

山地风电场运输道路设计要点分析

马开志, 周向阳

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]山地风场地形复杂, 大件运输设备重量大、尺寸长, 运输道路经济性要求较高, 导致道路设计选线非常困难。[方法]以实际工程为背景, 从风电场投资成本构成、风电设备特点和运输车辆性能等方面, 分析了山区风场运输道路选线的基本原则, 研究了道路平曲线转弯半径和纵坡坡度的最大值及极限值。[结果]风场道路选线设计需综合考虑道路线形技术指标的要求及环境条件的限制, 选线以纵面线型为主, 线型指标一般采用低限值。[结论]在采用专用运输车辆的条件下, 风场运输道路推荐采用的平曲线最小半径为 30.0 m, 极限最小半径为 20.0 m; 纵坡最大坡度为 0.14, 极限坡度为 0.17, 相关成果可供风机道路设计及建设参考。

关键词: 风力发电场; 道路设计; 平曲线半径; 最大坡度

中图分类号: TK89; U412

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0172-05

Research on the Road Route Design of the Wind Farm in Mountainous Area

MA Kaizhi, ZHOU Xiangyang

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Topography in mountainous area is complex, the large-scale equipments for transportation are heavy and long, better economy is demanded for the construction of the transportation road, which leads to difficulty in road route design. [Method] Based on a practical engineering, considering the cost proportion of the project investment, the feature of the wind farm equipments and the performance of the transport vehicles, analyzed the basic principles of the road route selection, researched the common and limited minimum horizontal curve radius and the maximum longitudinal grade of the road. [Result] The technical indicator demand of the road route and the constraint of the environment shall be considered in the road design, the grade of longitudinal profile is mainly dominated and the limited index is commonly used. [Conclusion] In use of the special vehicles for the transportation, the common minimum horizontal curve radius of the road is 30.0 m, the limited minimum horizontal curve radius is 20.0 m; and the common maximum slope is 0.14, the limited maximum slope is 0.17, the results can be reference for wind farm transportation road design and construction.

Key words: wind farm; road design; horizontal curve radius; maximum grade

根据我国《可再生能源发展“十三五”规划》的要求, 为加快建立清洁低碳的现代能源体系, 促进可再生能源产业持续健康发展, 到 2020 年, 我国非化石能源占比将达到一次能源消费比重的 15%。全部可再生能源发电装机 6.8 TW, 发电量 1.9×10^4 TWh, 占全部发电量的 27%。其中, 全国风电并网装机总容量将确保达到 2.1 TW 以上^[1]。

由于受电力消纳及送出条件的限制, 我国风电开发的重点区域逐渐呈现出从北到南, 从西到东的发展趋势。近年来, 中东部及南方地区陆上风电装机规模不断扩大。根据我国的地形地貌特点及风资源分布特征, 这些地方的很多风电都建设在海拔较高的山地地区。然而, 山地地区地形起伏大, 高差悬殊, 风机运输道路设计施工的难易程度对选择风机机位有重要影响, 风机叶片、机舱等超长或超重设备的运输是风场建设的重要难题。

因此, 本文以广东韶关某山地风电场项目 (49.5 MW) 为依托, 充分考虑投资成本构成、山区

收稿日期: 2018-05-29 修回日期: 2018-05-29

基金项目: 中国能建广东院科技项目“复杂山地风能资源评估及风电场后评估研究”(EX03861W)。

表 1 山地风电场典型投资成本构成

Tab. 1 Typical cost proportion of the wind farm investment in mountainous area

成本要素	施工 辅助	设备与安装			建筑工程				其他 费用
		风电场	升压站	其他	风电场工程	升压站工程	交通工程	其他	
比例/%	1.5	60.5	4.0	0.5	5.5	2.0	10.0	0.5	15.5

地形地貌及风机大件运输的影响, 对类似该项目的山地风电场运输道路的设计要点进行了分析。

1 山地风场运输道路概述

风电场运输道路需满足施工及运维阶段大型起吊机械的通行、风机大型部件的运输及其他施工机械与材料运输的通行要求。其中, 风机大型部件的运输是关键点。

1.1 山地风电场运输道路投资概况

山地风场道路建设的难易程度直接影响风场建设的投资成本、施工工期及后期的风场运营成本。由于山地地区地形复杂, 道路选线受林业、农业、社会文化及地区风俗等较多因素的制约, 道路路线设计工作较难开展^[2]。另一方面, 虽然运输道路设计与施工费用仅占风电场投资成本的很小部分, 一般约为 10%, 但却占到土建工程造价的 50% 以上, 是项目成本控制十分重要的部分, 典型山地风电场的投资成本构成如表 1 所示。为有效提高项目的投资收益, 风电场道路建设必须严格控制投资成本, 这也对道路设计方案的经济性提出了更高的要求, 增加了相关工作开展的难度。

1.2 风机大型部件组成

经过几十年的发展, 现代商用大型风力发电机组单机容量规模达到了兆瓦级别, 型式上几乎全部是水平轴、三叶片。目前, 在山地风电场中主要使用的是单机容量为 2.0 MW 左右、塔筒高度 80 m 左右的机型^[3]。风力发电机组主要由主机、塔筒和风机基础组成, 主机包括风轮叶片、轮毂及导流罩、机舱等部件。其中, 风轮叶片、轮毂及导流罩、机舱和塔筒都为工厂制作, 经过长途运输到风场, 现场吊装, 这几部分也是风机大型部件的主要组成部分。某典型 2.0 MW 风机主机和塔筒大件组成分别如表 2 和表 3 所示。

由表 2 和表 3 可知, 风机主要组成部件的运输

都属于大件运输的范畴, 运输难度较大。其中, 影响道路运输的最不利运输参数主要为叶片运输的长度 58.80 m, 机舱运输的重量 89.0 t。

表 2 风机主机大型部件运输尺寸

Tab. 2 Dimensions of the wind turbine for large-scale equipments transportation

部件名称	运输尺寸/m	运输重量/t
机舱	11.71 × 4.10 × 4.13	89.0
轮毂及导流罩	4.90 × 4.30 × 3.53	21.0
叶片	58.80 × 2.44 × 3.80	12.1

表 3 风机塔筒大型部件运输尺寸

Tab. 3 Dimensions of the tower tube for large-scale equipments transportation

项目	长度/m	重量/t	上部直径/m	下部直径/m
第 1 节	14.325	49.3	3.978	4.200
第 2 节	18.500	42.7	3.692	3.978
第 3 节	19.935	32.9	3.384	3.692
第 4 节	24.500	28.0	3.005	3.384
基础环	2.400	16.7	4.200	4.200

1.3 运输车辆

风机大件运输承包单位需具有《道路运输经营许可证》, 且拥有相关部门颁发的大件运输承包资质等级证书或拥有交通部门颁发的三类及以上大件运输资质, 或其货物运输能力达到三级大型物件运输标准^[4]。

风机运输车辆一般采用牵引车与半挂车的组合形式, 最大总牵引质量达 40~180 t。机舱运输的车板一般采用尺寸为 13.5 m × 3 m 的后 3 轴低板车。轮毂运输一般为高、低板半挂平板车, 或凹形板拖车, 每车每次可运载 2 台轮毂及其它附件。在高速公路、省道及线形指标较好的县道等普通公路运输叶片时, 由于叶片较长, 需要根据叶片支点长度安排不同长度的抽拉式挂车。其他小部件运输可按普通货物运输标准选择运输车辆, 风电场常用运输车辆选型如表 4 所示。

表4 风电场常用运输车辆选型

Tab. 4 Parameters of common vehicles for cabin transportation in wind farm

设备	车型	车辆尺寸/m	载重/t
机舱	低板凹槽半挂车	12.5 × 3 × 0.7	100
轮毂	半挂车	17.5 × 3 × 1.2	35
叶片	抽拉式挂车	32.0 × 3 × 1.2	35
塔筒	半挂车	21.0 × 3 × 0.8	80

山地运输风机叶片时,一般都采用叶片运输专用车,如图1所示。通过在半挂车的尾部加装回转平台装置,叶片运输专用车可以实现风机叶片的360°旋转,回转平台装置自身也可以旋转。在遇到难以直接通过的复杂路况时,可以把叶片旋转到任意一个适合通过的角度,可以大大增加车辆的通过性能,使运输更安全方便。为了解决回转时较长叶片导致的整车重心不稳定,叶片安装位置相反的方向还设计了一个配重箱,可以根据需要添加压载物,并且配重箱和回转平台的距离也可以根据需要用液压缸来调整,这避免了运输长叶片造成的整车重心失衡导致翻车的危险。



图1 风机叶片运输图

Fig. 1 Figure of the transportation of the wind turbine blade

2 路线设计及要点分析

2.1 总体选线原则

山地地区自然条件复杂,地形变化很大,路线设计在技术指标选择方面受到较大的限制,因而一般采用低限值^[5]。风电场运输道路必须以较短的路径克服山地较大的高差变化,选线以纵面线形为主安排路线,其次考虑平面线形。综合考虑风电场道

路的特殊性,山地地区风电道路选线原则如下:

1) 道路选线必须尽量避开深沟、河流或高崖等不利地形,不能采用桥梁、隧道等技术要求高、成本昂贵的路线形式。

2) 根据山区的地形特点,道路选线一般优先选择山脊线。

3) 道路路线在山脚处尽量利用现有的公共路线进行改造,不能造成房屋拆迁,不占用耕地或经济林。

4) 在数字地形图上完成初步路径规划后,在进行初步设计之前,必须进行路线的现场踏勘,以验证规划路径的合理性并发现其他可能影响工程开展的不利因素。

2.2 平面线形分析

根据车辆行驶稳定性理论^[6-8],衡量车辆行驶稳定程度的横向力系数可按式计算:

$$\mu = \frac{V^2}{127R} \pm i_h \quad (1)$$

式中: μ 为横向力系数; V 为行车速度(km/h); R 为平曲线半径(m); i_h 为横向超高坡度;“+”表示路面横坡倾斜方向指向平曲线外;“-”表示路面横坡倾斜方向指向平曲线内。对风电场运输道路,大多数情况下不会专门设置超高,而是根据排水的要求设置1%左右的单向排水坡度,故可取 $i_h = 1\%$ 。横向力系数 μ 越小,汽车在平曲线上行驶的横向滑动稳定性就越好,当 $\mu = 0.05$ 时,汽车行驶稳定性很好,即使路面结冰也能安全行驶。采用不同的横向力系数值计算不同车速下,考虑路面横坡倾斜方向指向平曲线外的不利情况时,横向稳定性影响的最小平曲线半径如表5所示。

表5 基于横向滑移稳定性保证的平曲线半径 R/m 计算

Tab. 5 The horizontal curve radius calculation based on the traverse sliding stability guarantee

横向力系数	车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)						
	2	5	10	12	15	18	20
0.05	0.79	4.92	19.69	28.35	44.29	63.78	78.74
0.10	0.35	2.19	8.75	12.60	19.69	28.35	35.00
0.15	0.22	1.41	5.62	8.10	12.65	18.22	22.50
0.20	0.17	1.04	4.14	5.97	9.32	13.43	16.58

轮毂、机舱和塔筒运输时,由于设备重量很大,在平曲线上行驶时也可能由于车速过快、驾驶员操作不合理等因素的影响而导致运输车辆发生横

向倾覆。为防止这种情况的发生, 需要考虑横向倾覆稳定性对车速以及平曲线半径的影响。根据公式:

$$R \geq \frac{V^2}{127(\mu \pm i_h)} \quad (2)$$

式中: μ 为横向力系数, $\mu \leq b/2h$; h 为整车重心高度(m); R 为平曲线半径(m); V 为行车速度(km/h); b 为汽车轮距(m); i_h 为横向超高坡度。考虑机舱运输的最不利情况, 取整车重心高度 h 为 2.8 m, 轮距 b 为 1.8 m, 则 $\mu \leq 0.32$, μ 越大, 轮胎磨耗及燃料消耗越大, 结合运营的经济性考虑, 取 $\mu = 0.2$ 。得出不同行车速度下, 考虑路面横坡倾斜方向指向平曲线外的不利情况时, 在平曲线上行驶保持稳定所需的最小半径, 如表 6 所示。

表 6 基于横向倾覆稳定性保证的平曲线半径计算 ($i_h = 1\%$)

Tab. 6 The horizontal curve radius calculation based on the traverse overturning stability guarantee ($i_h = 1\%$)

车速/(km · h ⁻¹)	5	10	12	15	18	20
最小半径/m	1.04	4.14	5.97	9.32	13.43	16.58

当风机叶片采用专用运输车辆时, 相对于普通运输车辆, 可以显著减少车辆的转弯半径及车辆运行时的扫空范围, 同时提高运行车辆的爬坡能力, 进而使得道路的整改、扩建量、房屋拆迁、树木砍伐数大大减少; 另一方面, 采用专用运输车辆可以降低车辆对坡度的要求, 减少道路设计总里程数, 进而降低道路的改造和新建等投资成本。某型叶片专用运输车辆与普通运输车辆技术要求对比如表 7 所示。

表 7 叶片专用运输车辆与普通运输车辆技术参数对比表

Tab. 7 Parameters comparing between common vehicle and special vehicle for blade transportation in wind farm

叶片对道路要求比较	传统普通车辆	新方案车辆
扫空范围(车货总长)/m	60	25.15 ~ 50
内转弯半径/m	35	25
道路直线路宽要求/m	5.5	5
弯道路宽(不同角度)/m	8 ~ 17	7 ~ 13
需改建弯道数量	多	少(优势为双向驱动、前后转向)
纵坡	≤12%	≤24%(摩擦系数为 0.7 时)
横坡	≤2%	≤2%
灵活性	差	高

综上所述可以看出: 风机运输道路平曲线半径取值主要受稳态转弯时汽车行驶轨迹及风机叶片运输专用车辆的影响。极限最小半径参考主机厂家风机运输技术规范书的要求, 一般最小半径选用 μ 接近于 0 的取值。本工程道路设计时所采用的一般最小半径为 30 m, 极限最小半径为 20 m。

2.3 纵断面分析

对山地风电场, 风资源最好的位置一般都在山顶, 纵坡设计主要考虑从山脚将机舱、塔筒等重型设备运到山顶, 即主要考虑最大爬坡能力。汽车的最大爬坡能力是指汽车在坚硬路面上用最低档做等速行驶时所能克服的最大坡度。空载下坡时, 偏安全。根据车辆行驶理论, 当汽车等速行驶时, 汽车可爬的最大坡度为:

$$i_{\max} = \lambda D_{\max} - f \quad (3)$$

式中: D_{\max} 为动力因素, 表示某型汽车在海平面上, 满载工况下单位车重所具有的有效牵引力; λ 为考虑海拔及荷载影响的动力因素调整系数, 满载工况下的 λ 取值如表 8 所示; f 为滚动阻力系数, 它与路面类型、轮胎结构和行驶速度有关, 在一定类型的轮胎和一定车速范围内, 该系数可视为只和路面状况有关的常数, 对干燥平整的土路, 该系数可取值为 0.05。

表 8 满载工况下的 λ 与海拔高度 H 的关系

Tab. 8 Relevance between λ and H under full loaded condition

海拔高度 H /km	0	1	2	3	4	5
修正系数 λ	1.00	0.89	0.78	0.69	0.61	0.53

为满足不同海拔需要的爬坡能力, 文中计算了风电场风机运输中各档最大爬坡能力, 结果如表 9 所示。从表中可以看出, 档位越高爬坡能力越小, 对山地运输条件而言, 不会使用高档位爬坡。高于四档的爬坡能力对于风机运输道路项目参考意义不大。对海拔 1 km 左右的山区, 在满载低速工况下, 汽车的最大爬坡能力能达到 0.20 左右。

结合相关行业规范的要求^[9-10], 综合考虑汽车的爬坡能力和风机厂家技术规范的要求, 本工程运输道路的最大坡度为 0.14, 极限坡度为 0.17。在实际工程中, 因地形条件及经济性的影响, 选用纵坡极限值时, 可采用“前拉后推”的运输方式, 既在挂车车头前增加牵引车辆, 或在挂车后面增加一辆推车, 从而增加车辆整体的动力。同时, 为保证运

表9 满载不同海拔高度下各档位的最大爬坡坡度
($f=0.05$)

Tab. 9 Maximum climbing grades on different gears and elevation under full loaded condition ($f=0.05$)

档位	D_{\max}	高程/m	λ	坡度 i
I	0.28	0	1.00	0.23
		1 000	0.89	0.20
		2 000	0.78	0.17
II	0.21	0	1.00	0.16
		1 000	0.89	0.14
		2 000	0.78	0.11
III	0.17	0	1.00	0.12
		1 000	0.89	0.10
		2 000	0.78	0.08
IV	0.13	0	1.00	0.08
		1 000	0.89	0.07
		2 000	0.78	0.05

输安全, 施工中选择天气晴朗、路面干燥等运输条件较好时进行大件运输, 车辆上山前应仔细检查车辆状况, 消除安全隐患。

3 结论

本文依托实际工程, 介绍了山地地区风电场道路设计概况, 分析了风场运输道路主要的设计原则及设计要点, 得出了如下结论:

1) 风电场运输道路设计与施工费用仅占风力发电项目投资成本的很小部分, 一般约为 10%, 但却占到土建工程造价的 50% 以上。因此, 运输道路造价是项目成本控制十分重要的部分, 道路设计方案需要较多的考虑项目的经济性。

2) 风轮叶片、轮毂及导流罩、机舱和塔筒是风机大型部件运输主要的组成部分; 运输车辆主要采用多轴线液压板拖车和大型凹形板拖车, 山地运输道路上叶片转运一般采用叶片专用运输车。

3) 风机运输道路平曲线半径取值主要受稳态转弯时汽车行驶轨迹及风机叶片运输专用车辆的影响。极限最小半径参考主机厂家风机运输技术规范的要求, 一般最小半径选用 μ 接近于 0 的取值。本工程道路设计时所采用的一般最小半径为 30 m, 极限最小半径为 20 m。

4) 结合相关行业规范的要求, 综合考虑汽车的爬坡能力和风机厂家技术规范的要求, 本工程运输道路的最大坡度为 0.14, 极限坡度为 0.17。在实

际工程中, 因地形条件及经济性的影响, 选用纵坡极限值时, 可采用“前拉后推”的运输方式, 既在挂车车头前增加牵引车辆, 或在挂车后面增加一辆推车, 从而增加车辆整体的动力。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划 [R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2016.
- [2] 张怀全. 风资源与微观选址: 理论基础与工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] 刘永前. 风力发电厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 杨永红, 吴焜, 王选仓, 等. 风电场大型风机运输道路纵坡指标研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 14-19.
- [5] 孙家驹, 李松青, 王卫花. 道路勘测设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] 杨永红, 陈志达, 王选仓, 等. 风电场大型风机运输道路平曲线半径指标研究 [J]. 公路工程, 2017, 39(6): 73-75.
- [7] 许金良, 王恒, 赵利苹, 等. 考虑横风作用的公路平曲线最小半径研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 38-43.
- [8] 童申家, 王培. 不同海拔、风级影响下的高等级公路圆曲线半径分析 [J]. 公路, 2012(12): 61-64.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范: JTG D20—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 中华人民共和国交通部. 厂矿道路设计规范: GBJ 22—87 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1987.

作者简介:



MA K Z

马开志(通信作者)

1987-, 男, 湖北恩施人, 工程师, 硕士, 主要从事传统电力工程、新能源工程及建筑工程的土建设计工作(e-mail) makaizhi@gedi.com.cn。

周向阳

1975-, 男, 湖北襄阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事传统电力工程、新能源工程及建筑工程的设计管理工作(e-mail) zhouxiangyang@gedi.com.cn。

(责任编辑 高春萌)