

风电设备运输通道线形设计要素分析

陆 纯

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 风电设备运输通道兼具市政道路及风电场进场道路功能,通过调研海上风电机组设备尺寸、运输专用车辆结构参数以及装载要求,明确通道建筑限界,并根据车辆动力性能、转弯行迹及通行需求等,分析平面、纵断面设计要素的取值界限;同时,利用仿真软件模拟超长叶片运输车辆交叉口转弯时的扫掠空间,优化交叉口设计方案,保证风电设备的空间可通行性及安全性。

关键词: 风电设备运输通道;线形设计;间隙失效

中图分类号: U412.32

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0054-05

Analysis on Alignment Design Elements of Wind Power Equipment Transportation Channel

LU Chun

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: The wind power equipment transportation channel has the functions of municipal road and wind farm approach road. By investigating the size of offshore wind turbine equipment, and the structural parameters and loading requirements of the special transportation vehicles, the building limits of the channel are clarified. And the value limits of the plane and longitudinal section design elements are analyzed according to the dynamic performance, turning tracks and traffic requirements of the vehicles. At the same time, the simulation software is used to simulate the sweeping space of the ultra-long blade transport vehicles at intersection, and the design scheme of intersection is optimized to ensure the spatial trafficability and safety of wind power equipment.

Keywords: wind turbine transportation channel; alignment design; gap failure

0 引 言

风能作为一种清洁的可再生能源,是实现“碳达峰”和“碳中和”目标的先锋队、主力军。相较于陆上风电,海上风电具有资源丰富、不占用土地资源、稳定性高、规模效益显著等优势。“十四五”期间,我国东南部沿海各省积极部署海上风电装备产业园规划建设,瞄准海上风电装备全产业链集群方向发展,为海上风电开发提供风电主机、叶片等关键配套,以及塔筒、基础、海缆等设备和组件^[1]。

完善的交通基础设施是园区发展的有力支撑。海上风电产业园区以工业用地、物流仓储用地为主,园区道路以集散交通、沿线服务功能为主,承担风电设备出运地至港口的货运交通,不仅需要满足城市道路相应的技术指标,还应满足风电机组设备运输

的特殊通行需求。

目前,国内行业标准及相关研究主要针对风电场工程进场道路、场内道路与进站道路,对于风电设备常态化运输的风电产业园道路并不完全适用。本文依托某沿海城市海上风电产业园新建项目实例,调研风电机组设备及运输车辆参数,基于道路设计理论,借助相关软件,对园区风电设备运输通道(后文简称通道)线形的设计要素进行分析。

1 海上风电机组设备及运输车辆参数

1.1 海上风电机组设备参数

风电机组设备主要包括塔筒、叶片、主机等。塔筒是风力发电系统的骨架结构,具有超长、超重的特点;叶片是风电机组中的核心部件,具有超长、柔性易损等特点;主机是风机机组中最重的构件。

2023年1月,中国海装、明阳智能先后成功开发研制超大型海上风电机组 H260-18MW、MySE18.X-28X,叶片长度超 140 m。未来,海上风电逐步向大

收稿日期: 2024-08-10

作者简介: 陆纯(1988—),女,工学硕士,工程师,从事道路工程设计工作。

型化、深远海、融合型发展,风电机组功率、叶轮直径、塔架高度、容量系数不断提高。

通过调研园区海上风电设备生产厂家及运输厂商,园区远期超大容量海上风电机组设备参数见表 1 所列。

表 1 超大容量海上风电机组设备参数			
设备名称	尺寸/m	重量/t	备注
塔筒	160	1 100~1 300	根据不同项目定制化设计
叶片	150	80	
主机	18×13×14	600	

1.2 专用运输车辆参数

风电机组设备多为超限、超重物件,其运输专用车辆包括牵引车、挂车。图 1 至图 3 中风电设备的绑扎形式仅为示意。

塔筒一般采用分段设计、制造及运输,单节塔筒长度 18~30 m,采用多轴线液压低平板半挂车运输(见图 1)。

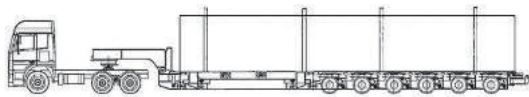


图 1 塔筒运输车辆

叶片运输采用可抽拉式平板半挂车和叶片倒运车(举升车),后者运输成本高,且一般用于山地等空间受限区域。园区主要生产的 150 m 超长叶片可采用六桥 80 m 可抽拉式平板半挂车运输(见图 2)。



图 2 叶片运输车辆

600 t 超大容量主机运输采用自行式平板拖车 (SPMT),基础部件包括 4 轴线货物组及动力头(见图 3)。

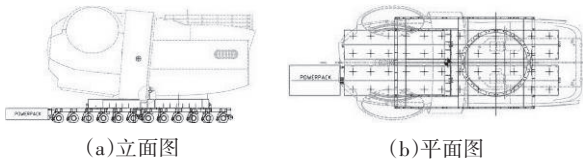


图 3 主机运输车辆

本次研究叶片和塔筒运输牵引车代表车型采用陕汽德龙 F3000,具体参数见表 2 所列。主机运输专用车辆 (SPMT) 具体参数如表 3 所列。

2 道路建筑限界

根据园区设备厂家及出港码头位置确定风电机组设备运输通道,其设计需同时满足城市道路等级相应的设计指标及风电机组设备安全通行要求。

表 2 叶片运输专用车辆参数		
参数	牵引车	挂车
	陕汽德龙 F3000 6×6600 马力	六桥可抽拉式
外形尺寸/(m×m×m)	8.1×2.85×3.81	80×3×1.4 (离地高度)
轴距/m	4.1+1.45	1.8
轮胎规格	14.0 R20	14.0 R20
轮胎数量/只	10	24
前悬/mm	1 725	—
后悬/mm	825	—
接近角/(°)	24.5	—
离去角/(°)	58.2	—
车辆自重/t	30	15
牵引力/kN	200	

表 3 主机运输专用车辆参数		
参数	SPMT	
	PPU (动力组)	四轴线模块车
外形尺寸/(m×m×m)	4.2×2.31×1.1	5.6×2.43×1.5(离地高度)
轴距/m	—	纵向 1.4/横向 1.45
轮胎规格	—	355/50-20
轮胎数量/只	—	16
车辆自重/t	7	18
牵引力/kN	120	

根据表 1 至表 3 中风电机组设备、运输专用车辆的尺寸参数以及设备装载加固要求,园区风电机组设备运输通道净高应≥15 m,净宽≥15 m,道路建筑限界示意如图 4 所示。

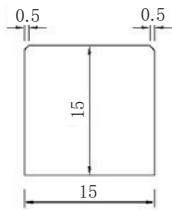


图 4 道路建筑限界示意图(单位:m)

3 平面设计

通道平面设计的关键要素为圆曲线半径及相应的路幅宽度。设计车辆采用空间通过条件最为苛刻的叶片运输专用可抽拉式平板车。车辆行驶速度通常为 5~15 km/h,转弯运动分析可不考虑离心力及弹性轮胎的侧向滑移,以车辆转弯时的行车轨迹控制设计。

根据阿克曼转向几何原理,假定车辆做纯滚动转向时,牵引车前后轴、半挂车后桥中心轴延长线相交于一点 O,即为车辆瞬时转向中心,如图 5 所示。

规范中将牵引车前轴外轮轨迹圆半径定义为汽

车列车的最小转弯半径,即为图中的 $R_{前}$ 。超长叶片运输车辆还需考虑扫尾空间无障碍物,叶尾轨迹圆半径为 $R_{尾}$,取 $R_{前}$ 、 $R_{尾}$ 两者大值作为道路最小圆曲线半径。

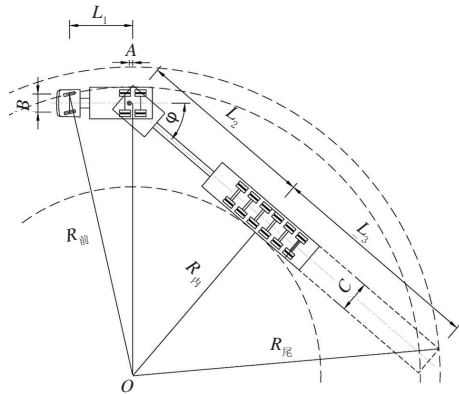


图5 叶片运输车辆转弯行迹

根据图5中的几何关系,具体计算公式如下式所示。

$$R_{内} = L_2 \cdot \cot \varphi - \frac{A}{\sin \varphi} \quad (1)$$

$$R_{前} = \sqrt{L_1^2 + \left(A \cdot \tan \varphi + \frac{L_2 - \frac{A}{\cos \varphi}}{\sin \varphi} + \frac{B}{2} \right)^2} \quad (2)$$

$$R_{尾} = \sqrt{L_3^2 + \left(R_{内} + \frac{C}{2} \right)^2} \quad (3)$$

$$W = R_{尾} - R_{内} \quad (4)$$

式中: $R_{内}$ 为半挂车车体最内侧轨迹圆半径,m; L_1 为牵引车轴距,4.825 m; L_2 为牵引销至半挂车后桥中点的距离,71.5 m; L_3 为半挂车后桥中点至叶片尾端的距离,84.5 m; A 为牵引车鞍座前置距,0.5 m; B 为牵引车转向轮主销中心距离,2.081 m; C 为半挂车宽度,3 m; φ 为牵引车和半挂车的铰接角,70°; W 为路幅宽度,m。

将参数取值代入上述式中计算可得:

$$R_{内}=25.5 \text{ m}; R_{外}=71.3 \text{ m}; R_{尾}=88.7 \text{ m}$$

因此,通道最小圆曲线半径为88.7 m,相应所需要的路幅宽度为63.2 m。

4 纵断面设计

4.1 最大纵坡

根据车辆行驶必要条件,分析运载600 t风电主机车辆的最大爬坡能力。

$$T \geq R_w + R_R + R_I \quad (5)$$

式中: T 为驱动力(牵引力); R_w 为空气阻力; R_R 为道

路阻力; R_I 为惯性阻力。本文基于车辆匀速行驶状态,暂不考虑惯性阻力 R_I 影响;行驶速度仅为5~15 km/h,空气阻力 R_w 可忽略不计。因此,车辆行驶的必要条件可简化为 $T \geq R_R$ 。

$$R_R = G(f + i) \quad (6)$$

式中: f 为滚动阻力系数,沥青路面取值0.02; G 为车辆总重力,6 790 kN; i 为道路纵坡;

将表2、3中车辆结构参数代入公式,计算得出通道最大纵坡为5%。

4.2 竖曲线

车辆在竖曲线路段行驶,需考虑间隙失效条件。间隙失效包括顶起失效、触头及拖尾失效,后两者为同种失效形式。以叶片运输专用可抽拉式平板车为研究对象,分析顶起及拖尾失效情况。

4.2.1 顶起失效

顶起失效是指车辆最低处触碰地面导致无法前行($h' \geq h$),一般发生在凸形竖曲线路段。如图6所示,当 $h' < h$ 时,可避免顶起失效情况出现, h 为车辆最小离地间隙。根据图6中几何关系,进一步可得:

$$R - \left(\sqrt{(r + R)^2 - (0.5l)^2} - r \right) < h \quad (7)$$

式中: r 为轮胎半径,取值0.61 m; l 为牵引车后轴至半挂车前轴的距离,取65 m; h 为车辆最小离地间隙,取0.6 m。

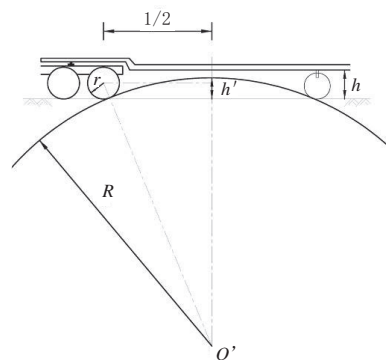


图6 车辆顶起失效图

将相关数据代入式(7),计算可得,最小凸形竖曲线半径 $R_{应} > 880 \text{ m}$,方可避免车辆发生顶起失效。

4.2.2 拖尾失效(凹形竖曲线半径)

拖尾失效是指汽车尾部触及地面无法通行的情况,通常发生在凹形竖曲线路段。该条件下,车辆通过性相关参数有竖曲线半径 R 、竖曲线长度 L 及前后纵坡差 ω 。

考虑风电叶片超长易损特点,叶尾离地安全高度 d 应不小于1 m。道路设计时竖曲线线形通常采

用二次抛物线,车辆在凹形竖曲线下坡行驶过程中,曲率半径逐渐减小,叶尾离地高度在半挂车后轴位于凹形竖曲线端点时达到最小。

本文将前段纵坡视为平坡以简化计算模型。 L 为竖曲线长度,根据规范,城市道路竖曲线长度 $L \geq 50\text{ m}$; L_a 为半挂车后轴至叶尾的距离,本次为 80 m ,按两者的位置关系分两种情况进行研究。

4.2.2.1 $50\text{ m} \leq L \leq L_a = 80\text{ m}$

如图 7 所示, A 为竖曲线端点; B 点为叶尾作前段直线坡投影时与地面的交点; C 点为叶尾地面投影点。

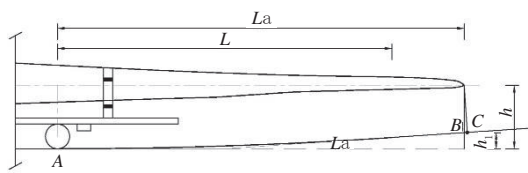


图 7 拖尾失效示意图 ($50\text{ m} \leq L \leq L_a = 80\text{ m}$)

根据图中几何关系可知:

$$d = (h - h_1) \cdot \cos \alpha \geq 1 \tag{8}$$

式中: $h_1 = \omega \cdot \left(L_a - \frac{L}{2} \right)$; $\omega = \frac{L}{R}$; h 为叶片装载高度,取值 4 m 。

代入式(8),整理得:

$$d = \frac{4R - 3200}{\sqrt{L^2 + R^2}} \geq 1$$

4.2.2.2 $L > L_a = 80\text{ m}$

如图 8 所示,此时, h_1 为竖曲线上 B 点竖距,且 $h_1 = \frac{L_a^2}{2R}$,代入式(8)并整理得:

$$d = \frac{4R - 80L + 0.5L^2}{\sqrt{L^2 + R^2}} \geq 1$$

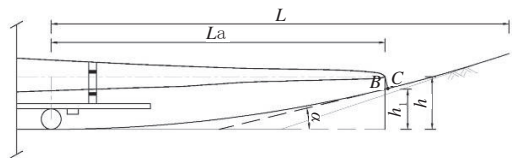


图 8 拖尾失效示意图 ($L > L_a = 80\text{ m}$)

根据公式分析可知, d 与 R 、 L 呈递增关系,当 $L \leq 80$ 时,与 ω 呈非线性递减关系;当 $L > 80$ 时, ω 对 d 几乎无影响。具体分析结果如下:

- (1) 当 $R < 950\text{ m}$ 时, $d < 1\text{ m}$, 均不满足要求;
- (2) 当 $950 \leq R < 1\,060\text{ m}$, 有条件满足,见表 4 右下角阴影区域 ($d \geq 1\text{ m}$);
- (3) 当 $R \geq 1\,060\text{ m}$ 时, $d \geq 1\text{ m}$, 均满足。

实际工程中运用时,首先根据道路设计速度初步确定最小竖曲线半径及长度要求;然后根据前后

坡差值及表 4 数据计算确定满足净高的最小凹形竖曲线半径。

表 4 R 、 ω 、 d 关系判定表

R ω	950	975	1 000	1 025	1 050	1 060
0.08						1.0
0.07						1.0
0.066					1.0	
0.063				1.0		
0.06			1.0			
0.058		1.0				
≤ 0.056	1.0					

4.3 平面交叉口设计

车辆交叉口转弯行迹复杂,难以通过数学几何计算准确分析,本文利用仿真软件 AutoTURN10.1 模拟叶片运输车辆交叉口转弯扫掠空间,研究空间范围内是否存在障碍物,分析对同向、对向和侧向交通产生的交通冲突,并根据分析结果,优化交叉口设计方案,确保风电设备运输空间的可通行性以及安全性。

4.3.1 交叉口空间通行要求

根据风电设备运输要求,叶片运输车辆轮迹区域,不能存在任何障碍;叶片转弯时,尾部扫空区域,离地高度 $1 \sim 12\text{ m}$ 空间内不能有任何障碍,包括路灯、监控、标识牌等设施。

叶片运输车辆轮迹区域(实线部分)由牵引车前悬最外侧轮胎轨迹圆半径 $R_{前}$ 、半挂车后轴最内侧轨迹圆半径 $R_{后}$ 构成;装载叶片车辆尾部扫空区域(虚线部分)由车体内侧侵占 $R_{内}$ 及外侧叶片扫尾 $R_{尾}$ 构成。

4.3.2 交叉口扫掠空间模拟

本工程实例中,车辆在交叉口由西向南右转弯,时速 10 km/h (不考虑多次倒车前进方式)。首先,将表 2 中车辆结构参数输入仿真软件,建立车辆模型,牵引车最小转向角为 20.3° ,装载叶片车辆总长约 160 m ,总宽约 8 m ;以东西向主干路北侧侧石线为行驶边界,仿真软件通过自适应模拟车辆转弯路径,绘制车辆扫掠空间包络线。

根据仿真结果(见图 9),车辆转弯时路面宽度不足,扫尾空间内存在侧分带、公交站台、交通设施等障碍。通过调整缘石半径、施划标线代替物理隔离设施、采用可移动信号灯等措施,优化交叉口设计方案(见图 10),同时,在风电设备运输时,采取相应的交通管制措施,满足风电设备运输车辆通行需求。

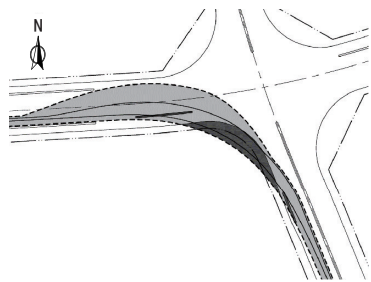


图9 装载叶片车辆扫掠空间(原交叉口方案)

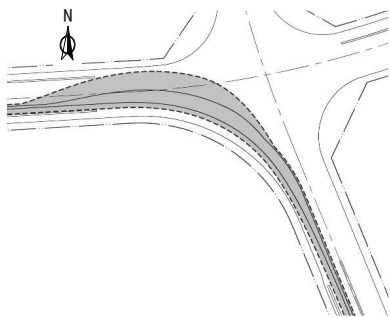


图10 装载叶片车辆扫掠空间(改善后交叉口方案)

5 结 语

本文基于道路线形设计理论,以通过条件最不利的运输车辆为代表车型,根据风电设备运输空间通行需求及运输车辆的动力性能,分析风电设备运输通道线形设计要素的具体控制标准。

(1)根据阿克曼转向几何原理以及车辆转弯行迹,计算得出运输150 m超长叶片的可抽拉式半挂车最小转弯半径即路线最小圆曲线半径为88.7 m。

(2)当园区风电设备运输通道纵坡 $\leq 5\%$ 时,运载风电主机车辆可正常行驶。

(3)为避免车辆在竖曲线路段行驶发生间隙失效,通道凸形竖曲线半径应 > 880 m;凹形竖曲线半径最小值可根据前后纵坡差值计算,同时满足城市道路规范要求最小竖曲线长度以及表4中阴影区域所对应的竖曲线半径。

(4)利用仿真软件AutoTURN 10.1模拟叶片运输车辆交叉口转弯的扫掠空间,直观反映与道路及交通设施存在的冲突,对交叉口设计方案进行优化调整。

本文研究结论可供新建风电设备运输通道设计以及基于现状路网选择满足安全性及通行性的风电设备运输路线提供参考,具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 宋固,杨力,赵磊,等.我国海上风电装备产业园/基地发展走向及建议[J].风能,2022(11):70-74.
- [2] 苑红凯,王新岐,黄文.天津滨海新区重载道路结构设计探讨[J].城市道桥与防洪,2011(2):6-9.

(上接第45页)

改造提升原则,最后结合花都区三条实例道路的非机动车道改造前后的交通运行情况与非机动车交通事故数据变化分析,回顾了花都非机动车道的改造实践经验,总结形成了不同改造策略的适用条件,可为其他城市的非机动车道改造提供经验借鉴。

然而,非机动车道的改造提升工作在实际推进过程中还受现状路网不成体系、道路空间有限、道路交通运行特征混杂、多部门协调程序繁琐等多方面因素影响,非机动车道改造困难、难以成网。因此,建议推进形成新建或改建道路100%设置非机动车道制度,避免后期道路因硬件条件不足而难以

改造设置非机动车道。

参考文献:

- [1] 广州市规划和自然资源局.广州市规划和自然资源局发布2023年广州市交通发展年度报告[EB/OL].(2024-07-31)[2024-08-01].
http://ghzyj.gz.gov.cn/xwzx/tzgg/content/post_9784265.html.
- [2] 广州市交通运输局.广州市非机动车道改造提升技术指引[R].广州:广州市交通运输局,2023.
- [3] 广州市交通运输研究院有限公司.广州市城市道路车道宽度设置标准研究[R].广州:广州市交通运输研究院有限公司,2023.
- [4] 周晋冬.针对人非共板断面的慢行精细化提升研究——以上海临港项目为例[J].城市道桥与防洪,2020(12):15-19,29.
- [5] 杜先汉,钱学峰.新形势下非机动车交通系统设计探讨[J].城市道桥与防洪,2017(8):46-47,58.