

# 高原地区风力机设计与改进研究

李萌

(淮北职业技术学院机电工程系,安徽 淮北 235000)

**摘要:**与低海拔地区相比,高原地区地质条件复杂、气候特点鲜明。在高海拔和强日照环境下,普通风力机会出现输出功率下降、电气性能降低、散热效果不佳、雷击风险加大等一系列问题。为解决上述难题,研究通过修正风力机功率曲线、改进结构与电气设计等手段,总结出适用于高原地区的风力机设计方法和规范。

**关键词:**高原地区;风力机;设计;改进;功率曲线

**中图分类号:**TK83 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2020)04-0037-04

## On the Design and Improvement of Wind Turbines in Plateau Areas

LI Meng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei, Anhui 235000, China)

**Abstract:** Compared with the lowlands, the plateau areas have more complex geological conditions and distinct climatic characteristics. Due to high altitude and strong sunshine, the common wind turbines have a series of problems, such as the decrease of output power, decline in electrical performance, poor cooling effect, and high risk of lightning hazards. In order to solve the above problems, the wind turbine designing methods and specifications applicable to the plateau areas are summarized through modifying the wind turbine power curve and improving the structural and electrical design.

**Keywords:** plateau area; wind turbine; design; improvement; power curve

## 0 引言

风能作为一种清洁能源,其开发和利用备受世界各国政府的亲睐和重视。中国现已开发的海上风电场主要集中在东南沿海地区,陆上集中式风电场主要选址在内蒙古和甘肃地区<sup>[1]</sup>。在西藏、青海等高原地区,风电场建设尚处在起步和试验阶段。2012年5月,全国首座高原示范型风电场在甘肃阿克塞县海拔3 200 m的当金山建成,共安装有66台单机容量1.5 MW风力机,2018年发电量达到2.4亿kWh。2014年10月,海拔4 700 m的西藏那曲风电场一期5台1.5 MW风力机投入使用,这是目前全世界海拔位置最高的风电场,也是西藏地区目前唯一建成的大型风电场。

高原地区大气压力弱、空气密度小、平均温度低、日照辐射强、雷暴天气多,气候变化和地质条件与低海拔地区有显著不同。欧美等风电发达国家

海拔高度普遍较低,其先进的风电技术多以低海拔为设计条件,国际上尚没有成熟的高原地区风力机设计方法和规范可供借鉴。国内高海拔地区地域广阔、能源缺口大,风能资源有很大的开发利用潜力,迫切需要确立科学有效的高原地区风力机设计方法和规范。

## 1 高原环境对风力机影响

### 1.1 高海拔条件对风力机影响

高原地区一般海拔较高,地理位置特殊、地形地貌复杂,台地、山峰、河谷、湖泊相对众多,例如青藏高原,全年 $\geq 3$  m/s风速的累计时间可达6 500 h,属于最大风能资源区。但由于青藏高原海拔高、气压低,空气密度随海拔高度增加而逐渐减少,所以风能密度也相对较小。已知15℃下海平面高度的标准空气密度值为1.225 kg/m<sup>3</sup>,按6 m/s风速计算其风能密度为132.3 W/m<sup>2</sup>。由表1可知海拔4 000 m

收稿日期:2020-05-09

基金项目:安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2019212);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0992);淮北职业技术学院自然科学研究重点项目(2019-A-6)。

作者简介:李萌(1984—),男,安徽萧县人,讲师,硕士,研究方向:风力机结构设计与分析。

左右的高原地区相对空气密度约为0.65,其风能密度仅为85.995 W/m<sup>2</sup>。按照上述风能密度水平,青藏高原的实际风能远小于东南沿海地区,只能划入较大风能资源区。大力提升高原地区风能资源开发利用水平,是解决这些地区电力供应短缺问题的迫切需要。

表1 海拔高度与气压、空气密度的关系

海拔/m	气压/kPa	空气密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	相对空气密度
0	101.325	1.293	1.00
1 000	89.870	1.167	0.90
2 000	79.490	1.050	0.81
3 000	70.106	0.943	0.73
4 000	61.642	0.844	0.65
5 000	54.028	0.753	0.58

注:表中0 m海拔高度空气密度值1.293 kg/m<sup>3</sup>为0 °C条件下测定的。

由贝兹理论可知,理想条件下风力机风轮的最大输出功率为 $P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V^3$ ,其中空气密度 $\rho$ 取1.225 kg/m<sup>3</sup>,风轮扫掠面积 $A = \frac{\pi}{4} D^2$ , $V$ 为标准风速。风能转换成动能的最大利用系数为 $16/27 \approx 0.593$ ,实际风能利用系数大都为0.4~0.5<sup>[2]</sup>。按照相对空气密度0.65进行计算,也就是说风力机在海拔4 000 m的高原地区只能获得海平面高度最大输出功率的2/3。海拔高度不断提升,风能利用系数会降低,风力机实际输出功率会更低。高海拔型风力机设计必须提前考虑空气密度随高度变化产生的影响,减小风电机组设计载荷,降低风力机设计功率。

“一天度四季,全年备寒冬”是大多数高海拔地区气候特点的真实写照,例如拉萨市夏季六月份中午的最高气温可达27~29 °C,给人以盛夏的感觉;午夜气温降至5 °C,宛如寒冬来临。当气压、气温、湿度变化时,空气密度也会随之变化。当温度变化幅度在±10 °C时,相应空气密度变化为±4%。一天之内气温的剧烈变化会引起空气密度显著变化,使得高原地区的风力机输出功率波动比普通地区更加频繁。功率调节是MW级大型风电机组的关键技术之一,设计初衷原本是为了应对风速的变化。变桨距角调节技术通过实时改变桨距角,使风力机叶片的安装角度随风速变化而变化以实现功率调节。变速控制技术是通过风速变化相应改变风轮叶片旋转速度,从而保持基本恒定的最佳速比来实现功率调节。分析表明,这2种功率控制方法都适合在高海拔型风力机中使用,以应对空气密度频繁变化造成的功率下降与功率波动问题。

海拔高度增加、大气压力减小、空气密度降低,会导致电气设备电晕电压和外绝缘强度降低。已知海平面高度至5 000 m海拔高度范围内,每升高1 000 m,电晕电压和外绝缘电气强度降低8%~13%<sup>[3]</sup>。根据帕邢定律可知,在均匀电场中的气体间隙击穿电压是间隙距离和气体压力乘积的函数。如果不增大风力机在高海拔条件下的电气间隙设计,发电机击穿电压等级将会下降,风电机组就有损坏的危险。

高海拔地区空气密度降低,还会使以空气冷却为主要散热方式的电气元件散热效率下降。例如当风力机额定功率运行时,齿轮油冷却系统正常工作条件下可使齿轮油油温从70 °C下降到55 °C,油温下降了15 °C。而在海拔高度为4 000 m的高原地区,相同户外空气温度,同样的冷却系统,在同一时间内齿轮油油温只下降了10 °C,散热效率明显降低。已知从海平面高度至5 000 m海拔高度范围内,每升高1 000 m,电器设备温升增加3%~10%<sup>[4]</sup>。虽然高海拔带来的低温环境可以抵消散热不良带来的部分影响,但由于MW级大型风力机功率高、机舱封闭,运行时产生的热量巨大,仍需要考虑空气密度小、空气对流困难造成的散热影响。在设计高海拔风力机时,需要考虑提升风力机机舱的风冷散热效率,必要时采用液冷等手段抑制设备温升,同时提高电气元器件的耐高温绝缘等级。

## 1.2 雷击与日照对风力机影响

高原地区特殊的地形和热力作用会影响大气环流效应。这类地区的云层较地面的相对高度较低,其年均雷暴天气日数远高于同纬度低海拔地区。MW级风力机塔架高度大都超过80 m,这种高耸结构发生雷击的概率更高。雷击问题严重影响风电机组安全运行,也是风力机失火事故发生的主要原因之一。据统计,在风力机雷击事故中叶片的损坏约占事故总数的20%,控制系统、电器系统和传感器损坏分别约占36%、26%和12%。叶片遭遇雷击的典型后果是玻璃纤维复合材料因为高温出现碳化和烧焦现象,或雷电弧在叶片内部形成压力冲击波造成叶片的机械开裂。此外,雷电流会生成暂态脉冲磁场,可能在风电机组内感应出暂态过电压和过电流,导致风力机电气设备损坏和控制元件失效。

高原地区地势高,日出较早,日落更晚,年均日照时间长,例如拉萨地区,年均日照在3 005 h左右,平均每天有8.25 h的日照,比同纬度的低海拔地区多了一半。海拔高,太阳光到达地面前通过大气层

的光程较短;空气稀薄,大气中的尘埃和水蒸气含量相对较少。大气层相对通透使得阳光的折射、散射和吸收作用大为减弱,太阳辐射到达地面的紫外线更为强烈。这种特殊的日照条件会使风力机机舱温度升高,加速风力机机舱罩、轮毂罩、叶片的老化。部分高原地区风沙较大,风吹日晒雨淋等恶劣环境会加速风力机出厂时涂覆的防磨损、防紫外线胶衣磨损,使叶片正常使用寿命缩短,金属部件也会提前产生锈蚀。

## 2 高海拔风力机设计改进

### 2.1 功率曲线修正及验证

高原环境下,空气密度比标准空气密度值降低,短时间内空气密度变化幅度较大。空气密度增大,风电机组(特别是失速型机组)的输出功率将增加,可能出现过发、过载现象;空气密度降低,风电机组的输出功率下降,发电机的发电效率和发电量降低。普通型风力机在高原条件下的实际输出功率与低海拔地区会有显著不同,必须加以修正。

标准空气密度条件下,风电机组输出功率与风速的关系曲线称为风电机组的标准功率特性曲线。风电机组输出功率 $P$ 的计算公式为式(1):

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 A V^3 C_p \quad (1)$$

其中 $V$ 为标准风速值(m/s), $\rho_0$ 为标准空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $A$ 为风轮扫掠面积( $\text{m}^2$ ), $C_p$ 为风能利用系数。

考虑空气密度变化的影响,传统方法是直接用 $P_n = \alpha \rho = (\rho/\rho_0)P$ 来修正风电机组输出功率<sup>[5]</sup>。 $P_n$ 为修正后的风力机输出功率, $\rho$ 为实际空气密度, $\alpha$ 为功率修正系数。但实际上高原地区空气密度降低,风能密度随之下降,按标准空气密度设计的风速计读数会比实际风速值偏大,直接代入式(1)计算出的风力机输出功率会产生一定的偏差。

通过大量试验及分析研究,终于找出了解决上述问题的方法,即按照风速与空气密度的关系,根据 $V_n(\rho) = k \cdot V(\rho)$ 将实测风速值 $V$ 折算为标准条件下的真实风速值 $V_n$ ,从而修正风速计读数偏差,其中 $k$ 为风速折算系数,用以表示未修正的风速表测得风速与真实风速之间的比例关系。Wind Guard 风洞服务公司的 Dieter Westermann 团队在空气密度可变风洞的实验研究成果表明,设定 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 两种外部恒定温度条件时,测定出的风速折算系数 $k$ 可以修正不同风况条件下空气密度变化导致的风速偏差(图1)。分析可知,从标准空气密度 $1.225\text{ kg}/\text{m}^3$ 开始,随着海拔高度增加,空气密度下降,未修正

的风速表读数与真实风速的偏差越来越大。在较低的风速条件下,这种影响尤为明显。

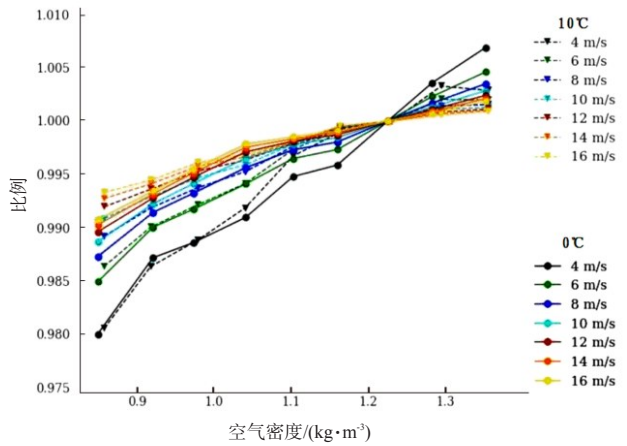


图1  $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同风况下空气密度与风速的比例关系

考虑空气密度变化的影响,风力机实际输出功率计算公式变换为式(2):

$$P_n = \frac{1}{2} \rho A [kV(\rho)]^3 C_p \quad (2)$$

以青藏高原平均海拔高度 $4\text{ }000\text{ m}$ 为例,空气密度约为 $0.843\text{ }7\text{ kg}/\text{m}^3$ ,假设风力机设计额定风速为 $12\text{ m/s}$ ,查图1取风速折算系数 $k$ 为 $0.99$ 。代入式(2)计算可知,普通型风力机在安装到海拔 $4\text{ }000\text{ m}$ 地区时, $12\text{ m/s}$ 风速下的实际输出功率只有额定输出功率的 $63\%$ ,相当于实际的额定转速被提高了。高原环境下低风速工况时间较长,实际输出功率达到额定功率的时间很短,年发电量远低于设计值。因此要适当降低额定设计功率,努力减小风力机设计载荷,利用变速变桨方式进行功率调节,保障高海拔型风力机平稳安全运行。

图2是采用上述方法修正后设计的 $3\text{ }000\text{ m}$ 高海拔型 $1.5\text{ MW}$ 风力机功率曲线,设计额定风速为 $12\text{ m/s}$ 。2台实验样机安装在海拔 $2\text{ }900\sim 3\text{ }000\text{ m}$ 的青海锡铁山。对比发现修正后的设计功率曲线

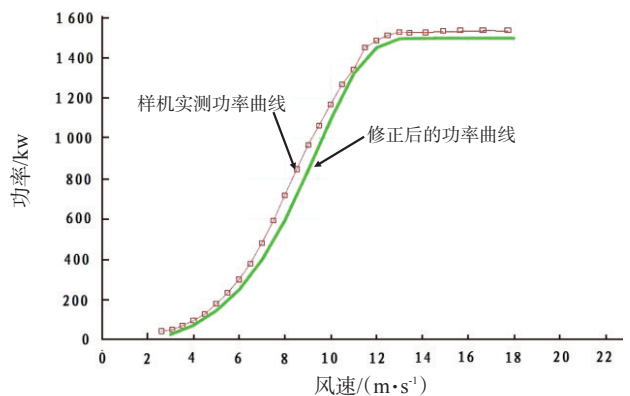


图2  $1.5\text{ MW}$ 高海拔风力机修正功率曲线和实测功率曲线



与样机运行过程中的实测功率曲线基本吻合,验证了上述修正方法合理有效。

### 2.2 改进结构及电气设计

高原地区风力机的系统控制需要根据外部环境的不同进行相应优化,使其具备对关键部件温度、湿度、润滑、振动的监测功能,并能根据一定算法优化控制策略,实现功率线性调节和整机自动控制。控制系统能正确分析空气密度小、环境温度低等因素对机组稳态运行特性、机组散热能力的影响,并能自主作出适当的修正和调整,例如当发电机定子温度或齿轮油温度接近它们各自的温度上限时,控制系统能自动线性降低风力机输出功率以保证设备安全。在空气密度变化时,控制系统能通过变桨或者变速功率调节补偿流过叶片的气流减少导致的动能损失,从而获得最大的有功功率。控制系统修正优化的最终目标,是保证风力机即使在一个极端的工作环境下,也可以更加安全可靠地运行并实现发电效益的最大化。

高海拔风电机组发电机的绝缘防护应采用耐电晕的绝缘材料及系统,绝缘等级应提高到F或H级。发电机主绝缘耐压一般要求由AC3000V提高至AC4300V,其他电气设备的绝缘强度比普通型风力机提高至少20%以上。

电机绕组起晕电压与大气气压关系满足式(3)要求,高海拔风力机电线绕组的防晕设计应按照  $U_{kh}$  计算值逐渐放大到  $U_{k0}$  进行试验修正<sup>[6]</sup>。

$$U_{kh} = U_{k0} \frac{0.0029p}{t + 273} \tag{3}$$

其中  $U_{kh}$  为高海拔风力机电机起晕电压,  $U_{k0}$  为标准大气压力下电机起晕电压,  $p$  为风电场实际大气压力(pa),  $t$  为风电场最高气温(℃)。

高海拔型风力机设计时,应适当增大电气设备电气间隙,并根据海拔高度不同进行修正,如式(4)所示<sup>[2]</sup>。

$$L_h = kL_o \tag{4}$$

其中  $L_h$  为高海拔风力机电气间隙,  $L_o$  为2000 m高度下基准电气间隙,  $k$  为电气间隙修正系数。  $k_1$  为低压设备电气间隙修正系数,  $k_2$  为高压设备电气间隙修正系数,具体取值如表2所示。

表2 电气间隙海拔修正系数

海拔/m	$k_1$	$k_2$
2 000	1	1
3 000	1.13	1.13
4 000	1.29	1.28
5 000	1.48	1.45

高海拔条件下,风电机组电气设备的工频耐受电压值和雷电冲击耐受电压值需根据标准值进行修正,如式(5)所示<sup>[2]</sup>。

$$U_h = \alpha U_o \tag{5}$$

其中  $U_h$  为高海拔风力机电气设备工频耐压或冲击耐压,  $U_o$  为标准大气压下额定试验电压,  $\alpha$  为耐压修正系数。  $\alpha_1$  为工频耐压修正系数,  $\alpha_2$  为冲击耐压修正系数,具体取值如表3所示。

表3 工频耐压和冲击耐压海拔修正系数

产品 试验地点 海拔/m	产品使用地点海拔/m							
	2 000		3 000		4 000		5 000	
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0	1.25	1.28	1.43	1.45	1.67	1.64	2.00	1.85
1 000	1.11	1.13	1.25	1.28	1.43	1.45	1.67	1.64
2 000	1.00	1.00	1.11	1.13	1.25	1.28	1.43	1.45
3 000	0.91	0.88	1.00	1.00	1.11	1.13	1.25	1.28
4 000	0.83	0.78	0.91	0.88	1.00	1.00	1.11	1.13
5 000	0.77	0.69	0.83	0.78	0.91	0.88	1.00	1.00

在防雷设计方面,需综合采用多种防雷措施保障风力机安全。如果是集中型风电场,可以考虑设置单独的避雷塔主动拦截雷电保护多台风机,缺点是建塔成本高。如果是分散型风电场,风机数量少且距离远,可以在风力机机舱上设置专门的避雷针。一般叶片无论运转还是刹车停机状态都是风力机的最高端,极易在顶端形成尖端放电触发雷击<sup>[7]</sup>。针对高原地区雷电活动特点,可以在叶尖或者叶片边缘设置接闪器。也可以在叶片表面添加导电材料,通过引下线将雷电导入大地,防雷接地装置的工频接地电阻应小于4 Ω。

为满足高海拔地区在抗辐射、耐低温、防覆冰方面的特殊要求,需要对叶片、机舱、塔架等部件表面喷涂防紫外线辐射、防凝露易除冰、抗风沙耐磨损的涂层。特别需要对叶片进行重点防护,研发耐低温型传感器应用、凝冻检测控制策略优化、叶片表面疏水层涂覆、叶片内部气加热等技术综合运用,实现检测、控制、防冰和除冰多种功能的全面实现。高原地区空气稀薄,还需要在塔架和机舱内部设置必要的电梯助爬设备和自动灭火装置,方便风电场运行和维护。

### 3 结语

在高原地区,中国已经开展了利用风电技术获取清洁能源的不断探索和有益尝试。高原地区的风力机设计,需要兼顾安全性和经济性要求,对风

模型,以提高钟差预报的稳定性和预报精度。实验结果表明,一方面,组合模型的预报精度较GM(1,1)模型有一定提高且对于铷钟的预报精度提升更高,另一方面,组合模型的预报结果也更加稳定。鉴于

我国的北斗卫星导航系统所搭载的原子钟基本上均为铷钟,下一步将采用GM(1,1)+AR模型对我国北斗系统星载原子钟的钟差进行预报,以研究该模型与其适应度。

#### 参考文献:

- [1] 姜诗奇,李博峰. ARIMA模型在卫星钟差短期预报中的应用[J]. 导航定位学报,2019,7(4):118-124.
- [2] 王建敏,李特,谢栋平,等. 北斗精密卫星钟差短期预报研究[J]. 测绘科学, 2020,45(1):33-41.
- [3] 王宇谱,吕志平,陈正生,等. 基于灰色模型与小波神经网络的卫星钟差预报方法[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(3):155-159.
- [4] 陈倩,陈俊平,于超,等. 北斗系统测站钟差短期预报模型比较及其在单星定轨中的应用[J]. 天文学报, 2020,61(2):53-63.
- [5] 王宇谱,吕志平,孙大双,等. 一种改进钟差二次多项式模型的导航卫星钟差预报方法[J]. 天文学报,2016,57(01):78-90.
- [6] 崔先强,焦文海. 灰色系统模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005,30(5):447-450.
- [7] 张清华,隋立芬,牟忠凯,等. 利用改进灰色模型的钟差预报算法及其精度分析[J]. 测绘科学, 2012,37(1):54-56+117.
- [8] 席超,蔡成林,李思敏,等. 基于ARMA模型的导航卫星钟差长期预报[J]. 天文学报,2014,55(01):78-89.
- [9] 李晓宇,杨洋,胡晓粉,等. 基于改进灰色ARMA模型的卫星钟差短期预报研究[J]. 大地测量与地球动力学,2013,33(01):63-67.
- [10] 黄观文,崔博斌,张勤,等. 附加周期和神经网络补偿的实时钟差预报模型[J]. 宇航学报,2018,39(01):83-88.
- [11] WANG Y, LV Z, QU Y, et al. Improving prediction performance of GPS satellite clock bias based on wavelet neural network [J]. GPS Solutions, 2016,21(2), 523-534.
- [12] 孙启松,王宇谱. 基于方差递推法的Kalman滤波在钟差预报中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2016,39(6):93-95.
- [13] HUANG G, ZHANG Q. Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust kalman filter with classified adaptive factors [J]. GPS Solutions, 2012,16(4):531-539.
- [14] 郭忠臣,徐波. 两种线性地球自转参数短期预报方法[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2017,29(6):505-510.
- [15] 王志文,王潜心,丁跃群,等. 一种改正LS+AR模型提高短期极移预报精度的方法[J]. 天文学报,2017,58(2):67-77.

(上接第40页)

电机组进行适应性改进和结构优化设计。通过对叶片气动外形、风机材料、表面涂覆等方面进行改进,规范高海拔低温型风电机组控制策略,减小机组承受载荷,优化功率特性曲线,提高发电量和发电效益。针对高海拔低温环境介电强度减弱等问题,采用增大电气间隙、修正电气耐压、提升绝缘强度等措

施,改进风力机电气设计。在散热、防腐、防雷等方面,采用合理的散热手段提升散热效率,研究有效的防凝露和防覆冰方法,制定安全的防雷技术方案。这些研究成果将为高原地区风力机设计制造提供技术指导,更好地帮助高海拔地区解决能源短缺问题,大力提升这些地区人民群众的生产生活水平。

#### 参考文献:

- [1] International Renewable Energy Agency. Future of wind: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects [R]. Abu Dhabi:IREA:2019.
- [2] 白树华,卢继平. 西藏高原的气候环境对风力发电的影响分析[J]. 电力建设,2006,27(11):37-40.
- [3] 谢生清. 高海拔风电机组发电机设计要求[J]. 工业技术创新,2016(4):711-714.
- [4] 张志英,赵萍,等. 风能与风力发电技术[M]. 北京:化学工业出版社,2015:284-285.
- [5] 张鹏举. 风电场空气密度对风电机组输出功率的影响[J]. 电力勘测,1999(9):50-52.
- [6] 王富,王杰,徐学渊. 高原风力发电机组的设计及改进[J]. 电站辅机,2009,110(3):19-22.
- [7] 郭宁,李春曦,叶学民. 风力机组防雷技术研究[J]. 风机技术,2015(4):76-83.