

黄林宏, 宋丽莉, 李刚, 等. 2016. IEC 的风机选型参数估算方法在中国的适用性研究. 气象, 42(12): 1522-1530.

# IEC 的风机选型参数估算方法在中国的适用性研究<sup>\*</sup>

黄林宏<sup>1</sup> 宋丽莉<sup>2</sup> 李刚<sup>1</sup> 王丙兰<sup>2</sup> 张永山<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

<sup>2</sup> 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

**提 要:** 国际电工委员会编制的《风力发电机组设计要求》(IEC 61400-1)推荐了针对风电机组安全等级评估的极端风速和湍流强度特征值估算方法, 因其简单便捷, 在风电领域被广泛采用。利用全国风能资源专业观测网的 193 座测风塔观测数据, 对 IEC 推荐的极端风速计算方法与我国规范推荐的基于极值 I 型概率分布方法进行比较, 发现两种方法计算的 193 座塔 70 m 高度层 50 年一遇 10 min 平均最大风速, 仅有 7 座测风塔较为一致, 差异在  $\pm 1\%$ ; IEC 推荐方法的计算结果多数偏小, 其中偏小 10% 以上的测风塔有 121 座, 偏小 30% 以上的有 44 座测风塔, 而偏大 10% 以上的只有 9 座测风塔; IEC 方法计算的极值风速大幅度偏小的测风塔主要分布在台风影响的东南沿海地区, 偏差较小的测风塔主要分布在西北和华北地形平缓区域, 但同时偏大 10% 以上的测风塔也多分布在这一地区。以目前行业领域普遍采用的以  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速的平均湍流强度作为风电机组选型指标, 与严格按照规范, 以  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速段所有样本湍流强度的 90% 分位数处的值作为指标进行风电机组等级确定作对比, 发现 193 座塔中有 46 座塔的选型是不安全的, 甚至相差两个等级。

**关键词:** WTGS 选型参数, 50 年一遇 10 min 平均最大风速, 湍流强度特征参数, IEC 标准适用性

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.010

## Applicability of Estimation Methods of IEC WTGS Selecting Parameters in China

HUANG Linhong<sup>1</sup> SONG Lili<sup>2</sup> LI Gang<sup>1</sup> WANG Binglan<sup>2</sup> ZHANG Yongshan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Public Meteorological Service Centre, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** Estimation methods of extreme wind speed and turbulence intensity parameters for wind turbine classes recommended by IEC 61400-1 Ed. 3; *Wind turbines Part 1: Design Requirements* are widely used in wind energy because of its simple and convenient features. Based on the observation data from 193 masts in the professional observation network of wind energy resource in China, we compare the extreme 10 min average wind speeds within a recurrence period of 50 years ( $V_{50}$ ) by IEC method and extremum I distribution which is recommended in China, and obtain the following findings. First of all, there are only 7 masts where the values of  $V_{50}$  by the two methods is relatively consistent within  $\pm 1\%$  deviation. Values of  $V_{50}$  by IEC method are generally smaller, and there are 121 masts with  $V_{50}$  lower than  $-10\%$  and 44 masts with the value lower than  $-30\%$ , while only 9 masts have the value higher than  $+10\%$  all around the country. After that, masts with much smaller  $V_{50}$  by IEC method are mainly distributed in southeastern coastal areas affected by typhoon, while masts with small deviations are mainly distributed in the regions with flat terrain in the Northwest and North China, and the masts with deviation over 10% are also concentrated

\* 科技部科技基础性工作专项项目(2013FY112400)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306057)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX\_0825)共同资助

2016 年 5 月 6 日收稿; 2016 年 5 月 28 日收修定稿

第一作者: 黄林宏, 从事风资源评估研究. Email: huanglinhong1986@163.com

通信作者: 宋丽莉, 主要从事气候资源、强风边界层等领域研究. Email: songll@cma.gov.cn

right here. Finally, 46 masts will go into errors if they are calculated only by characteristic indices of the mean turbulence intensity in  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wind speed, compared to results by the 90% quantile for  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wind speed.

**Key words:** WTGS selection parameters, 10 min maximum average wind speed seen once in 50 years, turbulence intensity parameter, applicability of IEC

## 引 言

我国自 2010 年以来,风电装机总量持续位居世界第一,至 2015 年底我国风力发电累计并网装机容量达到了 1.29 亿 kW。根据我国十三五可再生能源发展规划,到 2020 年,我国风电装机要达到 2 亿 kW 以上,《中国风电发展路线图 2050》(国家发展和改革委员会能源研究所,2014),将风能太阳能资源开发利用确定为我国实现低碳能源战略的主要途径。

风电开发的首要环节是风能资源评估,风力发电机组(简称 WTGS)选型参数是风能资源评估的重要内容,是风电机组选型和风电场设计的基础依据。国际电工委员会制定的《Wind turbines—Part 1: Design requirements》(以下简称 IEC 61400-1)(IEC, 2005),是风电开发领域应用最广泛的规范性文件,我国制定的相关规范(中国机械工业联合会,2001;北京鉴衡认证中心等,2012),多是在 IEC 规范的基本框架下转化而来。然而,随着我国大规模风电场的建设运行,尤其大量建设在复杂地形和沿海台风影响区域风电场的运行,发电企业逐步发现,很多风电场的实际发电表现和风电机组的运行稳定性与项目可研设计预期有较大偏差,一方面,风电机组抗击当地极端天气的能力不足,故障率居高不下,另一方面也存在过高估算风电机组的安全参数导致选型失误,从而造成风电场发电效益低下等。这些问题常常与项目前期风能资源测量和评估的准确性、可靠性密切相关,也与现行规范推荐的参数评估方法在不同地区的适用性以及规范指导的技术要求执行不到位有关。

本文利用全国风能资源专业观测网测风塔观测数据,在观测数据质量检验(任芝花等,2015)和有效完整性判别(Huang et al, 2015)条件下,选择了其中的 193 座测风塔实测数据,就 IEC 61400-1 规范推荐的风电机组选型的极值风速的估算方法与我国规范推荐的方法进行比较,分析其在我国不同地

区的适用性,并对我国现行规范推荐的湍流强度特征参数的可靠性、代表性进行分析和讨论,以期对目前我国风能资源评估中存在的问题进行剖析,为推动该领域的技术发展和相关规范的修编提供思路和参考依据。

## 1 基础资料处理

本文采用的基础数据,是从全国风能资源专业观测网设置的 400 座测风塔 2 年多的观测资料中,选择了 1 年度观测数据有效完整性 $\geq 90\%$ 的 193 座测风塔观测数据。

全国风能资源专业观测网的 400 座测风塔中,70 m 塔 329 座、100 m 塔 68 座、120 m 塔 3 座,均为正三角形桅杆式钢结构拉线塔,风速观测高度设置在离地面 10、30、50、70、100、120 m 高度层。测风仪采用华云公司生产 CAWS1000-GSW 型以及无锡公司生产的 ZQZ-NT 型测风系统,两类风速传感器启动风速 $\leq 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,测量范围为  $0 \sim 75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速采样频率为 1 s,数据采集器记录逐个 10 min 的平均风速、3 s 极大风速以及风速标准差。

考虑目前大型 WTGS 轮毂高度多在 70 m 左右,因此以各塔 70 m 高度层连续 12 个月(1 个年度)的逐 10 min 平均风速观测资料为分析目标。由于外场观测过程中常受到恶劣天气和环境因素的影响而导致观测数据异常或缺测,参照相关规范(中国水利水电建设工程咨询公司,2002;中国气象局,2007)对原始观测数据进行质量检验,并计算其数据有效完整率:

数据有效完整率 =

$$\frac{\text{应测数据量} - \text{缺测数据量} - \text{无效数据量}}{\text{应测数据量}} \times 100\% \quad (1)$$

式中的数据量是指全年逐个 10 min 平均风速记录个数。

从 400 座测风塔观测资料中,选取了处于不同地形地貌上,并且满足一个年度内测风塔 70 m 高

度获取的风速观测数据有效完整率 $\geq 90\%$ 的 193 座测风塔观测数据,其中,70 m 高度的测风塔有 160 座、100 m 高度的测风塔有 30 座,193 座测风塔的地理位置分布见图 1。

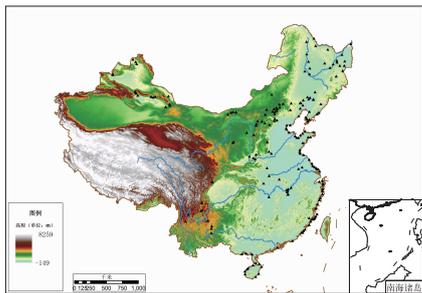


图 1 193 座测风塔分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the 193 wind towers

## 2 极值风速分析

IEC 61400-1 和我国规范《风力发电机组设计要求》(中华人民共和国质量监督检验检疫总局 & 中国国家标准化管理委员会, GB/T18451.1-2012)均以极值风速作为风电机组安全等级的分级指标(见表 1)。这里的极值风速  $V_{\text{ref}}$  是指 WTGS 轮毂高度上 50 年一遇的 10 min 平均最大风速。

表 1 各等级 WTGS 基本参数

Table 1 Basic parameters for wind turbine classes				
WTGS 等级	I	II	III	S
$V_{\text{ref}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	50.0	42.5	37.5	由 WTGS 制造商规定各参数

表 1 中,  $V_{\text{ref}}$  为 WTGS 的分级参考风速,以 50 年一遇 10 min 平均最大风速来确定。

### 2.1 极值风速估算方法

(1) IEC 规范推荐的极值风速计算方法

IEC 61400-1 中给出的极值风速模型为:

$$V_{50}(z) = V_{\text{ref}}(z/z_{\text{hub}})^{0.11} \quad (2)$$

式中,  $V_{50}(z)$  为高度  $z$  处的 50 年一遇 10 min 平均最大风速,  $V_{\text{ref}}$  为 WTGS 的分级参考风速(表 1),  $z_{\text{hub}}$  为轮毂高度。当  $z$  等于  $z_{\text{hub}}$ , 那么, 式(2)就可改写为:

$$V_{50}(z_{\text{hub}}) = V_{\text{ref}} \quad (3)$$

IEC 61400-1 定义在标准的风力机等级中, 有以下经验表达式:

$$V_{\text{ave}} = 0.2V_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中  $V_{\text{ave}}$  为年平均风速。

由式(3)和式(4), 轮毂高度处 50 年一遇 10 min 平均最大风速表达式写为:

$$V_{50}(z_{\text{hub}}) = 5 \times V_{\text{ave}} \quad (5)$$

式(5)表明, WTGS 轮毂高度  $z_{\text{hub}}$  的 50 年一遇 10 min 平均最大风速, 可以通过轮毂高度年平均风速  $V_{\text{ave}}$  的 5 倍来估算, 这种方法简便、易行, 因此, 目前的很多风电场风资源评估, 只采用风电场测风塔获取的 1 年度风速平均值, 就可以通过式(5)估算出项目的极值风速参数。

(2) 我国规范推荐的极值风速计算方法

世界上许多国家和地区在工程结构抗风的相关规范多推荐采用极值 I 型分布函数来估算多年一遇的重现期风速(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012; 中华人民共和国建设部, 2007; ASCE, 2006; Architectural Institute of Japan, 2004; Building Department of Hong Kong, 2004; Ge et al, 2010), 为规范和指导我国风能资源评价工作, 国家发改委于 2004 年发布了《全国风能资源评价技术规定》(国家发展和改革委员会, 2004), 该技术规定沿用了其他工程结构的抗风规范, 推荐以极值 I 型分布函数推算风电场 50 年一遇 10 min 平均最大风速。

极值 I 型分布函数为:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\} \quad (6)$$

式中,  $u$  为分布的位置参数, 即分布的众值,  $\alpha$  为分布的尺度参数。

黄浩辉等(2007)从多个大型工程重现期风速计算实践中发现对极值 I 型分布函数中的参数估算时, 选择不同的方法会产生较大的差异, 尤其对更长重现期的风速计算结果影响更为明显, 为此, 不少学者(黄浩辉等, 2007; 孟庆珍等, 2001; 段忠东等, 2004)对极值 I 型分布函数中参数估算的 3 种常用方法——矩法、耿贝尔法和极大似然法等进行对比研究, 发现大多数情况下采用耿贝尔法拟合效果最好。采用耿贝尔法对参数  $\alpha$  和  $\mu$  进行估计, 如下式:

$$\alpha = \frac{c_1}{\sigma} \quad (7)$$

$$u = \mu - \frac{c_2}{\alpha} \quad (8)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma$  分别为参证站 10 m 高度逐年最大风速序列样本的平均值和标准偏差, 计算公式见式(9)和

式(10),  $c_1$ 、 $c_2$  为与样本数量有关的参数,多部规范中直接给出了参考取值(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012),见表 2。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \mu)^2} \quad (10)$$

式中,  $n$  为风速样本数,  $V_i$  为逐年风速最大值样本。

表 2 系数  $c_1$  和  $c_2$

Table 2 Coefficients  $c_1$  and  $c_2$

$n$	$c_1$	$c_2$	$n$	$c_1$	$c_2$
10	0.9497	0.4952	60	1.17465	0.55208
15	1.02057	0.5182	70	1.18536	0.55477
20	1.06283	0.52355	80	1.19385	0.55688
25	1.09145	0.53086	90	1.20649	0.55860
30	1.11238	0.53622	100	1.20649	0.56002
35	1.12847	0.54034	250	1.24292	0.56878
40	1.14132	0.54362	500	1.25880	0.57240
45	1.15185	0.54630	1000	1.26851	0.57450
50	1.16066	0.54853	$\infty$	1.28255	0.57722

则  $z_{s10}$  高度处(对国家气象站,  $z_{s10}$  为 10 m 左右) 50 年一遇 10 min 平均最大风速按下式计算:

$$V_{50}(z_{s10}) = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \ln \left( \frac{1}{50-1} \right) \right] \quad (11)$$

式中,  $z_{s10}$  代表参证站测风仪所在的 10 m 高度,  $V_{50}(z_{s10})$  参证站 10 m 高度 50 年一遇 10 min 平均最大风速。

利用式(11)中进行某地的多年一遇的重现期风速计算,  $u$  的取样为该地逐年最大风速序列,基础数据序列长度通常要求不少于 30 年。由于风电场短期测风塔的逐年最大风速序列长度难以满足极值 I 型分布函数拟合所需要的序列长度要求,因此,需要引入与观测塔相关性较高的长期气象站历史测风数据。《风电场风能资源评估方法 GB/T 18710-2002》(中国水利水电建设咨询公司,2002)和《风电场气象观测及资料审核、订正技术规范 QX/T74-2007》(中国气象局,2007)均推荐了建立两地风速订正关系的技术方法,其中,GB/T 18710-2002 推荐采用分风速方位的线性回归法, QXT74-2007 推荐了基于大风特性的风速比值法,两种方法均有广泛的应用。不少学者对风电场测风塔短期测风数据与周边长期气象站同步测风的相关性分析的样本选择进行了研究(杨梦兮等,2014;谌玲等,2014),采用日最大风速建立的相关关系比采用全部测风数据建立的相关关系,推算的 50 年一遇 10 min 平均最大风速结果更

为稳定。

《全国风能资源详查和评价报告》(宋丽莉等,2014)在参证气象站比选、长期气象站最大风速序列一致性检验处理、测风塔与参证气象站同步测风数据相关分析等方面,做了细致严谨的分析研究,在大量试验研究基础上,采用计算水文不同重现期极值常常使用的极值 I 型分布函数(李兰等,2013;郭渠等,2015)并以耿贝尔法进行其中的参数估算,以日最大风速样本的相关关系作为测风塔和长期气象站处重现期风速计算的修正依据,从而给出了全国风能资源专业观测网 396 座测风塔 70 m 高度上 50 年一遇 10 min 平均最大风速。本文直接引用了《全国风能资源详查和评价报告》对 193 座测风塔 70 m 高度层的 50 年一遇 10 min 平均最大风速计算结果。

## 2.2 两种方法的计算结果差异分析

采用 IEC 61400-1 推荐的方法,通过式(5)计算 193 座塔 70 m 高度上的 50 年一遇 10 min 平均最大风速,以  $V_{50,1}$  表示,《全国风能资源详查和评价报告》给出的这一参数,以  $V_{50,2}$  表示,计算相对偏差(RD),表达式为:

$$RD = \frac{V_{50,1} - V_{50,2}}{V_{50,2}} \times 100\% \quad (12)$$

表 3 显示了两种方法计算结果的相对偏差特征。可以发现:两种方法计算结果十分相近的有 7 座测风塔,相对偏差在  $\pm 1\%$  范围内(占总塔座数的 4%),两种方法计算结果比较接近的有 42 座塔,相对偏差在  $\pm 5\%$  范围内(占总塔座数的 21%);总体来看,采用 IEC 推荐的式(5)估算的极值风速比采用极值 I 型估算法得到的结果偏小的测风塔占了多数,193 座测风塔中,IEC 计算值偏小 10% 以上的有 121 座塔,偏小达到 30% 以上的,有 44 座测风塔,有 4 座测风塔偏小 50% 以上,其中位于浙江温州的一座测风塔,若按照 IEC 估算法计算的 50 年一遇 10 min 平均最大风速为  $22.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而采用极值 I 型函数估算结果为  $54.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,偏小了  $32.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;IEC 估算值为正偏差的比例较小,193 座塔中,正偏差达 10% 以上的只有 9 座测风塔,最大正偏差为 26%,出现在新疆达坂城,IEC 估算法计算的 50 年一遇 10 min 平均最大风速为  $51.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,极值 I 型函数估算结果为  $40.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,偏大了  $10.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 两种方法对极值风速计算结果的比较

Table 3 The relative errors of extreme wind speeds of 193 towers calculated by the two methods

相对偏差	测风塔座数	占测风塔总数百分比/%
-1%~+1%	7	4
-5%~+5%	35	18
< -10%	121	63
< -30%	44	23
< -50%	4	2
> +10%	9	5

图 2 给出了以两种方法计算的 193 座测风塔处极值风速的偏差分布图,可以看出,负偏差超过 -30% 以上的测风塔(图中红色圆点,占比 23%),集中分布在我国长江口以南的东南沿海地区,这一地区的极值风速多由热带气旋天气所致,过低地估算极值风速,将给风电场带来极大的安全隐患;两者偏差较小的测风塔主要分布在西北和华北地区的开阔平缓地形区域,但同时正偏差达 10% 以上的测风塔也分布在这一地区,因此,这些地区同时存在着安全和效益的矛盾。

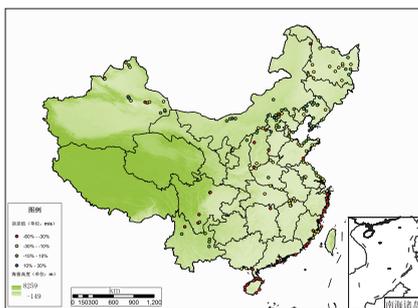
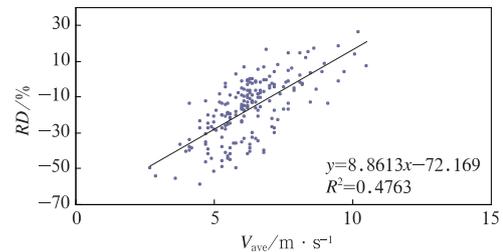


图 2 两种方法计算的 193 个测风塔处极值风速的偏差分布

Fig. 2 Geographic distribution of the relative errors of extreme wind speeds of 193 towers calculated by the two methods

由式(5)可见,极值风速主要依赖年平均风速,那么,相对偏差( $RD$ )与年平均风速( $V_{ave}$ )也会存在相关性,从图 3 给出的  $RD$  与  $V_{ave}$  相关散点图来看,随着  $V_{ave}$  的增大, $RD$  由显著的负偏差逐步演变为正偏差,但  $RD$  由负到正的演变伴随  $V_{ave}$  的变化幅度可从  $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这一现象说明了我国不同地区的极值风速的复杂性,以 IEC 推荐的年平均风速的 5 倍参数进行估算,可导致我国很多地区、特别是我国东南沿海地区风电场存在极大的安全隐患,同时,部分地区因过高估算极值风速,从而导致不必要的

投资浪费和发电效益的降低。

图 3  $RD$  与  $V_{ave}$  的相关散点图Fig. 3 Scatter-plot of  $RD$  and  $V_{ave}$ 

### 3 湍流强度特征值分析

#### 3.1 湍流强度特征值评估方法

湍流强度(turbulence intensity, 简称为  $I$ ),表示瞬时风速偏离平均风速的程度,是评价气流稳定程度的指标(盛裴轩等,2003),以下式表达:

$$I = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (13)$$

式中, $\sigma$  为风速标准差,指阵风(一般为  $1 \sim 3 \text{ s}$  时距)风速相对平均(一般为  $10 \text{ min}$  时距)风速的标准偏差, $\bar{V}$  为  $10 \text{ min}$  平均风速。

湍流强度直接影响到风电机组的疲劳载荷,是导致 WTGS 故障甚至损毁的关键因素之一。实测和仿真试验均证实了相同风速下风电机组的疲劳等效载荷随着湍流强度的增加而增大(付德义等,2015),风电机组的气动性能和最大功率系数均显著降低(祝魁等,2012)。为此,IEC 61400-1 规定了针对 WTGS 抗御湍流影响的安全等级分级,分为 4 类(表 4),我国相关规范(中华人民共和国质量监督检验检疫总局 & 中国国家标准化管理委员会,GB/T18451.1-2012)也直接引用了这一特征参数。

表 4 各等级 WTGS 基本参数

WTGS 等级	A	B	C	S
$I_{ref}$	0.16	0.14	0.12	由 WTGS 制造商规定各参数

表 4 中, $I_{ref}$  为不同 WTGS 等级湍流强度参考值,是 WTGS 轮毂高度处风速  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的湍流强度特征参考值。规范规定,WTGS 轮毂高度处  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速时的实际湍流强度应  $I_{15} \leq I_{ref}$ 。

目前,我国相当一部分风能资源评估报告简单

地将轮毂高度处风速  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的平均湍流强度  $I_{15}$  误认为就是 WTGS 分级的标准(王承凯,2009),对  $I_{15}$  的计算表达式为:

$$I_{15} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_{15,j} \quad (14)$$

式中,  $I_{15,j}$  为  $14.6 \sim 15.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速范围内第  $j$  个风速样本的湍流强度值,  $n$  为风速样本数。

按照 IEC 61400-1 等规范的解释,确定 WTGS 等级选取的湍流强度指标,应以  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速段的所有风速样本湍流强度  $I_{15,j}$  的 90% 分位数处的值为指标,具体做法是:将  $I_{15,j}$  按照数值大小排序,取该序列从小到大的 90% 分位数处的值做为 WTGS 等级选取的湍流强度指标,在此记为  $I_{15,90\%}$ 。按照 IEC 规范要求的正确的做法是,以  $I_{15,90\%}$  与表 4 中的  $I_{\text{ref}}$  对应正常湍流模型 (NTM) 中的值比较,最终确定 WTGS 等级的选取。

IEC61400-1 还进一步给出了用于对确定等级 WTGS 的湍流安全性评估的正常湍流模型,表达式为:

$$TI = \frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}}} \quad (15)$$

式中,  $V_{\text{hub}}$  为风电机组轮毂高度处的发电风速特征风速,通常选取  $\geq$  风机额定风速的 0.2 倍的风速样本;  $TI$ 、 $\sigma_1$  分别为风机发电风速段各特征风速的湍流强度值和标准差, IEC 还给出了  $\sigma_1$  的经验公式:

$$\sigma_1 = I_{\text{ref}}(0.75V_{\text{hub}} + b) \quad (16)$$

并推荐式(16)中,  $b = 5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将式(16)带入式(15)中,可以得到正常湍流模型的表达式:

$$TI = \frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}}} = 0.75I_{\text{ref}} + \frac{5.6I_{\text{ref}}}{V_{\text{hub}}} \quad (17)$$

将表 4 中各 WTGS 等级的  $I_{\text{ref}}$  带入式(17),可得到 IEC 61400-1 定义的正常湍流模型 (NTM) 的 A、B、C 三种等级湍流强度随风速变化的参考曲线(图 4)。

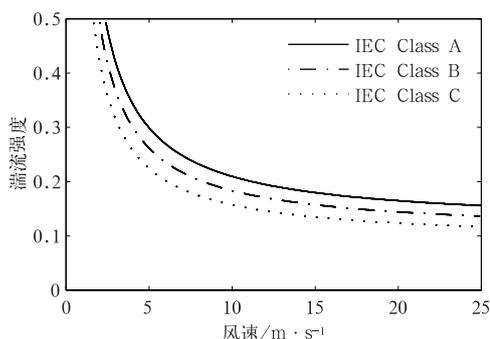


图 4 正常湍流模型 (NTM) 的湍流强度  
Fig. 4 Turbulence intensity for the normal turbulence model (NTM)

实际上,以风电场建设前期的测风塔数据计算的湍流强度只为环境湍流强度,尚未考虑风电机组尾流相互影响产生的扰动而导致的湍流强度变化,与风电机组所承受的实际湍流强度还是有所差异的,在此采用 193 座测风塔的湍流强度参数分析结果,仍属于环境湍流强度。

### 3.2 湍流强度特征参数分析

以式(14)计算出 193 座测风塔的  $I_{15}$ ,参考表 4 的  $I_{\text{ref}}$  等级标准,判别 193 座测风塔中有 6% 的测风塔 (11 座塔) 为 A 类,13% 的测风塔 (25 座塔) 为 B 类,77% 的测风塔 (149 座塔) 为 C 类,还有 4% (8 座) 的测风塔  $TI_{15}$  值大于 0.16,属于 S 类,见表 5。

按照规范规定的以  $I_{15,90\%}$  作为 WTGS 等级确定的指标,参考表 4 的  $I_{\text{ref}}$  等级分类标准,判别 193 座测风塔中有 10% 的测风塔 (19 座塔) 为 A 类,25% 的测风塔 (48 座塔) 为 B 类,51% 的测风塔 (99 座塔) 为 C 类,有 15% (29 座) 的测风塔  $I_{15}$  值大于 0.16,属于 S 类(表 5)。

以  $I_{15,90\%}$  与  $I_{15}$  的 WTGS 等级选择结果比较,达到 A、B、S 类等高端流型的测风塔明显增多了,特别是达到 S 类的测风塔,由 8 座增加到 29 座;达到 C 类的低湍流型测风塔数量由 149 座减少为 99 座。

表 5 193 塔两种湍流强度特征值选型结果统计

Table 5 Basic statistics of wind turbine classes by two turbulence characteristics

WTGS 等级/范围	A / 0.14 ~ 0.16	B / 0.12 ~ 0.14	C / <0.12	S / >0.16
测风塔座数( $I_{15}$ )/百分比	11/6%	25/13%	149/77%	8/4%
测风塔座数( $I_{15,90\%}$ )/百分比	19/10%	48/25%	99/51%	29/15%

利用 IEC 61400-1 正常湍流模型 (NTM),对以  $I_{15,90\%}$  与  $I_{50}$  为指标确定的 WTGS 等级结果进行湍

流强度安全性评估。选取目前主流大型风机发电的特征风速段  $5 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,计算 193 座塔 70 m 高

度层  $5\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间的逐个  $10\text{ min}$  风速样本的湍流强度,以  $TI_i$  表示。统计结果显示,若以  $I_{15}$  的为指标确定的 WTGS 等级,193 座测风塔中,有 46 座塔在  $5\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  特征风速区间的湍流强度  $TI_i$  超越了选定等级 WTGS 参考曲线的样本比例达到 10% 以上,从而,可能存在较大的安全风险;而以  $I_{15.90\%}$  指标来确定的 WTGS 等级,仅有 15 座测风塔不满足选定等级 WTGS 参考曲线的规范要求,需要进行进一步分析。由此可见,以  $I_{15.90\%}$  为指标确定的 WTGS 等级,可以更好地满足正常湍流模

型对 WTGS 安全性评估的要求。

图 5 进一步给出了以  $I_{15}$  确定的 WTGS 湍流强度等级分别为 A、B、C 类(分别标记为 1#、2#、3#、4#、5#、6# 塔),但不满足正常湍流模型(NTM)的 6 座测风塔计算实例(见表 6)。

表 6 给出了 6 座典型测风塔以  $I_{15}$  与  $I_{15.90\%}$  的 WTGS 等级选择结果。可以看出,以  $I_{15}$  确定的 WTGS 湍流强度等级要比以  $I_{15.90\%}$  确定的 WTGS 湍流强度等级低 1~2 个等级,说明以  $I_{15}$  确定的 WTGS 湍流强度等级偏低,存在较大的安全风险。

表 6 6 座测风塔风速样本计算结果统计

Table 6 Statistics results of the 6 towers

塔号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
样本数( $14.6\sim 15.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	223	331	58	439	34	1023
$I_{15}$	0.144 (A)	0.139 (B)	0.089 (C)	0.150 (A)	0.139 (B)	0.094 (C)
$I_{15.90\%}$	0.195 (S)	0.201 (S)	0.140 (B)	0.201 (S)	0.166 (A)	0.147 (B)

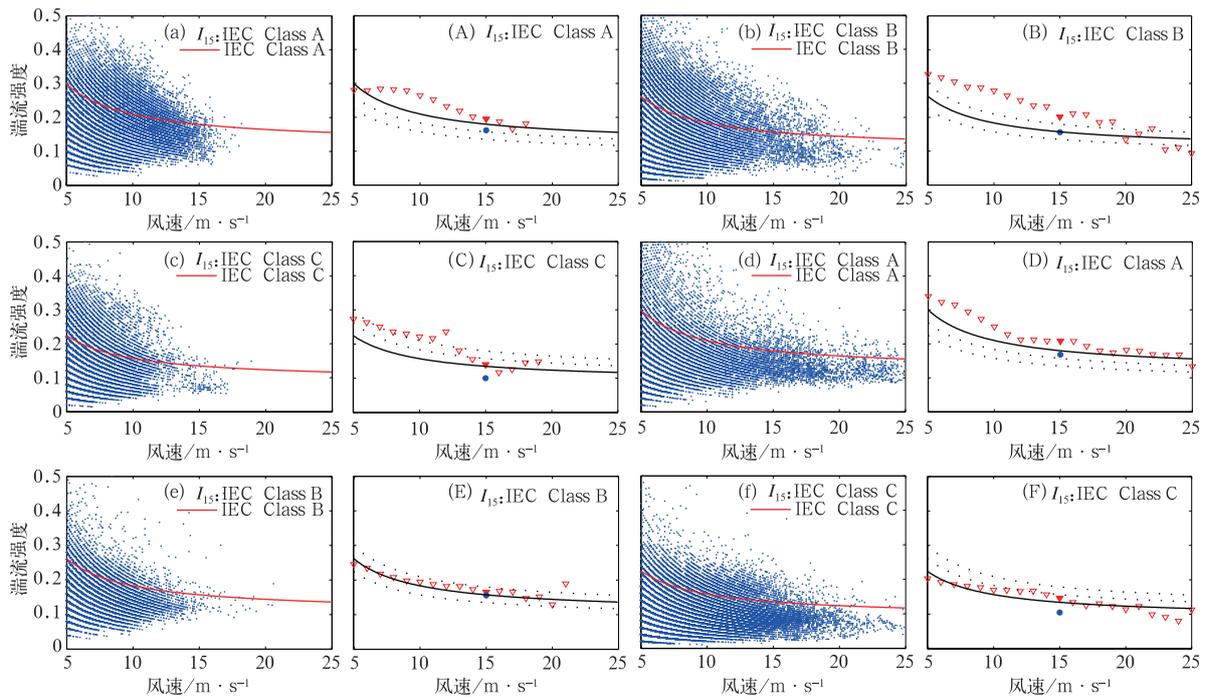


图 5 湍流强度随风速变化的分布图

(a,A)1#, (b,B)2#, (c,C)3#, (d,D)4#, (e,E)5#, (f,F)6#

Fig. 5 Distribution of turbulence intensity with wind speed variance

(a,A)1#, (b,B)2#, (c,C)3#, (d,D)4#, (e,E)5#, (f,F)6#

图 5 显示了 6 座测风塔湍流强度特征参数在  $5\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围的变化特征。图 5a,5b,5c,5d,5e 和 5f 是以风速在  $5\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围内的逐个  $10\text{ min}$  样本的湍流强度值随风速的变化,图中曲线是以  $I_{15}$  为指标确定的 WTGS 等级参考曲线;图 5A,

5B,5C,5D,5E 和 5F 中,三角符号是以  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  间隔的每个风速区间的所有风速样本的湍流强度在 90% 分位数对应的湍流强度值(以  $I_{90\%}$  表示,  $I_{90\%}$  在  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间对应值即为  $I_{15.90\%}$ ),实心圆圈符号以  $I_{15}$  代入式(17)的计算结果,以  $TI_{15}$  表示,图

中实线为以  $I_{15}$  确定的 WTGS 湍流强度等级曲线。

从图 5A~5F 可以看出,在  $5\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,6 座塔的  $I_{90\%}$  值,几乎均超出  $I_{15}$  选定的 WTGS 等级参考曲线,不同风速区间  $I_{90\%}$  值相对  $I_{15,90\%}$  选定的 WTGS 等级参考曲线的位置也不尽相同。如图 5E 中,以  $I_{15,90\%}$  选定的 WTGS 等级为 A 类,在  $8\sim 17$ 、 $19$ 、 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的  $I_{90\%}$  值均在 A 类参考曲线以内,但在  $5\sim 7$ 、 $18$ 、 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的  $I_{90\%}$  值均在 B 类参考曲线以内,然而  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的风速样本明显较少,计算得到的  $I_{90\%}$  值可能不具有较好的代表性,在实际 WTGS 选型时,应根据实际需要,综合考虑上述特征。

从以上的分析结果可以看出,目前我国风电场风能资源评估普遍采用的 WTGS 轮毂高度  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间所有风速样本的湍流强度算术平均值  $I_{15}$  来确定的 WTGS 湍流强度等级,存在很大的不确定性,极有可能导致 WTGS 选型的误判,使风电机组偏于不安全,应按照 IEC 61400-1 的要求,以  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速段的所有风速样本湍流强度的 90% 分位数  $I_{15,90\%}$  为指标,来确定 WTGS 等级的选取,再进一步根据 IEC 61400-1 正常湍流模型 (NTM),对确定的 WTGS 等级结果进行湍流强度安全性评估。

## 4 结论和讨论

利用全国风能资源专业观测网的 193 座测风塔观测数据,对 IEC 推荐的极端风速计算方法与我国规范推荐的基于极值 I 型概率分布方法进行比较,并以目前行业领域普遍采用的以  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速的平均湍流强度作为风电机组选型指标的不确定性进行分析,初步得出以下结论:

(1)按照 IEC 推荐的极端风速计算方法与基于极值 I 型概率分布方法计算得到全国 193 塔 50 年一遇 10 min 平均最大风速,发现两种方法计算结果十分相近的仅有 7 座测风塔,相对偏差在  $\pm 1\%$  范围内,比较接近的有 42 座塔,相对偏差在  $\pm 5\%$  范围内;总体来看,IEC 推荐方法的计算结果多数偏小,其中偏小 10% 以上的测风塔有 121 座,偏小 30% 以上的有 44 座测风塔,而偏大 10% 以上的只有 9 座测风塔,负偏差最大值为  $-59\%$ ,位于浙江温州,IEC 推荐方法计算结果为  $22.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,极值 I 型方法计算结果为  $54.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,前者偏小了  $32.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;正偏差达 10% 以上的只有 9 座测风塔,最大

正偏差为 26%,出现在新疆达坂城,IEC 推荐方法计算结果为  $51.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,极值 I 型方法估算结果为  $40.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,前者偏大了  $10.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2)负偏差超过  $-30\%$  以上的测风塔,集中分布在我国长江口以南的东南沿海地区,这一地区的极值风速多由热带气旋天气所致,过低地估算极值风速,将给风电场带来极大的安全隐患;两者偏差较小的测风塔主要分布在西北和华北地区的开阔平缓地形区域,但同时正偏差达 10% 以上的测风塔也分布在这一地区,因此,这些地区同时存在着安全和效益的矛盾。

(3)随着年平均风速的增大,相对偏差由显著的负偏差逐步演变为正偏差,但相对偏差由负到正的演变伴随年平均风速的变化幅度可从  $6\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这一现象说明了我国不同地区的极值风速的复杂性,以 IEC 推荐的年平均风速的 5 倍参数进行估算,可导致我国很多地区、特别是我国东南沿海地区风电场存在极大的安全隐患,同时,部分地区因过高估算极值风速,从而导致不必要的投资浪费和发电效益的降低。

(4)与严格按照规范,以  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速段所有样本湍流强度的 90% 分位数处的值作为指标进行风电机组等级确定相比较,以目前行业领域普遍采用的以 WTGS 轮毂高度  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速区间所有风速样本的湍流强度算术平均值作为指标来确定的 WTGS 湍流强度等级,发现 193 座塔中有 46 座塔的选型是不安全的,甚至相差 2 个等级。

本文所采用的全国风能资源专业观测网中的 193 座测风塔数据计算的湍流强度只为环境湍流强度,尚未考虑风电机组尾流相互影响产生的扰动而导致的湍流强度变化,在下一步的工作中,将考虑采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型对风电场风机尾流进行模拟分析,以考虑了风机尾流和环境湍流强度的实际湍流强度数据,对本文研究结论进行验证和补充。

## 参考文献

- 北京鉴衡认证中心,神华国华能源投资有限公司,中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院,等. 2012. 风力发电机组设计要求 (GB/T 18451.1—2012). 北京:中国标准出版社.
- 湛玲,许武,刘光远. 2014. 西沙风能资源评估与五十年一遇最大风速分析. 电力建设, 35(7): 131-135.
- 段忠东,周道成. 2004. 极值概率分布参数估计方法的比较研究. 哈尔滨工业大学学报, 36(12): 1605-1609.

- 付德义,薛扬,焦渤,等. 2015. 湍流强度对风电机组疲劳等效载荷的影响. 华北电力大学学报, 42(1):45-50.
- 郭渠,廖代强,孙佳,等. 2015. 重庆主城区暴雨强度公式推算和应用探讨. 气象, 41(3):336-345.
- 国家发展和改革委员会. 2004. 全国风能资源评价技术规定. 北京:气象出版社, 14.
- 国家发展和改革委员会能源研究所. 2014. 中国风电发展路线图 2050, 80.
- 黄浩辉,宋丽莉,植石群,等. 2007. 广东省风速极值 I 型分布参数估计方法的比较. 气象, 33(3):101-106.
- 李兰,周月华,叶丽梅,等. 2013. 基于 GIS 淹没模型的流域暴雨洪涝风险区划方法. 气象, 39(1):112-117.
- 孟庆珍,杜健. 2001. 成都地面风速年极值的 4 种分布函数拟合结果的比较. 成都信息工程学院学报, 16(2):97-104.
- 任芝花,张志富,孙超,等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制. 气象, 41(10):1268-1277.
- 盛裴轩,毛节秦,李建国,等. 2003. 大气物理学. 北京:北京大学出版社, 522.
- 宋丽莉,朱蓉,郭亚田,等. 2014. 全国风能资源详查和评价报告. 北京:气象出版社, 300.
- 王承凯. 2009. 风场湍流强度的计算及其对风电机组选型的影响. 中国电机工程学会:2008 年中国电机工程学会年会论文集, 2009: PN4-02.
- 杨梦兮,班欣. 2014. 江苏北部沿海风电场气象灾害风险评估. 气象科技, 42(3):524-529.
- 中国机械工业联合会. 2001. 风力发电机组设计要求. JB/T 10300—2001.
- 中国气象局. 2007. 风电场气象观测及资料审核、订正技术规范. QX/T74—2007.
- 中国水利水电建设工程咨询公司. 2002. 风电场风能资源评估方法 (GB/T18710—2002).
- 中华人民共和国建设部. 2007. 高耸结构设计规范 (GB50135—2006). 北京:中国计划出版社, 159.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2012. 建筑结构荷载规范 (GB 50009—2012). 北京:中国建筑工业出版社.
- 祝魁,李国文,王虎彬,等. 2012. 湍流强度对 S 型风力机气动性能影响的研究. 沈阳航空航天大学学报, 29(4):25-28.
- Architectural Institute of Japan. 2004. Recommendations for Loads on Buildings, AIJ-RLB-2004, Tokyo.
- ASCE. 2006. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Reston, VA, ASCE/SEI 7-05, New York.
- Buildings Department of Hong Kong. 2004. Code of Practice for Wind Effects in Hong Kong, Buildings Department of Hong Kong.
- Ge Y J, Jin X Y, Cao S Y. 2010. Comparison of APEC wind loading codification and revision of Chinese National Code. Proceedings of 6th workshop on regional harmonization of wind loading and wind environmental specifications in Asia-Pacific economies, Korea.
- Huang Linhong, Song Lili, Li Gang, et al. 2015. Variation characteristics of regional synchronous wind in Hami, Xinjiang of Northwest China. J Meteor Res, 29(2): 344-357. DOI: 10. 1007/s13351-015-0193-z.
- IEC. 2005. IEC61400-1 third edition 2005-08 Wind Turbine-Part 1: Design requirement, International Electrotechnical Commission.