

Research on the Index of Wind Turbine Blade Transport Interchange on Highways in Gobi Region

Yanyun Chen Wangwang Guo

Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

In recent years, with the increasing global demand for clean energy, wind energy, as a sustainable and pollution-free form of energy, has attracted much attention for its development and utilization. The capacity of individual wind turbines has gradually increased to the megawatt level. At present, traditional highway interchange design mainly focuses on meeting the traffic needs of general vehicles, and there are insufficient considerations for the transportation of special large items such as wind turbine blades. In actual transportation, problems such as small turning radius of overpasses, limited net height, and insufficient bearing capacity often occur, resulting in transportation vehicles being unable to pass smoothly. This not only delays the construction period and increases transportation costs, but may also cause damage to wind turbine blades, affecting the overall efficiency of wind power projects. Therefore, it is of great practical significance to conduct in-depth research on the indicator selection of highway overpasses in the transportation of wind turbine blades in the Gobi region and optimize the design of overpasses.

Keywords

wind power transportation; High-speed interchange; Horizontal and vertical indicators; Hexi Gobi Desert;

戈壁区高速公路风电叶片运输立交指标的研究

陈彦运 郭旺旺

甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 中国·甘肃 兰州 730030

摘 要

近年来,随着全球对清洁能源的需求日益增长,风能作为一种可持续、无污染的能源形式,其开发与利用备受关注。单体风机的容量已逐步提升至兆瓦级别。目前,传统的高速公路立交设计主要侧重于满足一般车辆的通行需求,对于风电叶片这类特殊大件运输的考量存在不足。在实际运输中,常出现因立交转弯半径过小、净高受限、承载能力不足等问题,导致运输车辆无法顺利通过,不仅延误工期、增加运输成本,还可能对风电叶片造成损坏,影响风电项目的整体效益。因此,深入研究戈壁区高速公路立交在风电叶片运输中的指标选择,优化立交设计,具有极其重要的现实意义。

关键词

风电运输; 高速立交; 平纵指标; 河西戈壁

1 引言

近年来,随着全球对清洁能源的需求日益增长,风能作为一种可持续、无污染的能源形式,其开发与利用备受关注。单体风机的容量已逐步提升至兆瓦级别。与此同时,用以配套的风力涡轮机叶片在尺寸上,特别是长度和宽度方面,亦展现出显著的增长趋势。在中国,河西走廊、新疆准噶尔盆地周边以及内蒙古西部等戈壁区域,由于其独特的地理环境,人口稀少、基础设施相对薄弱,高速公路立交作为区域交通网络的关键节点,承载着风电叶片运输的重任,其设计是否合理直接关系到风电叶片能否安全、高效地运抵电场。

目前,传统的高速公路立交设计主要侧重于满足一般车辆的通行需求,对于风电叶片这类特殊大件运输的考量存在不足。在实际运输中,常出现因立交转弯半径过小、净高受限、承载能力不足等问题,导致运输车辆无法顺利通过,不仅延误工期、增加运输成本,还可能对风电叶片造成损坏,影响风电项目的整体效益。因此,深入研究戈壁区高速公路立交在风电叶片运输中的指标选择,优化立交设计,具有极其重要的现实意义^[1]。

一方面,合理的立交指标选择能够保障风电叶片运输的安全性。通过精确计算转弯半径、优化线形设计,可避免运输车辆在转弯时发生刮擦、倾覆等事故;确保足够的净高,防止叶片碰撞立交结构;依据车辆荷载合理设计桥梁、路面承载能力,杜绝路面塌陷、桥梁损坏等安全隐患,切实保护运输人员生命财产安全以及风电叶片这一昂贵设备的完好。

另一方面,有助于提高运输效率,降低成本。适配的

【作者简介】陈彦运(1990-),男,中国甘肃白银人,本科,工程师,从事公路总体路线设计及互通式立交设计研究。

立交设计可减少运输途中的等待、绕行时间，使车辆快速、顺畅地通过立交节点，缩短运输周期，提高风电项目的建设进度；同时，降低车辆损耗、油耗以及人力成本，增强风电产业的市场竞争力，推动其可持续、规模化发展，为戈壁地区乃至全国的清洁能源产业注入源源不断的动力。

2 戈壁区风电产业发展与叶片运输需求分析

2.1 戈壁区风电产业发展现状

戈壁地区凭借其得天独厚的风力资源优势，已然成为我国风电产业发展的前沿阵地。以甘肃酒泉为例，其境内的瓜州、玉门等地被誉为“世界风库”，风能资源理论储量高达 2 亿千瓦，年有效风速时长超过 6000 小时，平均风速可达 6-8 米/秒，如此优越的条件吸引了大规模风电场的落户。截至目前，酒泉已建成 1 个千万千瓦级风电基地和 3 个百万千瓦级光电基地，新能源装机规模持续攀升，累计发电量达数千亿千瓦时，折合标准煤数千万吨，减排二氧化碳近亿吨，在全国地级市中位居前列，对优化能源结构、助力“双碳”目标实现发挥了关键作用^[2]。

2.2 风电叶片特性及运输挑战

风电叶片作为风力发电机组捕获风能的关键部件，具有鲜明的特性，这些特性在为风力发电带来高效转化的同时，也给予运输带来了重重困难，尤其在戈壁地区，运输挑战愈发严峻。

从风电叶片自身特性来看，其最显著的特点便是超长、超重。随着风电技术向大功率、大容量方向发展，叶片尺寸不断增大。常见的风电叶片长度多在 50-100 米之间，目前，玉门市艾朗风电科技发展有限公司生产的最大叶片生产型号为 6WM-94 米陆基风电叶片，但随着国内风电行业的发展，预计未来生产叶片最大可达 8MW-128 米陆基叶片。这种超长、超重的特性使得运输车辆的选型、道路承载能力以及路线规划都需精细考量，常规的运输车辆与道路条件难以满足要求。

风电叶片还具有柔性易损的特性。为了实现高效的风能捕获，叶片设计得较为轻薄，多采用复合材料制成，如玻璃纤维增强塑料（GRP）或碳纤维增强塑料（CFRP）。这些材料在保证叶片强度与轻量化的同时，也使其具有一定柔性，在运输过程中，受到震动、颠簸、碰撞时极易受损，一旦出现裂纹、破损，不仅维修成本高昂，还可能影响风电机组的整体性能与使用寿命^[3]。

3 戈壁区高速公路立交运输风电叶片的关键指标

3.1 运输车辆尺寸

根据玉门市艾朗风电科技发展有限公司提供的目前生产的叶片尺寸，现有后轮转向特种运输车辆后轮轮廓尺寸如下表：

根据风电科技发展有限公司提供的 128m 叶片预计研发

参数，支点间距取 70m，装车长度 137m，根据现有叶片运输参数，128m 叶片运输车后悬 60m，车板宽度为 3.2m。

车辆类型	支点长度（m）	车宽（m）	后悬（m）
83.5m 叶片运输车	45	3.2	45.5
93.5m 叶片运输车	50	3.2	50.5
99.5m 叶片运输车	53	3.2	53.5

3.2 立交匝道几何设计指标

平面线形指标是保障风电叶片运输车辆顺利通过高速公路立交的关键要素之一，其中圆曲线半径与缓和曲线长度起着决定性作用。圆曲线半径直接影响运输车辆的转弯能力。对于风电叶片运输车辆，由于其车身长度通常较长，且搭载的叶片具有超长、柔性等特点，在转弯时需要更大的空间。结合现有运输车辆参数，经与风电叶片运输车队的确认，叶片运输车 3 辆一组，每次 1~2 组，车辆上高速时需临时对立交进行交通管制，即叶片运输车辆所在匝道及其扫尾匝道均无其他车辆通行。考虑未来 128m 叶片的运输需求，匝道在叶片运输车辆通行时，硬路肩无临时停车等需要，临时利用硬路肩宽度。根据单向单车道 9m 宽匝道计算，需要匝道圆曲线半径不小于 178m。考虑到风电叶片不同的运输方向需求，立交匝道的曲线半径均按此半径选取，将造成较大浪费。因此针对单喇叭立交，主要通过路面加宽来解决大型风电叶片的运输需求，同时考虑尽可能为风电叶片运输车辆提供较好的通行宽度，车辆两侧预留侧向宽度为 1m^[4]。

3.2.1 立交匝道加宽值确定

经调查，风电叶片运输特种车辆为后轮导向型，匝道路基宽度加宽值考虑车辆通过时车辆内侧侵入宽度，车辆后悬叶片扫尾宽度不计入路面加宽，但需拆除扫尾范围内的树木等障碍，改移标志标牌等，运输车辆驶入立交时加强运营管理，避免人员、动物、对向来车等产生影响，确保运输安全。

道路圆曲线加宽按照下列公式计算：

$$\begin{aligned} \Delta b_1 &= b_0 - b \\ b_0 &= R_1 - R_0 \\ R_0 &= R_{S2} / \cos \theta \\ R_{S2} &= \cos \theta \times \left[L_0 \times \sin \theta + \sqrt{R_2^2 - (L_0 \times \cos \theta)^2} \right] - b \\ R_2 &= \sqrt{R_1^2 - L_1^2} \end{aligned}$$

式中：L₁—牵引车及前悬长度和（m）；

L₀—后轮转向车轴距（m）；

R₁—牵引车前悬最外侧轨迹圆半径（m）；

R₂—牵引车后轴最外侧轨迹圆半径（m）；

R₀—后轮转向车后轴最内侧轨迹圆半径（m）；

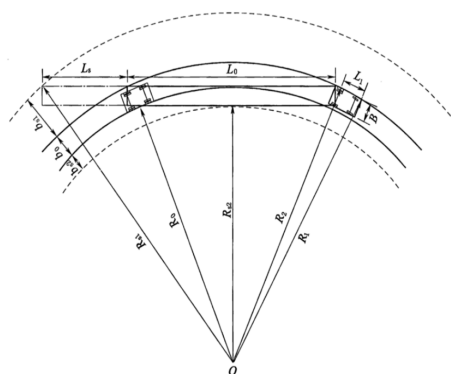
R_{S2}—后轮转向车车体最内侧轨迹圆半径（m）；

b₀—车辆通过最小路面宽（m）；

b—设计车宽（m）；

Δb₁—不考虑外侧扫尾、内侧侵占时的曲线加宽值（m）；

θ—后轮转向车调整角度，sin θ 不大于 L₀/(2R₂)；



后轮转向车运输时道路圆曲线加宽示意图

计算车辆参数:

b—设计车宽 (m)	Ls—后悬叶 片长度(m)	L0—后轮转向 车轴距(m)	L1—牵引车及前 悬长度和(m)
3.2	61	70	6

具体加宽宽度根据立交匝道圆曲线半径计算确定,收费广场超宽车道加宽值为 3.5m,加宽后超宽车道为 8m 宽。

3.2.2 立交加速车道及渐变段长度确定

参考《互通式立体交叉设计原理与应用》(刘子剑著,人民交通出版社,2015.6),若河西戈壁区高速公路设计速度为 100km/h,匝道与主线合流需要的速度为 65km/h,经与特种设备运输公司沟通,特种设备车辆在匝道的运行速度为 10km/h,车辆从 10km/h 加速到 65km/h 需要 20s。

$$V_t^2 - V_0^2 = 2aS$$

$$V_t = V_0 + at$$

式中: V_t —末速度 (m/s);

V_0 —初始速度 (m/s);

a —加速度 (m/s^2);

S —位移 (m);

t —从 V_0 加速到 V_t 需要的时间 (s);

加速车道计算长度取整为 208m,考虑到本项目 8MW+128 米陆基叶片运输装车长度 137m,因此加速车道长度取整 350m。渐变段长度 80m。

3.2.3 立交匝道纵断面核算

按照《风电场工程道路设计规范》(NB/T 110209-2019)、《公路大件运输安全通行评价技术规范》(JTG/T 2213-2023),曲线路段应符合下列规定:大件运输通过凸形竖曲线路段时不应产生顶起失效,通过凹形竖曲线路段时不应产生触头失效和托尾失效;可根据车辆最小离地间隙、竖曲线

半径等参数评价凸形竖曲线路段顶起失效;可根据车辆外廓尺寸、纵坡差、竖曲线半径等参数评价凹形竖曲线路段触头失效和托尾失效。

1) 最小凸型竖曲线半径确定

①运输车辆在凸形竖曲线行驶时,挂车中心与凸形竖曲线中心重合出现“挂底”时,为最不利条件,最大支点间距为 70m,根据特种设备运输公司对运输叶片的车辆实际情况,车板距离地面 0.15~0.2m,车板液压装置可抬高底板 0.15m。

按照不利情况核算,两端支点及车板与地面距离做圆,得出最小凸型竖曲线半径为 2041.82m。

②最小凸型竖曲线半径可按照下式计算:

$$R_{\min} = \frac{L_m^2}{8(b_0 - q_0)} + \frac{b_0 - q_0}{2}$$

式中: q_0 —低平板半挂车底部或货物最小离地距离;

L_m —车支点间最大距离或挂车上货物支点间最大距离;

R_0 —凸形竖曲线半径;

b_0 —低平板半挂车水平放置时车辆或货物底部正常离地距离,按照不利情况取 0.3m;

经计算,凸型竖曲线半径为 2041.82m 时可满足风电叶片运输车辆通行需要。

2) 最小凹型竖曲线半径确定

①假设承载后的半挂车主梁为一条直线,多轴多轮液压悬挂挂车通过的竖曲线半径可按照下式计算:

$$R_p = \frac{L_0^2 + 4h_0^2}{8h_0}$$

R_p ——凸形竖曲线半径, m;

L_0 ——挂车主纵梁长度,取 84m (牵引车及前悬 6m+ 支点间距 70m+ 挂车后悬 8m);

h_0 ——挂车悬架的安全伸缩量,取 0.5m;

经计算,凹型竖曲线半径最小值为 1764.25m。

4 工程案例选取

本研究选取甘肃 G30 连霍高速公路玉门互通立交作为典型案例,深入剖析风电叶片运输过程中的实际情况。该风电项目位于玉门市,目前生产的最大叶片生产型号为 6WM-94 米陆基风电叶片,属于大型风电叶片范畴。其配套的高速公路立交作为连接风电场与外部交通网络的关键枢纽,承担着繁重的叶片运输任务。

近年来,随着风电市场的发展,单体兆瓦增大,随之配套叶片长度、宽度的增大,该立交已无法满足风电叶片运输的需求。对玉门互通式立交的匝道 A、B、E 以及超宽收费车道的宽度进行改造,加宽部分仅为了风电叶片运输车辆通行时的需要,匝道加宽部分不划分车道,社会车辆正常通行

时,加宽部分禁止社会车辆驶入。加速车道均采用延长至350m,渐变段长度提一级采用90m,收费广场超宽车道加宽4m,将现有3.5米整车称更换为4.2米超宽轴组秤。调整玉门市高速收费站新疆方向匝道口导向牌的设置点和导向牌高度,砍除匝道C外侧叶片扫尾范围内树木,满足风电叶片运输的要求



同时对匝道可通行性进行了核算。设计中半径为60m、80m处内侧半径分别为47.75m、72.75m,计算得出所需车道宽度分别为4.38m、4.32m,所需空间宽度分别为9.71m、9.18m。

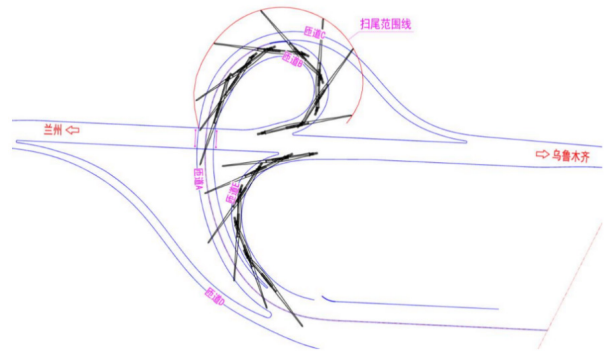
触头失效检验:经核查本项目匝道最大坡度差为3.7%,经计算 $\gamma_1=25.92^\circ > 2.1189=\arctan \Delta i$,满足通过要求。

拖尾失效检验:根据运输公司提供的经验,叶尖装车高度一般是理论值的45%-50%,最小离地2m+尾部车高1.2m=3.2m,考虑0.2m安全预留, γ_2 悬尾角为 2.815° ; α 为车辆最后端突出点处地面向后轮连线,连线AB与车辆或货物悬出部分之间的夹角,经计算为 1.747° 。 $\gamma_2=2.815^\circ > \alpha=1.747^\circ$,故拖尾失效检验满足通过要求。

桥下净空损耗值检验:经核查下穿桥梁匝道竖曲线半径为2600m,经计算, $h_{损}=0.236m$,经核查玉门立交对向分隔匝道下穿G30连霍高速桥梁为30m装配式预应力混凝土箱梁,匝道与桥梁最小净空为5.613m,该处匝道为凹型竖曲线,竖曲线半径为2600m,考虑0.2m安全预留,对向匝道下穿位置运输车辆的最大高度为5.177m,满足风电叶片运输车辆通过要求。

基于6MW-94m、8MW+-128陆基叶片运输需求,项目团队对玉门互通式立交进行了针对性优化改造,并重新规划

运输方案。通过对各关键指标的精细调整,显著改善了运输状况,为后续类似项目提供了宝贵的实践经验。



5 结语

通过玉门风电项目配套高速公路立交的实证案例分析,有力验证了研究成果的有效性。改造优化后的立交,在运输效率上大幅提升,车辆通过弯道与路口的速度显著加快,运输耗时明显缩短;安全保障方面,因道路设施问题导致的事故发生率锐减,切实保护了人员与叶片安全;成本控制上,合理的车辆选型与高效运输降低了单次运输成本与综合成本,为风电企业带来可观经济效益。这些成果不仅为该项目的顺利推进提供了坚实支撑,更为戈壁区乃至类似复杂环境下的风电产业与交通基础设施协同发展提供了可复制、可推广的范例。

参考文献

- [1] 滕振楠,杨枫,唐协,等.雅西高速彝海至荣经路段风电叶片大件运输道路通行安全评价[J].四川水泥,2024,(12):222-225. DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2024.12.010.
- [2] 朱丽,陈文业,谈嫣蓉,等.河西走廊荒漠戈壁风电产业发展优势与前景分析[J].甘肃林业科技,2023,48(03):60-63.
- [3] 陆燕宁,金亚伟,李羲,等.风电叶片用聚氨酯/玻璃纤维混合物热解特性研究[J].太阳能学报,2024,45(11):486-495. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1216.
- [4] 李梦涛.互通式立交平面相关指标的浅析[J].黑龙江交通科技,2020,43(06):87-88. DOI:10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2020.06.049.