确定合理的平曲线组合。针对前文分析中总长接近 80 m 的运输车组,可在限定运输设计速度的基础上,采用公路路线设计中常用的最小平曲线半径计算式:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(e+f)} \quad (2)$$

式(2)中, R_{\min} 为最小平曲线半径, V 为运输控制车速(km/h), e 为超高率(取 $0.04 \sim 0.06$), f 为侧向力系数(一般取 $0.10 \sim 0.12$),在保证侧向稳定的前提下,以车辆包络分析结果对理论 R_{\min} 进行修正,并结合叶片前端和尾部外摆确定弯道外侧加宽值^[5]。为便于工程应用,可按图1的包络校核结果和规范限值整理平面线形优化建议。

3.2 纵断面设计优化

在纵断面设计优化方面,需要将重载运输车组的牵引与制动能力、离地间隙及视距条件同步转化为纵坡值、坡段长度和竖曲线半径的控制指标,通过纵断面参数的精细化约束降低运输工况下的纵向风险。针对总重超过 120 t 、控制车速一般不大于 20 km/h 的风电运输车组,宜在现状山地地形条件允许的前提下,严格压缩长大纵坡的坡度与长度组合,并在坡段转换位置布设足够半径的竖曲线,以兼顾底部托底控制和驾驶员视距需求。不同工况下建议采用的最大纵坡值、极限纵坡、连续坡段控制长度和凹形竖曲线最小半径,如在运输控制车速 15 km/h 、山地重载工况下,最大纵坡宜控制在 6% 以内,单一连续坡段长度宜小于 250 m ,凹形竖曲线半径宜不小于 800 m ;在局部受地形强烈制约的路段,则应通过增加变坡点数量、缩短单一陡坡长度等方式,综合调整纵断面线形,为横断面加宽、防护结构布设及排水系统设计预留合理的高程与空间条件。

3.3 横断面设计优化

在横断面设计优化方面,应在满足大型风电设备运输车辆包络的前提下,对行车道宽度、路肩布置、横坡控制及边坡与防护体系进行整体重构,使横向空间既满足通行安全,又兼顾结构受力与排水需求。结合设备宽度 3.2~3.5 m 及叶片外摆特征,沿线宜以“单向重载通行+预留避车带”的组织方式为基础,将主行车带设计为不小于 4.5 m 的有效宽度,并在外侧布设 0.75~1.50 m 的安全带和必要的防护栏空间,使车辆在小半径弯道、超高及不利风向工况下仍保持足够的横向余量。横坡值宜在满足排水条件与侧向稳定之间取得平衡,重载路段可控制在 2.0%~2.5% 区间,并通过路拱型式和边沟高程保证雨水快速排出,避免路面局部积水削弱结构承载力。为直观体现各横向要素的空间关系,可构建如图 2 所示的组合形式,在图中明确主行车带、外侧加宽带、安全带、路缘带、边沟及防护栏的相对位置及尺寸关系,在此基础上再结合纵断面高程与边坡稳定要求,对临崖、陡坡等特殊路段的横断面进行进一步细化。

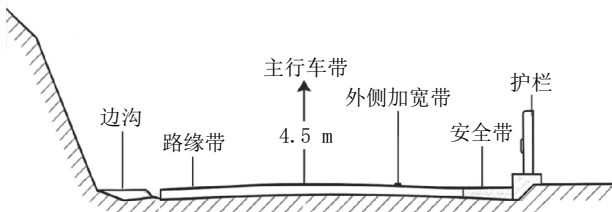


图 2 风电设备运输条件下山地道路横断面优化

4 工程实施效果验证

4.1 优化方案实施情况

在工程实施阶段,针对风电设备运输提出的三项设计参数优化建议已分阶段纳入改扩建施工流程。在平面线形方面,重点对 R 小于 50 m 的急弯路段开展现场转弯包络校核,并依据图 1 所示轨迹关系重构中心线走向与外侧加宽结构,通过爆破修坡、填方平台扩展等方式将关键弯道曲线半径拓展至 60 m 以上,并配套设置缓和段以改善转向过渡。纵断面优化主要集中在重载牵引受限的连续陡坡区段,实施过程中对既有 3 段平均坡度超过 8% 的路段进行定线微调,通过增加坡段变坡点与削坡处理将纵坡控制至 6% 以内,同时同步调整竖曲线半径以提升变坡处通行安全性。在横断面改造方面,在最小净空不足的临崖段增设外侧安全带及波形防护栏,扩宽主行车带至 4.5 m,并结合设备离地间隙控制对边沟高程与排水坡度作同步整合,确保

横向空间与排水能力兼容,形成了与设备通行特性深度匹配的空间断面系统。

4.2 实施效果评价

经过对典型运输路径的平面线形、纵断面及横断面优化后,工程实施效果在运输适应性、安全边界控制与结构协调性方面均展现出显著改善。以已完成调整的 5 段典型弯道为例,对比优化前后最小转弯半径与外侧净空裕度变化情况,其中最小转弯半径由原均值 43.5 m 提升至 62.7 m,外侧净空平均增加 0.82 m,显著减少车辆外摆侵限风险;纵坡控制区域中,连续大于 6% 的坡段长度比例由改造前的 18.2% 降至 9.4%,对应制动视距与底部离地安全余量得到实质性提升;在横断面方面,通过调整路拱型式与边沟断面结构,路肩排水通畅度提升明显,边坡稳定性也在结构复核中保持稳定安全状态。上述对比结果反映出本次道路设计参数优化措施在保障运输安全性与结构匹配性方面具备良好的应用成效。

5 结束语

风电大型设备运输对山地道路几何设计的约束呈现系统性与结构性特征,平纵横多要素需在包络需求、受力条件及安全冗余之间实现重新平衡。尽管提出的参数优化体系经工程验证具备适用性与可操作性,但受制于地形差异、运输装备更新及极端工况的不确定性,仍存在指标泛化范围有限的局限。未来有必要在连续空间建模、仿真推演与多源监测数据融合方面进一步深化,以构建可适用于不同山区场景的动态设计与评估机制。

参考文献:

- [1] 简贵有.复杂山地大型风电项目基础与风机设备施工技术研究[J].科技视界,2025,15(25):54-57.
- [2] 李典麒,颜宇光,刘杰.复杂山地风电场道路土石方工程量控制因素分析[J].电力勘测设计,2025(06):1-5,11.
- [3] 吕玉善,刘昕冲,夏莲.山地风电场设备运输车辆及道路研究[J].中国电力企业管理,2021(36):82-83.
- [4] 左得奇,刘国华,杨光,等.复杂山地条件下光伏场区道路设计优化与标准选取探讨[J].四川建筑,2025,45(03):79-83.
- [5] 谭明洪,张朝勇,李云天.露天矿山运输道路坡度对矿用卡车油耗的影响分析[J].产业与科技论坛,2025,24(09):39-41.