

# 第 1 章 我国山地风电场开发概况

## 1.1 风能资源分布

### 1.1.1 风能的区划指标体系

风能区划是了解各地风能资源差异,合理开发利用风能的基础。风能分布具有明显的地域性规律,这种规律反映了大型天气系统的活动和地形作用的综合影响。

根据国家气象局资料,我国风能区划指标体系分为三级。

#### 1. 第一级区划指标

第一级区划选用能反映风能资源多少的指标,即依据年有效风功率密度、平均风速和年平均风速不小于 3m/s 的年累积小时数将我国分为 4 个区,见表 1-1。

表 1-1 风能区划指标

风能指标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风功率密度/( $W \cdot m^{-2}$ )	>200	200~150	<150~50	<50
平均风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	6.91	6.91~6.28	<6.28~4.36	<4.36
年平均风速不小于 3m/s 年累积小时数/h	>5000	5000~4000	4000~2000	<2000

(1) 风能丰富区。考虑有效风功率密度的大小和全年有效累积小时数,年平均有效风功率密度大于  $200W/m^2$ 、风速 3~20m/s 的年累积小时数大于 5000h 的划为风能丰富区,用“Ⅰ”表示。

(2) 风能较丰富区。年平均有效风功率密度  $150 \sim 200W/m^2$ 、风速 3~20m/s 的年累积小时数在 3000~5000h 的划为风能较丰富区,用“Ⅱ”表示。

(3) 风能可利用区。年平均有效风功率密度  $50 \sim 150W/m^2$ 、风速 3~20m/s 的年累积小时数在 2000~3000h 的划为风能可利用区,用“Ⅲ”表示。

(4) 风能贫乏区。年平均有效风功率密度  $50W/m^2$  以下、风速 3~20m/s 的年累积小时数在 2000h 以下的划为风能贫乏区,用“Ⅳ”表示。

这四个区的罗马数字后面的英文字母表示各个地理区域。

#### 2. 第二级区划指标

第二级区划指标主要考虑一年四季中各季风功率密度和有效风力出现小时数的分配情况。



### 3. 第三级区划指标

风电机组最大设计风速一般取当地的最大风速，在此风速下，要求风电机组能抵抗垂直于风的平面上所受到的压强，使风电机组稳定、安全，不致产生倾斜或被破坏。由于风电机组寿命一般为 20~30 年，为了安全，取 30 年一遇的最大风速值作为最大设计风速。

## 1.1.2 影响风能资源分布的主要气候

### 1. 冷空气活动

冬季（12 月一次年 2 月）整个亚洲大陆完全受蒙古高压控制，其中心位置在蒙古国的西北部，从蒙古高压中不断有小股冷空气南下并进入我国，同时还有移动性的高压不时地南下，气温较低，形成大范围的大风降温天气。

我国的冷空气主要受 5 个源地影响，由这 5 个源地侵入我国的路线称为路径。第一条路径来自新地岛以东附近的北冰洋面，从西北方向进入蒙古国西部再东移南下影响我国；第二条路径是源于新地岛以西北冰洋面，经俄罗斯、蒙古国进入我国；第三条路径源于地中海附近，东移到蒙古国西部再影响我国；第四条路径是源于泰梅尔半岛附近洋面，向南移入蒙古国，然后再向东南影响我国；第五条路径源于贝加尔湖以东的东西伯利亚地区，进入我国东北及华北地区。

这 5 条路径进入我国后再分两条不同的路径南下，一条路径是经河套、华北、华中由长江中下游入海，有时可侵入华南地区。沿此路径入侵的寒潮可以影响我国大部分地区，出现次数占总次数的 60% 以上，冷空气经过之地有连续的大风、降温天气，并常伴有风沙。另一条路径是经过华北北部、东北平原，东移进入日本海，也有一部分经华北、黄河下游向西南移入两湖盆地，这一条路径出现次数约占总次数的 40%，它常使渤海、黄海、东海出现东北大风，也给长江以北地区带来大范围的大风、降雪和低温天气。

### 2. 热带气旋活动

在我国东南沿海地区每年夏秋季节常受到热带气旋的影响，我国现行的热带气旋名称和等级标准见表 1-2。台风是一种直径 1000km 左右的圆形气旋，中心气压极低，台风中心 10~30km 范围内是台风眼，台风眼中天气较好，风速很小。在台风眼外壁天气较为恶劣，最大破坏风速就出现在这个范围内，所以只要不是在台风正面直接登陆的地区，风速一般小于 26m/s（10 级），它的影响平均有 800~1000km 的直径范围，每当台风登陆后我国沿海可以产生一次大风过程，而风速基本上在风电机组切出风速（25m/s）范围之内，是一次满发电的好时机。

表 1-2 我国现行的热带气旋名称和等级标准

热带气旋等级	低层中心附近最大平均风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	低层中心附近最大风力/级
热带低压 (TD)	10.8~17.1	6~7
热带风暴 (TS)	17.2~24.4	8~9



续表

热带气旋等级	低层中心附近最大平均风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	低层中心附近最大风力/级
强热带风暴 (STS)	24.5~32.6	10~11
台风 (TY)	32.7~41.4	12~13
强台风 (STY)	41.5~50.9	14~15
超强台风 (SuperTY)	$\geq 51.0$	16 或以上

在我国登陆的台风平均每年有 7 次，而广东每年登陆台风最多，为 3.5 次，海南次之，为 2.1 次，台湾 1.9 次，福建 1.6 次，广西、浙江、上海、江苏、山东、天津、辽宁合计仅 1.7 次，由此可见，台风的影响由南向北递减。

### 1.1.3 风能资源分布

我国地域辽阔，陆地最南端纬度约为北纬  $18^\circ$ ，最北端纬度约为北纬  $53^\circ$ ，南北陆地跨 35 个纬度，东西跨 60 个经度以上。

我国属于北半球中纬度地区，在大气环流的影响下，分别受副极地低压带、副热带高压带和赤道低压带的控制，我国北方地区主要受中高纬度的西风带影响，南方地区主要受低纬度的东北信风带影响。

我国独特的宏观地理位置和微观地形地貌也决定了我国风能资源分布的特点。我国在宏观地理位置上属于世界最大的大陆板块——欧亚大陆东部，东临世界上最大的海洋——太平洋，海陆之间热力差异最大，因此我国北方地区和南方地区分别受大陆性和海洋性气候影响，季风现象明显。北方具体表现为温带季风气候，冬季受来自大陆的冷干气流的影响，寒冷干燥，夏季温暖湿润；南方表现为亚热带季风气候，夏季受来自海洋的暖湿气流的影响，降水较多。

我国陆地分为东部沿海地区，东南部沿海地区，南部沿海地区，中部内陆地区，西北部、北部和东北内陆地区。

我国东部沿海地区基本上处于副热带高压控制，气压梯度小，同时，该地区又受海洋性气候的影响，大风持续时间短且不稳定，风能资源开发潜力一般。

我国东南部沿海地区与台湾岛在台湾海峡地区形成独特的狭管效应，而该地区又正处于东北信风带，主风向与台湾海峡一致，因此风力在该地区明显加速，风力增大，风能资源丰富，具有较好的风能开发价值。

我国南部沿海地区在东北信风带和夏季热低压的影响下，主风向为东风和东北风，由于夏季低压的气压梯度较弱，因此风力不大，风能较小。

我国中部内陆地区由于所处地理位置条件的限制，冬季来自北方的冷空气难以到达这里，夏季受海洋性气候的影响较小，同时由于该地区地势地形复杂和地面粗糙度变化较大，不利于气流的加速，因而风能资源比较贫乏。

我国西北部、北部和东北内陆地区主要包括新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、东北三省、山西北部、陕西北部和河北北部地区，这些地区纬度较高，处于西风带控制，同时冬季又



受到北方高压冷气团影响,主风向为西风和西北风,风力强度大、持续时间长,同时这些地区海拔较高,风能衰减小,因此,具有较好的风能开发价值。

中国气象局多次对全国风能资源进行调查,利用全国 900 多个气象台、站的实测资料得出了全国离地面 10m 高度层上的风能资源量,我国的风能资源总储量为 32.26 亿 kW、陆地实际可开发量为 2.53 亿 kW、近海可开发和利用的风能储量为 7.5 亿 kW。

#### 1.1.4 我国主要风能可利用区

(1)“三北”(东北、华北、西北)风能丰富区,包括东北三省和河北、内蒙古、甘肃、青海、西藏、新疆等省(自治区)近 200km 宽的地带,可开发利用的风能储量约 2 亿 kW,约占全国可利用储量的 79%。该地区地形平坦,交通方便,没有破坏性风速,是我国连成一片的最大风能资源区,有利于大规模地开发风电场。

(2)东南沿海风能丰富区。冬春季的冷空气、夏秋台风,都能影响到沿海及其岛屿,是我国风能丰富区,年有效风功率密度在  $200\text{W}/\text{m}^2$  以上,如台山、平潭、东山、南鹿、大陈、嵊泗、南澳、马祖、马公、东沙等,年可利用小时数约在 7000~8000h。东南沿海地区由于内陆丘陵连绵,风能丰富带仅在距海岸 50km 之内。

(3)内陆局部风能丰富地区。在上述两个风能丰富区之外,风功率密度一般在  $100\text{W}/\text{m}^2$  以下,年可利用小时数在 3000h 以下,但是在一些地区由于湖泊和特殊地形的影响,风能也较丰富。

(4)海拔较高的风能可开发区。根据第三次全国风能资源评价成果,青藏高原腹地也属于风能资源相对丰富区之一,另外,我国西南云贵高原的海拔在 3000m 以上的高山地区,风能资源也比较丰富。但建设风电场面临的主要问题是海拔高,而满足高海拔地区风况特点的风电机组较少,且交通、道路、运输条件复杂,施工难度较大。

(5)海上风能丰富区。我国海上风能资源丰富、风速高,很少有静风期,可有效利用小时数长。通常,海上风速比平原沿岸风速高 20%,发电量增加 70%,在陆上设计寿命 20 年的风电机组在海上可达 25~30 年,且距离电力负荷中心很近。我国海上风能丰富地区主要集中在浙江南部沿海、福建沿海和广东东部沿海地区。

## 1.2 我国风电开发现状

### 1.2.1 历年风电装机情况

中国地域辽阔,风能资源丰富。根据中国气象科学研究院最新公布数据,我国陆上 50m 高度潜在开发量约为 23.8 亿 kW,近海 5~25m 水深线内可装机容量约为 2 亿 kW。

截至 2016 年年底,全国风电保持健康发展势头,全年新增风电装机容量 1930 万 kW,累计并网装机容量达到 1.49 亿 kW,占全部发电装机容量的 9%,风电发电量 2410



亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，占全部发电量的 4%。2016 年，全国风电年平均利用小时数为 1742h，同比增加 14h，全年弃风电量 497 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。2013—2017 年第一季度我国新增和累计风电并网容量如图 1-1 所示。



图 1-1 2013—2017 年第一季度我国新增和累计风电并网容量

2016 年，华北地区、华东地区、西南地区新增装机容量较多，分别超过 400 万  $\text{kW}$ 。各地区新增装机容量所占全国比例分别为西北地区 17%、华北地区 21%、华东地区 22%、西南地区 22%、中南地区 10%、东北地区 9%。

与 2015 年相比，西北、华北、中南地区 2016 年的风电新增装机容量呈下降态势，而华东地区、西南地区、东北地区的风电新增装机容量依然保持增长态势。2015 年和 2016 年我国各区域新增风电装机容量份额对比如图 1-2 所示。

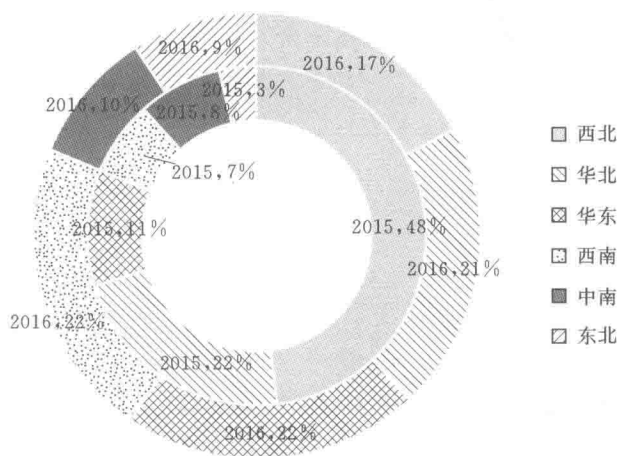


图 1-2 2015 年和 2016 年中国各区域新增风电装机容量份额对比

## 1.2.2 风能可利用区域开发状况

### 1. “三北”（东北、华北、西北）地区风能丰富带

2014—2016年全国及“三北”地区弃风率数据分析如图1-3所示。2016年，我国风电总体弃风形势严峻，而我国“三北”地区的弃风问题尤为突出。根据国家能源局发布的《2016年风电并网运行统计数据》，2016年，我国风电弃风限电形势加剧，全年弃风电量497亿kW·h，同比增加158亿kW·h，平均弃风率19%，同比增加4个百分点，其中：弃风较重的地区是甘肃，弃风电量104亿kW·h，弃风率43%；新疆弃风电量137亿kW·h，弃风率38%；吉林弃风电量29亿kW·h，弃风率30%。

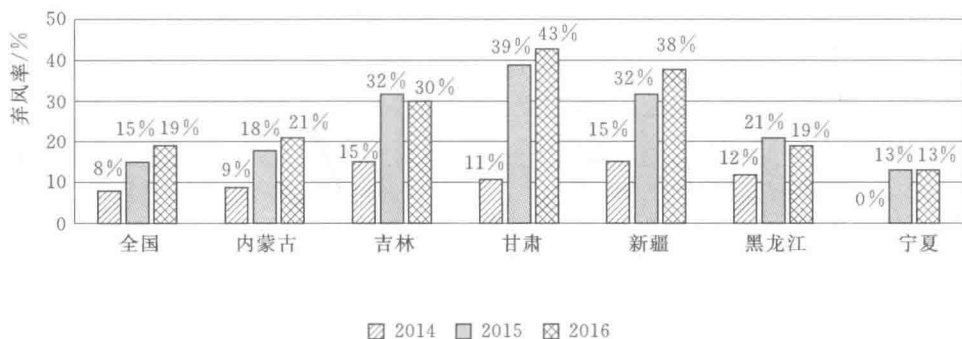


图 1-3 2014—2016 年全国及“三北”地区弃风率数据分析图  
(数据来源：国家能源局)

根据国家能源局公布的数据分析，3年间，“三北”地区大部分省（自治区）弃风率出现增长，甘肃地区弃风率增长较快，2015—2016年增长为2014年的3倍多，2015年是弃风率增长最高的一年，2016年弃风率增长明显放缓，但全国弃风率仍高达19%。

从“三北”地区风电新增并网容量上看，2016年“三北”地区弃风率增长速度放缓与近年来“三北”地区风电并网容量大幅下降也存在着一定关系。2014—2016年我国“三北”地区风电新增并网容量如图1-4所示，风电机组利用小时数如图1-5所示。较

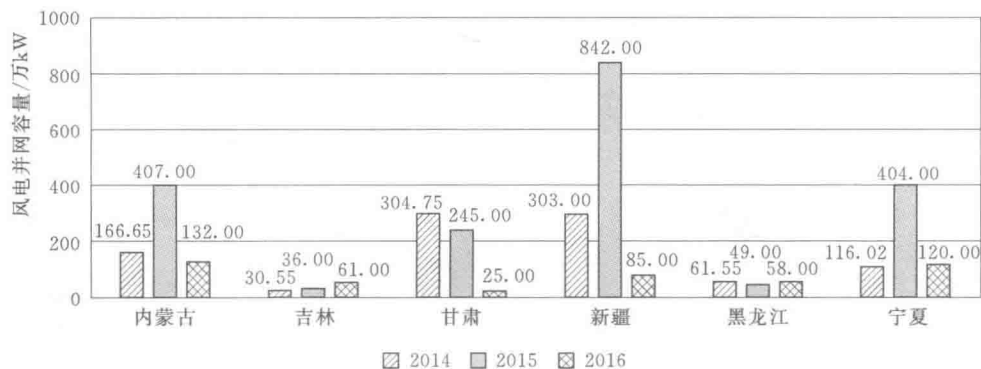


图 1-4 2014—2016 年我国“三北”地区风电新增并网容量  
(数据来源：国家能源局)



2015年,除吉林、黑龙江新增并网容量同比有小幅增长外,其余省(自治区)新增并网容量均大幅下降,特别是新疆地区,2016年新增并网容量下降了90%。

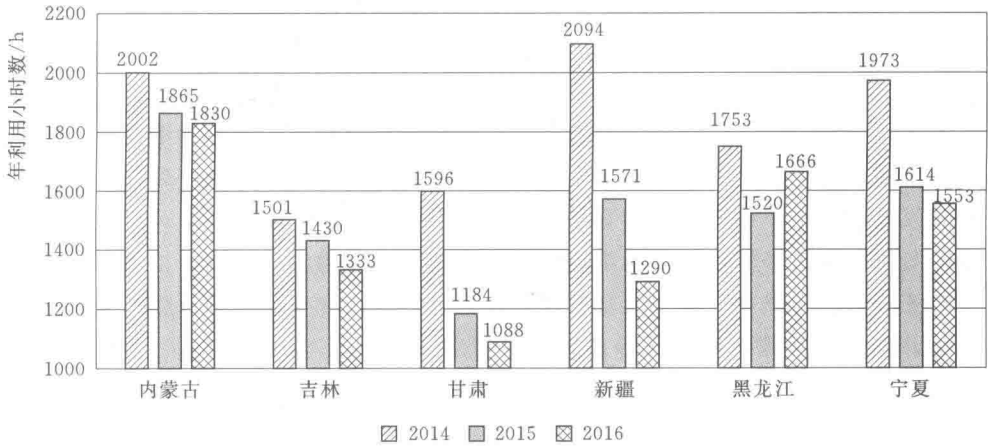


图 1-5 2014—2016 年我国“三北”地区风电机组年利用小时数  
(数据来源:国家能源局)

### 2. 海拔较高的风能可开发区

中国高海拔地区主要分布于四川、云南、贵州、青海、西藏等省(自治区)。2017年一季度高海拔地区各省(自治区)风电并网容量见表 1-3,青海为新增装机容量较多的省份(59 万 kW)。青海省占全国风电新增装机的 16.76%,相对较高。贵州和西藏没有新增装机容量。

表 1-3 2017 年一季度高海拔地区各省(自治区)风电并网容量

省 份		新增并网容量 /万 kW	累计并网容量 /万 kW	占全国新增风电装机的百分比 /%
西北地区	青海	59	79	16.76
华南地区	四川	5	130	1.42
	云南	11	739	3.13
	贵州	0	362	0
西南地区	西藏	0	1	0

注:数据源自国家能源局。

### 3. 海上风能丰富区

我国海上风电开发于 2004 年拉开序幕,广东南澳建设的首个 20MW 海上风电场已于 2010 年竣工。上海东海大桥 100MW 海上风电项目于 2005 年开始规划,2010 年建成投产,是除欧洲以外的第一个海上大型风电项目。近年来,随着我国陆上风电建设渐入佳境,海上风电也在稳步发展。根据前瞻产业研究院发布的《中国海上风力发电行业市场调研与投资预测分析报告》,2015 年我国新核准的海上风电容量为 201 万 kW,其中新增了



大约 30 万 kW 的装机容量；而在 2016 年，我国的海上风电新增装机容量为 59.2 万 kW，相比 2015 年增长 60%。并且，在国家能源局发布的《可再生能源发展“十三五”规划》中明确表示，在 2020 年前将会有 1000 万 kW 的海上风电开工建设，并且要求确保有 500 万 kW 的风电设施建设完成。

#### 4. 东南沿海和内陆局部风能丰富区

我国除“三北”地区以外的内陆地区，风能资源相对较差，而且地形复杂、建设条件差。但是，随着我国风电的快速发展，“低风速”“高海拔”型风电机组的研发，以及“三北”地区风电并网与消纳等因素的影响，2010 年开始大批风电开发商不断南下，风电市场逐步转向风电接入条件优、消纳市场好的中东部和南方等内陆地区。这说明我国中东部和南方地区的风电开发也开始步入规模化阶段，分散式的风电开发布局效果显著。2004—2014 年我国各区域新增风电装机容量如图 1-7 所示。

## 1.3 山地风电场开发现状

### 1.3.1 概述

根据地形及海拔等因素可将风电场分为平原风电场和山地风电场。

平原风电场一般是指在风电场及周围 5km 半径范围内地形高度差不超过 50m、最大坡度小于 3°的区域，我国“三北”地区风电场属于典型平原风电场，在我国风电中所占比例相当大。

我国南方地区的风电场基本以复杂地形的山地风电场为主，复杂地形是指平坦地形以外的地形，大致可分为隆升地形和低凹地形两类，包括山脉、丘陵、谷地等。复杂山地地形高差起伏较大，地表有曲折、转弯和折角等特征。本书所指的山地风电场既包含常规的高原山地风电场，也包含其中的特例——峡谷风电场。

### 1.3.2 山地风电场特点

#### 1.3.2.1 气候地理特点

高山气候一般指在大型高原和高大山地具有的一种特殊的局部气候类型。在高大山地，气温随高度增高而降低，气候垂直变化显著，在一定高度内，湿度大、多云雾、降水多；愈向山地上部，风力愈强。在中纬度地区的高原地区，如中国青藏高原，海拔高、气温低，但辐射强、日照丰富、降水少，冬季风力强劲。气温的年温差较小，日温差较大。高山高原气候表现为气温低、气压低。自海平面起，每升高 1km，温度则下降大约 6℃。气压则成反比，高度越高，气压越低。在标准状况下，每升高 100m，气压降低 1kPa。而人在低气压下易出现呼吸急促、食欲不振等症状，也就是高山病的表征。多露、多风是其又一明显特征。高山上的气候在一日内变化多端，无论是在夏季或冬季，整座山经常陷入雾茫茫的世界里，四周能见度突然降低。高山多风是因为高山地形起伏相差悬殊，地面接受太阳辐射热及热力分配不平均，所以经常产生空气流动的现象。





我国海拔 1000m 以上的土地面积约占全国陆地总面积的 60%，海拔 2000m 以上的面积约占 33%，海拔 3000m 以上的面积约占 16%，这些地区有着丰富的风能资源。高海拔地区的环境条件对风电机组设备的正常工作有着显著影响。研究风电机组高原的适应性具有极其重要的意义。

与平原相比，高原的气候特点主要表现在：空气稀薄、低气压和低氧，气候寒冷、干燥、多风，光照强度大等，随着海拔的增加，大气压力下降，空气密度和湿度相应地减少，其特征主要表现为如下：

- (1) 空气压力或空气密度较低。
- (2) 空气温度较低，温度变化较大。
- (3) 空气绝对湿度较小。
- (4) 太阳辐射照度较高。
- (5) 降水量较少。
- (6) 年大风日多。
- (7) 土壤温度较低，且冻结期长。
- (8) 高原地区出现雷暴天气的频率相对较高。

高原环境参数见表 1-4。

表 1-4 高原环境参数

序号	环境参数		海拔					
			0m	1000m	2000m	3000m	4000m	5000m
1	气压/kPa	年平均	101.3	90.0	79.5	70.1	61.7	54.0
		最低	97.0	87.2	77.5	68.0	60.0	52.5
2	空气温度/℃	最高	45.4	45.4	35	30	25	20
		最高日平均	35.3	35.3	25	20	15	10
		年平均	20	20	15	10	5	0
		最低	+5, -5, -15, -25, -40, -45					
最大日温差/K		15, 15, 15, 15, 25, 30						
3	相对湿度/%	最湿月月平均最大 (平均最低气温/℃)	95.9 (25)	95.9 (25)	90 (20)	90 (15)	90 (10)	90 (5)
		最干月月平均最小 (平均最高气温/℃)	20 (15)	20 (15)	15 (15)	15 (10)	15 (5)	15 (0)
4	绝对湿度/(g·m <sup>-3</sup> )	年平均	11.0	7.6	5.3	3.7	2.7	1.7
		年平均最小值	3.7	3.2	2.7	2.2	1.7	1.3
5	最大太阳直射辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )		1000	1000	1060	1120	1180	1250
6	最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )		25, 25, 25, 30, 35, 40					
7	最大 10min 降水量/mm		30					
8	1m 深土壤最高温度/℃		30	25	20	20	15	15

注：1. 为便于比较，将标准大气条件参数（0~1000m）列入表中。

2. 在最低空气温度、最大日温差、最大风速、最大 10min 降水量等几项中，可取所列数值之一。



### 1.3.2.2 风能资源分布特点

山地风电场地形条件复杂,可供布置的区域相对较少,多数位于山脊、峡谷地区。风能资源受地形的影响变化较大,山区气象站测风资料一般难以反映场地的资源情况。因山地气象站基本设立于山区的平坦地带,如平坝或者山谷,气象站实测风速一般较小,风电场潜在开发区域基本无观测资料,因此需通过现场考察等手段了解资源情况,主要考察地物的变化情况,包括地表物质的堆积、植物永久变形现象,尤其是植物的永久变形情况,它是判别当地风速高低和主风向的重要标志。

对于山地风电场,由于其特殊的地理特性,使得其空气密度低于平原风电场,因此在相同风速的情况下,山地风电场风功率等级相对要低一些。如某高海拔山地风电场测风塔50m高度平均风速为8.81m/s,风功率密度为497.5W/m<sup>2</sup>。根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710-2002),判定其风功率等级为4级,属风能资源好的区域;但若依据风速来判断,则属于风能资源很好区域。

由于地形条件复杂,测风塔的代表性相对较差,代表区域较小,使用测风塔数据推算出的各机位处的风能资源特征参数和实际的误差较大。对于山地风电场,可能有多座测风塔,为更好地分析测风塔代表性,则需要研究相同测风塔不同高度、不同测风塔相同高度风速相关性,从而大致确定各测风塔大致代表区域范围。一般来讲,相同测风塔不同高度相关性较好,离地越高相关性越好。不同测风塔(或测风塔与长期测站)相同高度相关性因地形地貌而异,地形越类似、距离越近,相关性越好;反之,相关性越差。高原峡谷、山地区域同一位置不同高度风速相关性较好,可以利用测风塔各层数据进行相关插补形成整套数据,同时各测风塔对其附近一定区域内(1~3km)有较好的代表性。

对于山地风电场,当来风方向与山脊成一定夹角(大于30°)时,迎风坡风速低于山脊风速,而由于气流脱流现象,导致背风坡风速紊乱,基本不可利用。

湍流强度是进行风电机组安全性分析的主要参数之一,其主要用于衡量相对于风速平均值而起伏的湍流强弱,表征风速波动的剧烈程度。风速波动越大,对风电机组的机械结构冲击越大,造成的荷载也越大。精确计算湍流强度通常较为困难,山地风电场中,测风塔的实测湍流强度也不能代表整个风电场全部区域的情况,应计算分析各机位处湍流强度,综合分析选取风电场合适的湍流强度等级。

对于山地风电场,风速分布不总是符合威布尔分布,也就是拟合的威布尔曲线不能很好地跟踪各风速区间风速概率柱状图,这就导致风电场发电量评估的不确定性增加。对于具体项目,应该结合风电机组的切入切出风速,定性研究分析威布尔分布计算发电量结果,判断是高估还是低估,并在此基础上进行修正发电量计算值。

地面附着物较多、地形起伏大导致地表粗糙度较大,近地面处的风速风向受影响程度较大,并随离地高度增加受影响程度逐渐减弱。因此必须重视风电机组选型和布置工作,以保证风电机组稳定、可靠运行。

山地风电场应重视风能资源的不均匀分布、空气密度、大气热稳定度、风电机组尾流损失等特性,因此宜在项目前期对测风塔的数量和布置情况进行分析,全面掌握测风数据,为山地风电场的实际情况提供支撑。



### 1.3.2.3 设计特点

随着近些年我国风电的大力发展,越来越多的风电场开始建设,导致风能资源丰富以及建设条件良好的区域越来越少,不少开发商已经逐渐重视条件相对复杂的山地风电场的开发。

#### 1. 工程地质

建设山地风电场需考虑其场地地形复杂、道路陡峭曲折、山顶密树丛生、岩石坚硬密实等特点,还需要考虑很多地质因素,如地形地貌、地层岩性、地质构造、不良地质现象等。理想的风电场地理位置都比较偏僻,自然条件相对恶劣,交通不便,施工物资及人员进出很不方便。另外场址区主要的风电机组机位均位于山顶或山脊上,风电机组承台及基础地基以岩石为主,需要爆破开挖,而土石方爆破难度大。根据爆区的地形、地貌、地质条件、环境和施工要求,需采用不同的爆破方法。不良地质现象方面,岩体卸荷容易形成危岩和崩塌。

#### 2. 道路条件

在山地风电场的设计中,道路设计是一个非常重要的组成部分,与常规平原风电场相比,由于地形地貌的复杂,道路设计更加困难。目前,还没有专门针对风电场道路设计的相关规范和标准,更多的是参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)或者《厂矿道路设计规范》(GBJ 22—1987)等相关规范中的道路标准来进行风电场道路设计(并非完全依照规范内容,规范仅作为参考使用)。

(1) 纵坡。对于常规平原风电场来说,道路纵坡一般控制在 $9\% \sim 12\%$ ,但是到了山地风电场,由于地势地形的原因,山地起伏很大,若要保持纵坡在 $9\% \sim 12\%$ ,会大大增加工程量,同时对环境的破坏也会非常明显,在环保和经济性方面表现较差。因此在山地风电场的道路设计上,常采用车辆牵引的方法,道路设计纵坡可能达到 $16\%$ ,甚至 $18\%$ 。

(2) 转弯半径。转弯半径的大小主要取决于设备的大小及运输方式,而在设备中最主要的影响因素是风电机组的叶片和塔架。在平原风电场的设计中,地形条件简单,更多采用的是常规的平板拖车进行设备的运输,但若应用于山地风电场,将大大增加对转弯半径的要求。一般对单机容量 $2\text{MW}$ 的风电机组来说,若用平板拖车进行叶片运输,转弯半径大概在 $60 \sim 70\text{m}$ 。若采用可回旋的扬举式特种车辆进行设备运输,叶片对转弯半径的要求将小于风电机组塔架对转弯半径的要求,此时,塔架则作为转弯半径设计参考的依据。单机容量 $2\text{MW}$ 的风电机组,塔架多为三节或四节,此时转弯半径设计值将控制在 $20 \sim 25\text{m}$ ,相比常规运输方式,大大减小了工程量。因此,相比平板拖车的方式,在地形地势条件复杂的山地风电场的设计中,特种车辆运输的方式更具优势,也更具可行性。

#### 3. 吊装平台

吊装平台在平原风电场设计中体现的不是很明显,对设备运输及吊装不会产生影响。但是在山地风电场中,由于风电机组往往布置在相对位置较高的山头,因此每台风电机组吊装平台可利用的面积就会大大缩小。



#### 4. 升压站

升压站作为风电场中的重要组成部分之一，一直扮演着重要的角色。在山地风电场中，由于地形、地势等因素的影响，山地风电场升压站的可利用面积十分有限，升压站占地面积比平原风电场升压站小很多，而且总体布局也与平原风电场不同，具体表现如下：

(1) 占地面积。山地风电场升压站的占地面积受地形限制，很多山地风电场升压站在高压配电装置上采用了GIS方案。在山地风电场设计中，电气设备应尽量选用占地面积小的设备，可以起到压缩占地面积的作用。目前，有的山地风电场采用了集成式变电站的设计方案，集成式变电站占地面积小，适用于各种地形，成本相对较低，山地风电场中采用这种方案也是一个不错的选择。

(2) 总平布置。山地风电场升压站设计中，需要利用相对有限的位置将功能最大化。因此，结合站址地理特点的布局才最适合山地风电场。山地风电场在利用面积受限的情况下，通常采用的布局并非常规的矩形布置，而是L形布置、T形布置、阶梯式布置，或是将生产区和生活区分开成两个单独小站布置等。

#### 5. 集电线路部分

集电线路也是风电场设计的重要组成部分之一。山地风电场由于地形地势复杂，可利用的地方少，高低落差大，其集电线路的设计相对平原风电场更加困难，主要表现在杆塔设计和远距离跨越两方面。

(1) 杆塔设计。在山地风电场中，由于山地的地形地势特点，常常导致线路有较大的高差，这时，在设计中既要考虑水平拉力，又需要着重考虑纵向拉力，以免在高差较大的地区出现杆塔由于纵向拉力被“拔”出地面。

(2) 远距离跨越。而在山地风电场中，由于风电机组位于一个个山头，距离也相对较远，若果采用常规的杆塔，在远距离跨越的时候会“绕路”，造成很大的浪费，这时就体现了远距离跨越在山地风电场设计中的优势了。利用山峰之间的峡谷空隙，可采用远距离跨越来完成线路的连接，由于山谷与山峰间的高差非常大，因此可以满足导线在远距离跨越时弧垂的要求。相比“绕路”方案，工程量会大大减少。

#### 1.3.2.4 山地风电场开发的优点

(1) 可开发风电场场址基本位于高山山脊和高山台地地区，远离经济区域，场址区土地较为贫瘠，人类活动极少，风电场建设与土地利用规划之间的矛盾相对较少。

(2) 目前，我国南方的电源结构总体以水电为主，电网丰枯矛盾尖锐，水电丰枯出力差距很大，一般的径流式水电的枯季出力不足20%，调节性能好的大型水电的枯季出力也只有50%左右。与此相反，南方地区枯季的风电出力最大。因此，水电与风电具有良好的互补特性，发展风电有利于改善我国电源结构，在一定程度上缓解电网丰枯矛盾，缓解南方地区枯期缺电的局面。

(3) 我国风电的整体规模较小，风电场就地消纳能力较强。

#### 1.3.2.5 山地风电场开发的难点

(1) 山地风电场主要集中在山地及高原地区，地形相对复杂，风能资源受地形的影响变化较大，山区气象站一般设立于经济条件较好的山谷或平坝地区，气象站测风资



料一般难以反映场地的资源情况。对风能资源的观测及评估是山地风电场开发的一个难点。

(2) 山地风电场主要集中在山地及高原地区,经济基础较差,交通基础设施较为落后,场地山高坡陡,交通运输及道路组织方案是制约山地风电场开发的关键因素。

(3) 并网条件相对较差。由于风电开发总体起步较晚,新能源规划晚于电网规划,电网规划中未考虑新能源电源点的接入,导致风电并网条件较差。风电具有间歇性、随机性,以及可调度性低的特点,其规模的迅速扩大在给电网带来一定压力的同时也给并网带来一定的困难。

(4) 受地形条件的限制,山地风电场一般以山脊为一个开发单元,主要以分散式开发为主,点多面广,很难形成大规模集中开发的风电场,对山地风电可开发总体规模的认识有待提高。

(5) 风电场运行条件差。山地风电场受地形影响,湍流强度相对较大,对风电机组的安全要求相对较高;风电场处于有高雷暴、高湿度、强凝冻的环境,尤其是高雷暴问题是制约风电场安全运行的重大问题。

相对于“三北”地区大规模的风电基地而言,南方地区风电与水电的互补性较强,以分散式开发为主,受地形、经济发展水平、运行环境的影响,建设成本相对于“三北”地区风电场较高,但因其总体规模较小,就地消纳能力较强。

### 1.3.3 山地风电场规划建设情况

#### 1.3.3.1 山地风电场规划

国家能源局统筹考虑各地区风电开发建设现状和市场消纳情况,编制了2016年全国风电开发建设方案。在西部地区的山地风电场规划主要涉及贵州、四川、青海、西藏等省(自治区)。

##### 1. 贵州

2016年6月24日贵州省人民政府印发的《贵州省推动电力行业供给侧结构性改革促进产业转型升级的实施意见》指出,加大风电项目建设力度,促进风电与观光旅游综合开发,实现贵州省风能资源充分合理开发利用,力争到2020年装机容量达到600万kW。

“十三五”期间,重点开展山地抗凝冻低风速启动风电机组的技术研究和应用,研发高效率转换光伏组件。

为促进能源结构调整,推动能源生产和消费革命,贵州省能源局统筹制定了2016年贵州省风电开发建设方案。该方案提出为促进风电产业持续健康发展,2016年贵州省风电开发建设总规模209.94万kW,其中集中式风电项目规模202.74万kW,分散式接入风电项目规模7.2万kW。

##### 2. 四川

“十三五”期间,四川省将在“十二五”工作的基础上,增设风能资源观测塔,全面摸清全省各地市州风能资源,高原风电建设有所突破,完成甘孜州风电规划研究,力争建成1~2个高原风电项目。根据《四川省凉山州风电基地规划报告》研究成果,结合风能



资源最新资料和风电建设条件最新进展,适时调整风电基地逐年投产规模,力争到“十三五”末,全省风电总装机规模达到或超过 700 万 kW。

根据四川省风能资源开发规划场址建设条件综合分析,结合全省最新能源发展规划以及《四川省风能资源开发规划研究报告》研究成果,提出四川省风电开发规划。初步规划,到 2020 年,全省规划投产风电场 120 个,投产规模达到 750 万 kW。

### 3. 青海

根据《国家能源局关于下达 2016 年全国风电开发建设方案的通知》(国能新能〔2016〕84 号)精神,国家下达 2016 年青海省风电开发建设规模为 100 万 kW,青海省发展和改革委员会在统筹考虑各项目风能资源和开发建设条件的基础上,研究编制了《青海省 2016 年度风电开发建设方案》(以下简称《方案》),经青海省能源资源开发建设协调领导小组专题会议审定,将 16 个项目列入《方案》,总装机容量 100 万 kW。

### 4. 西藏

西藏高原空气稀薄,气压低。全区平均气压仅为海平面的一半,即同等风速和气温下,风功率密度大小仅为海平面的一半。70m 高度,不小于  $200\text{W}/\text{m}^2$  的技术开发量为 118 万 kW,而不小于  $400\text{W}/\text{m}^2$  的技术开发量比较小,约有 53 万 kW 的风能资源技术开发量可供小规模离网型风力发电利用,但风电场的建设受环境制约较大,小规模、离网型的风力发电,将使风能资源得到更加充分的利用。

从季节分布看,冬季、春季风能较丰富,秋季风能最小。由于西藏高原地区缺乏足够的观测资料,风能资源的具体情况需要进一步观测。但从分析看,海拔 3500m 以上,潜在装机区域主要分布在藏北高原及日喀则地区西北部零星地带,藏北开发潜力较大。

总体来说,在西藏高原适宜地区,可以尝试使用小型风电机组,发展小规模离网风力发电。

#### 1.3.3.2 山地风电场建设

2016 年部分地区风电产业发展统计数据见表 1-5。2016 年,全国风电产业继续保持增长势头,全年风电新增装机容量 1930 万 kW,累计并网容量达到 1.49 亿 kW,风力发电量 2410 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

2016 年,云南、贵州、四川、青海、西藏五省(自治区)年利用小时数最高的地区是四川 2247h,年利用小时数最低的地区是贵州,为 1806h。

表 1-5 2016 年部分地区风电产业发展统计数据

省 (自治区)	新增并网容量 /万 kW	累计并网容量 /万 kW	发电量 /(亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ )	弃风电量 /(亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ )	弃风率 /%	年利用小时数 /h
四川	52	125	21			2247
青海	22	69	10			1726
西藏	0	1	0.1			1908
贵州	39	362	55			1806
云南	325	737	148	6	4	2223

#### 1. 云南

自云南省首个风电项目大理者摩山风电场并网发电以来,云南省风能资源开发利用逐



渐提速。据云南省能源局发布的风电场规划报告显示,云南全省可开发风电装机达 3300 万 kW 以上。

为应对风电等新能源大幅增长对电网安全及消纳能力带来的挑战,保障新能源的健康持续发展,云南电网公司加强风电新能源并网管理,落实“一站式”服务,优化风电并网时序和流程,规范、快速办理并网手续,助推新建风电顺利投产。在保障电网安全稳定运行的前提下,全力做好节能优化调度,根据国家能源局发布的《2017 年一季度风电并网运行情况》,截至 2017 年一季度,云南省风电项目新增并网容量 11 万 kW,累计并网容量 412 万 kW。

云南地区风电利用情况见表 1-6,从表中数据分析,近几年云南省风电年利用小时数保持在 2200h 以上,居全国各省前列,虽存在少量弃风问题,但整体上风电运行情况非常好。

表 1-6 云南地区风电利用情况表

年 份	风电年利用小时数/h		云南弃风情况	
	全国	云南	弃风率/%	弃风电量/(亿 kW·h)
2013	2074	2388	3.68%	1.69
2014	1908	2511	4.31%	2.81
2015	1728	2573	3%	3
2016	1742	2223	4%	6
2017 年一季度	468	939	5%	4

## 2. 贵州

根据国家能源局发布的《2016 年风电并网运行统计数据》,截至 2016 年年底,贵州省风电项目新增并网容量 39 万 kW,累计并网容量 362 万 kW。

表 1-7 为贵州地区风电利用情况,从表中数据可知,近几年贵州省风电利用小时数在 1100h 以上,没有弃风现象。

表 1-7 贵州地区风电利用情况表

年 份	风电利用小时数/h		贵州弃风情况	
	全国	贵州	弃风率/%	弃风电量/(亿 kW·h)
2013	2074	2060	0	0
2014	1908	1575	0	0
2015	1728	1199	0	0
2016	1742	1806	0	0
2017 年一季度	468	561	0	0



## 3. 四川

为积极响应国家能源发展战略,调整经济发展方式,四川省提出在“十三五”期间,要科学有序地发展新能源,力争到 2020 年,全省非化石能源消费量占一次能源消费总量的 37.8%,要完成这一目标和任务,必须积极发展循环经济,大力推进风能资源开发利用。风电发展现状主要体现在以下方面:

(1) 测风工作全面展开,多地区具备风能资源开发价值。在全国风电大开发的背景下,四川省能源局委托四川省气象局先后在凉山、甘孜、阿坝、攀枝花、绵阳、广安设立 12 座测风塔,以摸清全省风能资源的区域分布特点。目前各大电力企业陆续开始在四川开发风电,又设立了多座测风塔开展风能资源观测。据不完全统计,四川省已设立测风塔超过 100 座,主要分布在以凉山州为代表的盆周山区。从测风塔风能资源数据分析结果来看,多数地区风功率密度等级达到 2 级及以上,基本具备风电开发价值。

(2) 风电开发外部环境不断改善。以接入系统和交通运输为代表的外部环境显著改善。目前四川省 500kV 及以上电网目标网架的基本框架完全形成,500kV 网架基本覆盖了四川电网的每个负荷中心。220kV 电网已经覆盖了 21 个市州,除阿坝、甘孜、巴中等少数市州外,大部分市州均已建成 220kV 环网,形成了较为坚强的地区骨干电网。全省高速公路进出川大通道建成 7 个、在建 11 个,以高速公路为骨架的干线公路网建设布局全面展开,国省干线升级改造和农村公路建设稳步推进,内河航道和港口建设进展顺利。风电开发外部环境的改善为风电建设提供了必不可少的前提条件。

(3) 风电机组制造形成规模化生产能力。经过多年发展,四川省的风电机组制造企业——东方电气集团已具备独立设计、研发、生产、售后单机容量 1~5MW 的弱风型、低温型、抗台风型、高原型双馈和直驱风电机组,目前年生产能力超过 1000 万 kW,主要的生产机型包括东汽 1.5kW、东汽 2.0MW、东汽 2.5MW 和东电 1.5MW、东电 2.5MW 等。

(4) 规划引领,风电开发进入快速发展阶段。优化风电开布局,总量控制,适度开发。依据国家已批准实施的凉山州风电基地规划,到 2020 年,全省风电建成并网规模达到 600 万 kW,其中凉山州风电基地建成并网 453 万 kW。

## 4. 青海

青海地区风电利用情况见表 1-8,从利用小时数来看,2015 年青海风电产业年利用小时数最高,其余三年基本保持在 1700h。

表 1-8 青海地区风电利用情况表

年份	新增并网容量 /万 kW	累计并网容量 /万 kW	累计上网电量 /(亿 kW·h)	发电量 /(亿 kW·h)	弃风电量 /(亿 kW·h)	弃风率 %	年利用小时数 /h
2014	21.75	31.85	4.29			0	1723
2015	15	47		7			1952
2016	22	69	10	—	0	1726	
2017 年一季度	59	79	3	—	0	366	





## 5. 西藏

根据国家能源局发布的《2016年风电并网运行统计数据》，截至2016年年底，西藏累计并网容量1万kW，风电项目无新增并网容量。

西藏自治区目前只有一个风电项目——龙源那曲高海拔风电项目。项目投产实现了我国西藏风电装机容量的零的突破，并且是世界上海拔最高的风电项目。该项目位于西藏那曲地区那曲县，占地约312亩<sup>①</sup>，安装33台96m长叶片、单机容量1500kW的风电机组，总装机容量49.5MW，项目分为两期建设，该项目进一步缓解了藏北那曲的缺电问题。

① 1亩=666.7m<sup>2</sup>