

## 前 言

本部分等同采用 IEC 61400-12:1998《风力发电机组 第 12 部分:功率特性试验》。

本部分的编写格式和规则符合 GB/T 1.1—2000,保留了 IEC 61400-12:1998 的前言和引言,同时增加了本标准的“前言”。

本部分的附录 A、附录 C 是规范性附录,附录 B、附录 D 是资料性附录。

本部分由中国机械工业联合会提出。

本部分由全国风力机械标准化技术委员会归口。

本部分负责起草单位:全国风力机械标准化技术委员会秘书处、华北电力科学研究院。

本部分主要起草人:王建平、李秀荣、张世惠。

## IEC 前 言

1. IEC(国际电工委员会)是由各国电工委员会(IEC 国家委员会)组成的世界标准化委员会组织。IEC的宗旨是促进电气和电子领域有关标准化问题的国际间合作。为了这个宗旨开展其活动。IEC 发布国际标准。标准的制定工作委托给技术委员会;任何 IEC 国家委员会对涉及的项目感兴趣的话,都可以参加该项目的制定工作。与 IEC 建立了联络关系的国际的、政府的和非政府的组织均可参加制定工作。IEC 与国际标准化组织(ISO)根据两个组织间确立的协议条件,密切合作。
2. IEC 技术问题的正式决议和协议,尽可能地表达国际间对有关项目一致的观点,因为每个技术委员会都是由对该问题感兴趣的国家委员会代表组成的。
3. 制定的文件推荐给国际上使用,并以正式标准形式、技术报告形式或技术指导文件形式发布。这些文件,在某种意义上讲,要由各国家委员会认可。
4. 为了促进国际间的统一,各 IEC 国家委员会应明确,在其国家和地区性标准中应最大限度地采用 IEC 国际标准。IEC 国际标准与相应的国家或地区性标准之间的差异,都应在后者给以明确指出。
5. IEC 不提供其标准制定及批准过程说明,也不对任何设备宣称的与某一标准相一致的说明承担责任。
6. 应注意本国际标准的某些部分属于专利项目的可能性。IEC 不负鉴别这些专利项目的责任。国际标准 IEC 61400-12 是由 IEC 第 88 技术委员会,风力发电机组工作组制定的。

该标准版本基于下列文件

FDIS	投票报告
88/85/FDIS	88/89/RVD

在上表指出的投票报告中可找到本标准通过认可的全部信息。

本标准的另外语言版可能在以后发行。

附录 A 和附录 C 是规范性附录。

附录 B,附录 D 和附录 E 是资料性附录。

## 引 言

IEC 61400-12 的目的是提供一种统一的方法以保证对风力发电机组功率特性的测量和分析的可靠性和准确性。本部分将适用于:

- 满足生产厂家确定风力发电机组的功率特性要求;
- 满足购买者确定风力发电机组的功率特性要求;
- 风力发电机组操作者,他们要求验证制造商的声明;
- 风力发电机组的设计者或调整者,他们必须准确地和公正地确定风力发电机组的功率输出特性,该特性应符合其规范或特定要求。

本部分在风力发电机组的功率特性的测量、分析和报告方面提供指导。本部分将使从事风力发电机组的制造、安装、计划、运行和管理的组织收益。本部分所推荐的准确的测量和分析技术应适用于所有方面,以保证风力发电机组的使用和发展有益于环境。希望本部分所提供的测量和报告的步骤可提供准确的结果而且其他人也能同样获得这一结果。

然而,读者应注意场地标定方法是相当新的。现在尚无充分的证据证明它能对所有场地特别是复杂地形的场地提供准确的结果。本方法的一部分是基于应用对测量的误差计算。在复杂地形条件下,声明结果是准确的是不够的,因为误差的标准偏差会是10%~15%。将来针对这些问题要开发一个新的测量标准。

## 风力发电机组 功率特性试验

### 1 范围

本部分规定了测试单台风力发电机组功率特性的方法,并适用于并网发电的所有类型和规格的风力发电机组的试验。

本部分适用于确定一台风力发电机组的绝对功率特性,也适用于确定不同结构的各种风力发电机组功率特性之间的差异。

风力发电机组的功率特性由测定的功率曲线确定,并用来估计年发电量(AEP)。测得的功率曲线由采集的瞬时风速和功率输出值确定,此项试验应在试验场有足够长的测量时间,并建立在有效的统计数据库的基础上,该数据库应覆盖一定的风速范围和各种风况条件。年发电量利用测得的功率曲线对应于参考风速频率分布计算获得,假设可利用率为100%。

本部分描述了一个测量方法,这种方法要求测量的功率曲线和导出的年发电量应由补充误差及其综合影响修正。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 18451 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注明日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注明日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 1207 电压互感器(eqv IEC 60186:1987)

GB/T 1208 电流互感器(eqv IEC 60185:1987)

GB/T 13850 交流电量变换为模拟量或数字信号的电测量变送器(idt IEC 60688:1992)

ISO 2533:1975 标准大气压

### 3 定义

下列定义适用于本部分。

#### 3.1

**精度 accuracy**

被测量物的测量值与真实值的接近程度。

#### 3.2

**年发电量 annual energy production**

利用功率曲线和轮毂高不同风速频率分布估算得到的一台风力发电机组一年时间内生产的全部电能。计算中假设可利用率为100%。

#### 3.3

**可利用率 availability**

在某一期间内,除去风力发电机组因维修或故障未工作的时数后余下的时数与这一期间内总时数的比值,用百分比表示。

#### 3.4

**复杂地形 complex terrain**

试验场地周围属地形显著变化的地带或有能引起气流畸变的障碍物的地带。

3.5

**数据组 data set**

在规定的连续时段内采集的数据集合。

3.6

**距离常数 distance constant**

风速仪的时间响应指标,当风速仪指示值为其气流总值 63% 时,通过风速仪的空气路径长度。

3.7

**外推功率曲线 extrapolated power curve**

用估计方法对测出的功率曲线从测量的最大风速延伸到切出风速。

3.8

**气流畸变 flow distortion**

由障碍物、地形变化或其他风力机引起的气流改变,其结果是相对自由来流产生了偏离,造成一定程度的风速测量误差。

3.9

**自由流风速 free stream wind speed**

通常指轮毂高度处,未被扰动的自然空气流动速度。

3.10

**轮毂高度(风轮) hub height (wind turbines)**

从地面到风轮扫掠面中心的高度。

3.11

**测量功率曲线 measured power curve**

用图形和表格表示的按正确方法测试、修正和标准化处理的风力发电机组净电功率输出。是测量风速的函数关系。

3.12

**测量周期 measurement period**

收集功率特性试验中具有统计意义的基本数据的时段。

3.13

**测量扇区 measurement sector**

测取测量功率曲线所需数据的风向扇区。

3.14

**比恩法 method of bins**

将实验数据按风速间隔(bins)分组的数据处理方法。

注:在 bin 内,数据组数或采样数与它们的和都被记录下来,并计算出每 bin 内平均参数值。

3.15

**净电功率输出 net electric power output**

风力发电机组输送给电网的电功率值。

3.16

**障碍物 obstacles**

邻近风力发电机组能引起气流畸变的固定物体,如建筑物、树林、风力发电机组。

3.17

**桨距角 pitch angle**

在指定的叶片径向位置(通常为 100% 叶片半径处)叶片弦线与风轮旋转面之间的夹角。

## 3.18

**功率系数** **power coefficient**

净电功率输出与风轮扫掠面上自由来流应有的功率之比。

## 3.19

**功率特性** **power performance**

风力发电机组发电能力的表述。

## 3.20

**额定功率** **rated power**

正常工作条件下,风力发电机组设计要达到的最大连续输出功率。

## 3.21

**标准误差** **standard uncertainty**

用标准方差表示的测量结果误差。

## 3.22

**扫掠面积** **swept area**

垂直于风矢量平面上的,风轮旋转时叶尖运动所生成圆的投影面积。

## 3.23

**试验场地** **test site**

风力发电机组试验地点及周围环境。

## 3.24

**测量误差** **uncertainty in measurement**

关系到测量结果的,表征由测量造成的量值合理离散的参数。

## 4 符号和单位

$A$	风力发电机组的风轮扫掠面积	$[m^2]$
$AEP$	年发电量	$[kWh]$
$B_{10\ min}$	测得的大气压的 10 min 平均值	$[Pa]$
$c$	一个参数的(偏微分)敏感性系数	
$C_{p,i}$	在 bin $i$ 中的功率系数	
$D$	风轮直径	$[m]$
$D_e$	等效风轮直径	$[m]$
$D_n$	附近的正在运行的风力发电机组的风轮直径	$[m]$
$f_i$	在一个风速间隔段内风速的相对发生频率	
$F(V)$	风速的瑞利分布函数	
$H_b$	障碍物高度	$[m]$
$I_w$	障碍物宽度	$[m]$
$L$	风力发电机组与测风杆之间的距离	$[m]$
$L_e$	风力发电机组或测风杆与障碍物之间的距离	$[m]$
$L_n$	风力发电机组或测风杆与附近的正在运行的风力发电机组之间的 距离	$[m]$
$M$	每个 bin 中误差分量的数量	
$M_A$	A 类误差分量的数量	
$M_B$	B 类误差分量的数量	
$N$	bins 的数目	

$N_h$	一年的小时数,约等于 8 760	[h]
$N_i$	在 bin $i$ 中 10 min 数据组的数量	
$N_k$	在一个 10 min 期间预处理数据组的数量	
$N_i$	预处理数据组的取样数据的数量	
$P_i$	在 bin $i$ 中正常的平均功率输出	[kW]
$P_n$	正常的功率输出	[kW]
$P_{n,i,j}$	在 bin $i$ 中 $j$ 数据组正常的功率输出	[kW]
$P_{10\text{ min}}$	测得的 10 min 平均功率输出	[kW]
$R$	气体常数	[J/(kg·K)]
$S$	A 类误差分量组成	
$T_{10\text{ min}}$	测得的 10 min 平均大气绝对温度	[K]
$U$	B 类误差分量组成	
$U_{AEP}$	估计的年发电量综合标准误差	[kWh]
$U_{c,i}$	在 bin $i$ 中功率的综合标准误差	[kW]
$V$	风速	[m/s]
$V_{ave}$	轮毂高度处年平均风速	[m/s]
$V_i$	在 bin $i$ 中正常的平均风速	[m/s]
$V_n$	正常风速	[m/s]
$V_{n,i,j}$	在 bin $i$ 中 $j$ 数据组的正常风速	[m/s]
$V_{10\text{ min}}$	测得的 10 min 平均风速	[m/s]
$X_k$	预处理时间段的平均参数值	
$X_{10\text{ min}}$	10 min 的平均参数值	
$\rho$	相关系数	
$\rho_0$	参考大气密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{10\text{ min}}$	导出的 10 min 平均大气密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_k$	预处理参数的标准方差	
$\sigma_{P,i}$	在 bin $i$ 中正常的功率数据的标准方差	[kW]
$\sigma_{10\text{ min}}$	10 min 的平均参数值的标准方差	

## 5 缩写

WTGS 风力发电机组

## 6 测试条件

关于风力发电机组的功率输出测试的特定试验条件应该在测试报告中中和有关的文件中加以很好的说明,参见第 10 章的有关内容。

### 6.1 风力发电机组

按第 10 章中所描述,对将要测试的风力发电机组应该在文件中对其机组结构进行准确的说明。

### 6.2 试验场地

在试验场地上风力发电机组的附近要安装气象测风杆,以确定吹向试验的风力发电机组的风速值。试验场地可能会对所测风力发电机组输出功率的影响,特别是由于气流畸变可能造成的测风杆上的风速与风力发电机组上的风速值不同。

在进行测试之前,需要对试验场地的气流畸变情况进行评估,以便:

- 选择气象测风杆的安装位置；
- 确定合适的风速测量扇区；
- 估算出合理的气流畸变修正系数；
- 评估由于气流畸变造成的误差。

以下因素必须加以特别考虑：

- 地形变化；
- 其他风力发电机组；
- 障碍物(建筑物, 树林, 等等)。

有关试验场地的情况应该按照第 10 章的要求提供可靠的报告。

### 6.2.1 气象测风杆的距离

在安装气象测风杆时, 需要特别注意其安装位置, 尽量不要太靠近风力发电机组, 因为在风力发电机组前方的风速值将会降低。相反也不要离风力发电机组太远, 因为这样会造成所测量的风速值与风力发电机组的功率输出相关性减小。测风杆所处位置与风力发电机组的距离应该为风力发电机组风轮直径  $D$  的 2 倍~4 倍。一般建议采用风轮直径  $D$  的 2.5 倍为宜。测风杆必须设置在所选择的测量扇区内。对于垂直轴风力发电机组其  $D$  值应该选择风轮最大的水平直径的 1.5 倍。

图 1 给出了气象测风杆与风力发电机组之间的间隔距离要求, 并推荐了气象测风杆与风力发电机组之间的距离, 为 2.5 倍风轮直径。

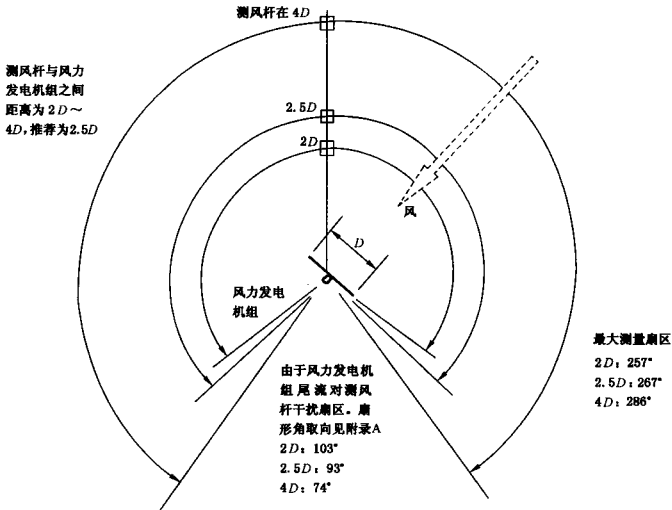


图 1 气象测风杆的距离和最大允许测量扇形区域

### 6.2.2 测量扇区

测量扇区方向上应排除主要障碍、地貌变化或其他风力发电机组, 既要离开试验状态风力发电机组, 又要离开气象测风杆。

由于在试验风力发电机组尾流内的气象测风杆距离是 2 倍、2.5 倍和 4 倍风轮直径, 排除在干扰扇区之外, 如图 1 所示。试验风力发电机组和气象测风杆之间, 以及所有相邻风力发电机组和障碍物之间所有距离, 用附录 A 的方法决定排除这方面尾流的影响。

### 6.2.3 由于气流畸变试验场地引起的修正系数和误差

如果试验场地满足附录 A 规定的要求,那么不需对场地做进一步分析,也没有必要有气流畸变修正系数。如果气象测风杆安装位置距离风力发电机组 2 倍~3 倍风轮直径时,应取 $\geq 2\%$ 测量风速,当其距离为 3 倍~4 倍风轮直径时应取 $\geq 3\%$ 测量风速,作为由于场地气象畸变引起的适用标准误差。

如果试验场地不满足附录 A 规定的要求,或要求由试验场地气流畸变引起误差较小时,那么需对试验场地进行标定,或用三维流模型对试验场地进行分析,对这种有关类型的地形应审查批准后方可试验。

如果一个试验场地进行了标定,应用附录 B 推荐的方法。应用每一扇区的气流畸变修正系数。确定试验场地修正的标准误差,应不小于在整个测量扇区内求得最大修正量的 1/3,并且 $60^\circ$ 扇区内集中主导试验风向。

如果进行试验场地理论估算的修正系数,采用有效的三维流模型,那么应用的扇区应小于或等于 $30^\circ$ 。确定场地修正标准误差,应不小于在整个测量扇区内求得最大修正量的 1/2,并且在试验主风向的 $60^\circ$ 扇区内。

尽管在一个风电场内,为确定单个风力发电机组的性能特性,可采用(附录 B)场地标定方法,但必须重视复杂地形与其估算结果的一致性。

## 7 测试准备

### 7.1 电功率

测量风力发电机组的净电功率应采用功率测量装置(比如,功率变送器)建立在测量每相的电流和电压的基础上。

电流互感器精度级别应符合 GB/T 1208 的要求,如果需要电压互感器进行电压测量时,其精度应符合 GB/T 1207 的要求。建议这两种互感器的精度应为 0.5 级或更高。

如果功率测量采用功率变送器,其测量精度应符合 GB/T 13850 的要求,建议其精度选用 0.5 级或更高。如果不采用功率变送器进行功率测量,其测量精度应该等同于功率变送器 0.5 级的精度。测试装置的量程应设置为可以测量风力发电机组输出的最大的正负瞬间的峰值。这里建议选用风力发电机组额定输出功率的 $-50\% \sim 200\%$ 作为功率的满量程测量范围。在测量过程中,必须随时观察所有测量数据,以确保被测数据不超出测量仪器的工作范围。功率测量仪器应安装在与电网连接的地方,确保所测量的功率为风力发电机组向电网的净有功功率。

### 7.2 风速

风速测量应采用风杯式风速仪,并且要正确地安装在测风杆上与风力发电机组轮毂中心的高度相同,此处风速仪所测的气流应该能够代表自由吹向并驱动风力发电机组的气流速度。

风速测量应该采用具有小于 5 m 距离常数的风杯式风速仪,其标定值在整个测量周期内维持不变。风速仪的标定应该在功率测量之前和之后进行以达到可追溯。第二次风速仪标定可以在原位置与另一标定过的参考风速仪比较进行,在测试期间应与轮毂中心高度上安装的风速仪相差 1.5 m~2 m 地方所安装的参考风速仪进行对比。在标定过程中,风速仪的安装情况必须与功率测量过程中所用的风速仪安装环境相同。然后需要标明功率测量中风速仪的误差。

风速仪应该安装在与轮毂高度相差小于 $\pm 2.5\%$ 的位置,最好安装在测风杆竖直杆的顶部。如果不易安装在顶部时,也可以安装在固定于测风杆上的横杆上,此时风速仪应处在指向主风向的位置上。

在安装测风仪时,应该注意邻近其他测风仪可能产生的扰流的影响。为了减少这种影响,在竖直方向的任何横杆与测风仪的距离至少为横杆直径的 7 倍以上,而在水平方向测风仪与测风杆的距离至少应为同等高度处测风杆最大直径的 7 倍以上。测风杆必须是管状锥形或桁架型结构。附近不应安装任何可以导致干扰或影响流向测风仪气流的仪器。

为了表示风速采用了哪些修正系数,如由于地形引起的气流畸变,应有清楚的记录。还应报告和估

算修正的误差,典型的修正误差是应不小于修正与未修正值之差的一半。

### 7.3 风向

风向可以采用尾翼式风向测试仪进行测量,应安装在与轮毂中心高度相差10%的范围内。安装时必须避免与风速测量仪之间的相互干扰。风向测试仪的绝对精度应高于5°。

### 7.4 空气密度

空气密度应该通过测量气温和气压采用公式(3)计算获得。在气温非常高的情况下,建议测量空气相对湿度对计算的空气密度进行修正。

气温测量传感器应该安装在离地面10 m以上的地方。但最好安装在气象测量杆上接近被测轮毂中心高度的地方,以更好地反映轮毂中心处的温度值。

气压传感器应该安装在气象测量杆上接近被测轮毂中心高度的地方,以更好地反映轮毂中心处的气压值。如果无法安装在轮毂中心高度附近,则必须采用ISO 2533的有关规定对所测得的数据进行修正。

### 7.5 降水

为了区分在干燥和潮湿两种气候条件下测量的不同,在风力发电机组测试全过程中,必须监测大气的降水情况。此监测情况应该在测试报告中明确说明。

### 7.6 风力发电机组的运行状态

应该监测至少一项能够反映风力发电机组运行状态的参数,状态信息应被用在确定风力发电机组可利用性的过程中。

### 7.7 数据采集系统

数据采集系统应具备每个测量通道的采样速率至少为0.5 Hz,以便进行测量数据的采集与预处理。

安装的数据库系统应进行每一信号的终端到终端的标定。但原则上数据采集系统本身的误差与传感器所产生的误差相比可以忽略不计。

## 8 测试方法

### 8.1 概述

测试方法应按系列明确的标准要求采集数据,保证收集足够数量的、具有高质量的数据,以精确地确定风力发电机组的功率输出特性。测试报告的起草应该按照第10章的要求进行,报告中应该提供测试方法、测试条件等。

测试数据的误差情况应该按照附录C中的说明加以叙述。在测试的全过程中,必须定期对测试的数据进行检查,以保证所测数据的质量及测试结果的可重复性。与此同时,还应该持续进行测试记录,以记录功率输出特性测试过程中所发生的重要事件。

### 8.2 风力发电机组的运行

在测试过程中,风力发电机组应该按其使用手册所述正常运行,不得对机组进行任何形式的结构更改。而风力发电机组不工作时的数据应该删除。

### 8.3 数据收集

数据的采集应该采用0.5 Hz或更快的取样速率连续进行。对于温度、气压、降水量及风力发电机组状态等参数测量可以用较低的采样速率,但至少每分钟采样一次。

数据采集系统应该能够储存采样得到的数据、或者预处理过的数据组、或者两者。预处理的数据应该包含下列内容:

- 平均值;
- 标准差;
- 最大值;

——最小值。

每组预处理的数据组的总时间应该在 30 s~10 min 之间,并且应为可以被整除的 10 min 数据值。另外,如果数据组的时间值小于 10 min,所测相邻数据组不能通过时间延迟加以区分,此时数据将持续采集直到满足 8.6 所述的要求时才可停止。

8.4 数据筛选

筛选的数据是以 10 min 为一个周期由连续测量所得到的数据而产生。如果要从预处理的数据中产生,则需要根据公式(1)、公式(2)计算出每 10 min 时间的平均值和标准差。

$$X_{10\text{ min}} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} X_k \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{10\text{ min}} = \sqrt{\frac{1}{N_k N_i - 1} \sum_{k=1}^{N_k} [N_i (X_{10\text{ min}} - X_k)^2 + \sigma_k^2 (N_i - 1)]} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$N_k$ ——10 min 预处理数据组数据量;

$X_k$ ——预处理数据时间内的平均数值;

$X_{10\text{ min}}$ ——10 min 内的平均数值;

$N_i$ ——预处理数据组内取样数据的数量;

$\sigma_k$ ——预处理数据组数据的标准差;

$\sigma_{10\text{ min}}$ ——10 min 的平均预处理数据标准方差。

在下列情况下的数据组应该从数据库中删除:

- 风力发电机组不工作;
- 测试系统发生故障;
- 风向不在测量扇区内。

在一些特殊工作情况(比如:由于灰尘、盐雾、昆虫、冰雪造成叶片表面非常粗糙)或大气候条件(比如:降水,风剪作用)下采集的数据需要作为特殊数据,而在测试报告中应该说明其数据筛选的标准。

8.5 数据修正

对于可能由气流畸变(参见 6.2)和因测风仪没有安装在接近轮毂中心高度的地方(参见 7.4)所造成的气压误差而筛选到的数据需要进行修正。这种修正适用于那些显示可以获得更高测试精度的测量数据(如:在非常高的气流畸变地区所造成的风速仪超速的情况所进行的风速仪错误修正)。

8.6 数据库

在完成数据回归后(见 9.1),选定的测试数据要根据 bin 方法进行排序(见 9.2),所选取的数据组应该覆盖从低于切入风速 1 m/s 到风力发电机组 85%额定功率输出时风速的 1.5 倍的风速范围内。换言之,风速范围应该覆盖从小于 1 m/s 切入风速到“测得的年发电量”大于或等于 95%的“外推出的年发电量”(见 9.3)时的风速值。风速范围应连续分成 0.5 m/s bin,中心值是 0.5 m/s 的整数倍。

该数据组在满足以下条件时,可以认为完整:

- 每个 bin 中至少含有 30 min 的采样数据值;
- 全部测试周期中包括风力发电机组在风速范围内正常运行至少 180 h。

所测数据组应该在测试报告中列出,见第 10 章。

9 推导结果

9.1 数据回归

从测试所筛选出的数据组需要折算回归到两种参考空气密度下的数据。一种为在试验场所测得的空气密度平均值,其变化幅值接近 0.05 kg/m<sup>3</sup>,而另一种应为海平面的空气密度值,参考 ISO 标准的空

气密度(1.225 kg/m<sup>3</sup>)。如果实测空气密度值在 1.225 kg/m<sup>3</sup>±0.05 kg/m<sup>3</sup> 范围内,则没有必要进行空气密度折算。空气密度可以根据所测得的大气温度和压力通过公式(3)计算得出:

$$\rho_{10 \min} = \frac{B_{10 \min}}{R \cdot T_{10 \min}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$\rho_{10 \min}$ ——得到的 10 min 的平均空气密度;

$T_{10 \min}$ ——测得的 10 min 的平均绝对气温;

$B_{10 \min}$ ——测得的 10 min 的平均气压;

$R$ ——气体常数 287.05 J/(kg·K)。

对于采用失速控制的、具有恒定桨矩和转速的风力发电机组,其所测得的功率输出数据可以利用公式(4)计算:

$$P_n = P_{10 \min} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{10 \min}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$P_n$ ——折算后的功率输出;

$P_{10 \min}$ ——测得的 10 min 的平均功率值;

$\rho_0$ ——标准空气密度;

$\rho_{10 \min}$ ——所得到的 10 min 的平均空气密度。

对于功率自动控制的风力发电机组应采用折算后风速数据,可按公式(5)进行折算:

$$V_n = V_{10 \min} \left( \frac{\rho_{10 \min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

$V_n$ ——折算后的风速值;

$V_{10 \min}$ ——测得的 10 min 的平均风速值;

$\rho_0$ ——标准空气密度;

$\rho_{10 \min}$ ——得到的 10 min 的平均空气密度。

## 9.2 确定所测得的功率曲线

测量的功率曲线是对折算的数据组采用 bin 方法(method of bins)进行处理的。采用 0.5 m/s bin 宽度为一组,利用折算后的每个风速 bin 所对应的功率值根据公式(6)、公式(7)计算得出:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

$V_i$ ——折算后的第  $i$  个 bin 的平均风速值;

$V_{n,i,j}$ ——折算后的第  $i$  个 bin 的  $j$  数据组的风速值;

$P_i$ ——折算后的第  $i$  个 bin 的平均功率值;

$P_{n,i,j}$ ——折算后的第  $i$  个 bin 的  $j$  数据组的功率值;

$N_i$ ——第  $i$  个 bin 的 10 min 数据组的数据数量。

测量最后所得到的功率曲线应该按照第 10 章所述要求提供。

## 9.3 年发电量(AEP)

年发电量是利用测量所得到的功率曲线对于不同参考风速频率分布所计算出的估算值。而参考风速频率分布可以采用瑞利分布进行,该分布与形状系数为 2 时的威布尔分布等同。对于年平均风速为

4,5,6,7,8,9,10,11 m/s 时的年发电量(AEP)可以根据公式(8)、公式(9)计算获得:

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

AEP——年发电量;

$N_h$ ——年内的小时数,  $\approx 8760$ ;

$N$ ——bin 数;

$V_i$ ——折算后的在第  $i$  个 bin 的平均风速值;

$P_i$ ——折算后的在第  $i$  个 bin 的平均功率值。

$$F(V) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$F(V)$ ——风速的瑞利分布函数;

$V_{ave}$ ——在风力机轮毂中心高度处的年平均风速值;

$V$ ——风速值。

以设定  $V_{i-1} = V_i - 0.5$  m/s 和  $P_{i-1} = 0.0$  kW 时开始叠加。

年发电量(AEP)必须计算两个方面,一方面为“年发电量测量”;另一方面为“年发电量外推”。如果测量所得到的功率曲线中没有包括到切出风速值时,则只能采用外推法获得从所测得的最大风速值外推到切出风速的功率曲线。

年发电量测量部分由测试所得到的功率曲线获得,假定在所测功率曲线范围的以上或以下所有风速的功率值为零。

年发电量外推部分获得是假设所有低于测试的功率曲线最低风速的所有风速的功率值为 0,而假设所有高于所测得功率曲线上最高风速到切出风速之间风速范围内的功率为恒定值。用于外推法的恒定功率值应该是所测得的功率曲线中最高风速 bin 的功率值。

风力发电机组年发电量的测量与外推应该在测试报告中明确指出,报告应按第 10 章要求进行。所有年发电量计算中,风力发电机组的运行可利用率为 100%。对于在给定年平均风速而进行年发电量估算时,若年发电量测量部分小于年发电量外推部分的 95%,则应该在报告中标明年发电量测量部分的估算为“不完整”。

根据附录 C 的要求,对于所有给定年平均风速的条件下,应该给出年发电量中的标准误差有关的测量误差估计。

对于上述的年发电量的误差,只考虑了那些来自于功率特性试验中的误差,而没有考虑其他重要的误差。事实上,年发电量的预测应该考虑其他诸多方面的因素,比如:当地风速发布、当地空气密度由于空气因素产生高气压紊流、极端风剪切、风力发电场内风力发电机组性能的变化、风力发电机组的可用性以及由于叶片表面粗糙影响造成的性能变化等。

#### 9.4 功率系数

根据第 10 章的有关要求,应该将风力发电机组的功率系数  $C_p$  加到测试报告的结论中。该功率系数可以根据所测得的功率曲线由公式(10)计算而获得。

$$C_{p,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$C_{p,i}$ ——在 bin  $i$  中的功率系数;

$V_i$ ——折算所得在 bin  $i$  中的平均风速;

$P_i$ ——折算所得到的在 bin  $i$  中的功率输出;

A——风力发电机组风轮的扫掠面积；

$\rho_0$ ——标准空气密度。

## 10 报告格式

测试报告应该包括以下内容：

——风力发电机组的描述：测试中的风力发电机组的结构等情况，至少包括：

- 生产厂家、型号、系列号、生产年；
- 确认过的风轮直径；
- 风轮转速或转速范围；
- 额定功率和额定风速；
- 叶片数据：生产厂家、型号、系列号、叶片数、定桨矩或变桨矩和确定的桨矩角度；
- 风轮轮毂中心高度和塔架类型。

——试验场地的描述（参见 6.2）：其描述应该包括测试现场的图片，图片最好应该从风力发电机组风轮轮毂中心高度处拍摄。还应该有试验场的地形图，此图应该显示半径为风轮直径 20 倍的范围内的地形情况、风力发电机组的位置、气象测试杆、高大建筑物、其他风力发电机组以及测试部分。

——描述试验场地的电网情况，比如：电压、频率和其他参数界限。

——描述测试设备（参见第 7 章）：传感器和数据采集系统的说明，包括传感器、数据采集系统、数据传输线标定的有关资料。

——测试程序的描述（参见第 8 章）：提供有关资料，这些资料应该包括：测试步骤、测试条件、采样速率、数据平均时间、测试周期，以及功率测量过程中发生重要事件的记录。

——数据介绍（见 8.3 到 8.6）：既以表格也可以图形介绍数据，提供测得的以风速为函数的功率输出的统计值和重要的气象参数，散点曲线，标准偏差，作为风速函数的最大和最小的功率输出，平均风速散点曲线，提供每个选择的数据组作为风向函数湍流度。例如功率性能试验中功率输出散点曲线数据的例子，如图 2 所示。

如上所述，还应提供在特殊运行和大气状态下，特殊数据库包括的采集的数据。

——应提供两种参考空气密度下（见 9.1 和 9.2）测得的功率曲线，提供测得功率曲线用表格和图形来表示。在曲线图和表格中应说明参考空气密度。对每个 bin，表格应包括折算的平均风速、折算的平均功率输出、数据组的数目和 A 类及 B 类综合（根据附录 C 决定）标准误差。图形曲线提供与表格相同的风速数据、功率输出和综合误差。如表 1 提供测得功率曲线的例子和图 3 功率曲线图形的例子。

按上所述，还应提供在特殊大气状态下运行，特殊功率曲线包含的采集数据。

——估算年发电量的介绍（见 9.3）：由测得的和外推的功率曲线计算年发电量，应提供估算年发电量的表格形式。表格应说明参考空气密度和切出风速（见表 2）。对每个年平均风速，表格应包括测得的年发电量、测得的年发电量误差（根据附录 C 规定）和外推的年发电量。按年平均风速，若测得的年发电量小于外推年发电量 95%，其表格应标记“不完全”。

——功率系数的介绍（见 9.4）：应提供以风速为函数的功率系数用表格形式和图形形式来表示。

——应提供关于所有误差组成方面的误差假设。

——误差：本部分涉及到的所有误差应在试验报告中反映出来，对每种误差都应有相应的技术说明。

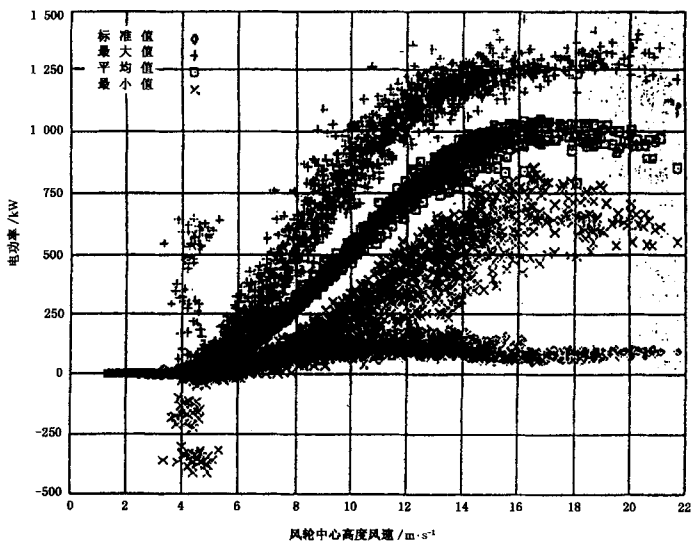


图 2 功率性能测试散点图

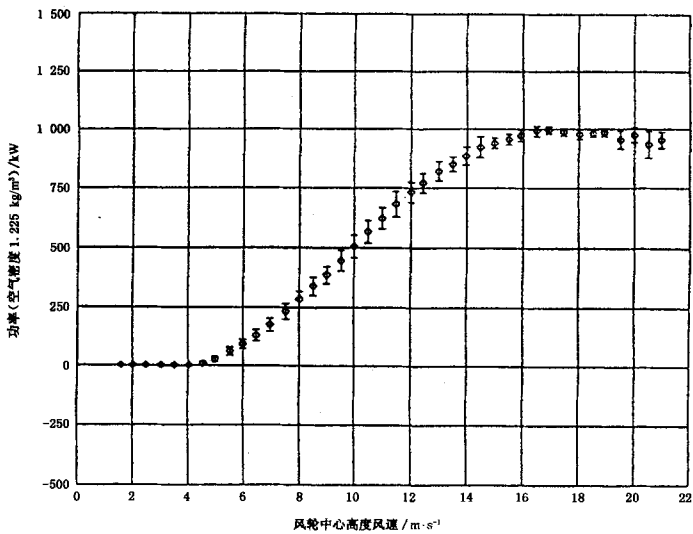


图 3 功率曲线

表 1 功率曲线测试数据的示例

测量功率曲线参考空气密度 1.225 kg/m <sup>3</sup>				A 型误差	B 型误差	综合型误差
bin 号 i	轮毂中心高度 处风速 $V_i/m \cdot s^{-1}$	功率输出 $P_i/kW$	数据的数量 $N_i/10 \text{ min}$ 平均值	标准误差 $S_i/kW$	标准误差 $U_i/kW$	标准误差 $U_{ci}/kW$
1	1.59	-0.85	8	0.00	6.31	6.13
2	2.02	-0.74	15	0.08	6.30	6.30
3	2.51	-0.81	18	0.05	6.30	6.30
4	3.04	-0.50	22	0.09	6.30	6.30
5	3.53	-0.67	27	0.10	6.30	6.30
6	4.04	0.16	41	0.67	6.31	6.35
7	4.55	7.32	55	1.02	7.21	7.28
8	4.99	25.90	61	1.22	12.45	12.51
9	5.54	61.43	54	1.98	18.40	18.50
10	6.00	93.16	95	1.51	20.13	20.19
11	6.47	129.78	90	1.87	23.71	23.78
12	6.97	174.46	81	2.55	27.32	27.44
13	7.53	231.77	68	2.91	33.10	33.23
14	8.02	283.63	61	2.79	34.56	34.67
15	8.52	339.55	73	3.56	39.19	39.35
16	9.00	378.22	69	3.36	35.38	35.54
17	9.51	445.98	69	2.91	42.88	42.98
18	9.99	504.41	81	2.58	46.23	46.30
19	10.50	565.17	79	2.86	47.72	47.80
20	11.01	620.67	74	3.73	44.69	44.85
21	11.50	680.87	78	3.07	53.04	53.13
22	12.02	731.22	85	3.42	43.10	43.24
23	12.46	770.77	60	4.00	41.44	41.64
24	13.03	820.11	102	2.63	41.46	41.55
25	13.53	850.86	88	3.57	31.81	32.01
26	13.99	884.94	79	4.68	37.79	38.08
27	14.47	923.82	85	3.36	42.99	43.12
28	14.98	940.46	61	4.59	21.13	21.62
29	15.49	956.59	28	7.35	21.01	22.25
30	15.92	972.27	27	7.19	23.81	24.87
31	16.50	990.54	33	3.46	21.99	22.26
32	16.93	994.74	14	7.80	14.15	16.16
33	17.45	987.43	12	3.00	15.38	15.67
34	18.01	976.59	23	10.26	17.36	20.16
35	18.51	980.11	23	4.71	13.58	14.37
36	18.91	984.33	13	6.84	14.52	16.05
37	19.50	954.56	5	12.15	35.38	37.40
38	20.01	975.12	7	9.064	29.91	31.49
39	20.53	934.42	8	9.046	55.36	56.16
40	20.97	952.60	5	11.97	31.26	33.47

表 2 估算年发电量示例

估算年发电量			
参考空气密度:1.225 kg/m <sup>3</sup>			
切出风速:25 m/s			
(从最后的 bin 以恒定功率外推)			
轮毂中心高度处年平均 风速(瑞利分布)/ m·s <sup>-1</sup>	测量年发电量 (测得功率曲线)/ MWh	与年发电量的标准误差有关 的所测得功率曲线的误差/ MWh, %	外推的年发电量 (外推功率曲线)/ MWh
4	412	111 27	412
5	911	154 17	911
6	1 536	191 12	1 536
7	2 207	219 10	2 214
8	2 847	236 8	2 880
9	3 395	245 7	3 487
10	3 812	248 6	4 001
11	4 092 不完整	245 6	4 403

附录 A  
(规范性附录)  
试验场地的评估

### A.1 关于地形变化的要求

试验场中的地形,在距风力发电机组的一个确定的距离上,应显示从一个经过风力发电机组塔架基础平面和在表 A.1 中要求的扇形区域内两者间的较小的变化,平面的坡度以及平面区域的变化应遵循于表 A.1 所提供的要求和条件,并且显示于图 A.1 中。其中, $L$  是风力发电机组和气象测风杆之间的距离, $D$  是风力发电机组的风轮直径。对风力发电机组是垂直轴的情况下, $D$  应该选择风轮最大的水平直径。

表 A.1 测试场所要求:地形变化

距离	扇形区域	最大坡度/%	地平面上最大的地形变化
$<2L$	$360^\circ$	$<3^\circ$	$<0.08D$
$\geq 2L, <4L$	测试扇区	$<5^\circ$	$<0.15D$
$\geq 2L, <4L$	测试扇区外部	$<10^\circ$	不适用
$\geq 4L, <8L$	测试扇区	$<10^\circ$	$<0.25D$

a 提供最合适的扇形地带和通过塔架基础的平面最大斜度。  
b 在扇区内连接塔架基础到地形中个别点的最陡峭斜坡的线。

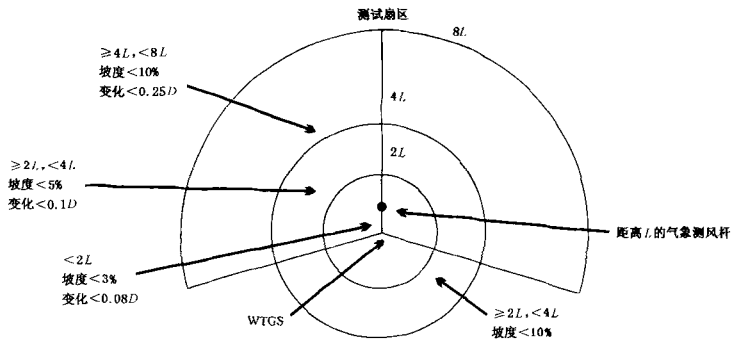


图 A.1 对地形变化的要求

### A.2 关于邻近运行风力发电机组的要求

试验的风力发电机组和气象测风杆不应受邻近运行风力发电机组的影响,从试验的风力发电机组和气象测风杆到相邻运行风力发电机组的最小距离为相邻风力发电机组风轮直径  $D_n$  的 2 倍,应排除由于相邻运行风力发电机组尾流引起的图 A.2 中所示扇区。应考虑相邻运行风力发电机组的实际距离  $L_n$  和风轮直径  $D_n$ 。试验风力发电机组和气象测风杆都应导出排除的扇形,而且它们应集中在从相邻运行风力发电机组到气象测风杆或试验风力发电机组的方向上。图 A.3 给出一个例子,应把停机的

风力发电机组视为障碍物。

A.3 关于对障碍物的要求

不重要的障碍物(如:建筑物、树木、停机的风力发电机组)在测量扇形区内应离开风力发电机组和气象测风杆有一定距离。只有小的建筑物接近风力发电机组或测量设备是可接受的。障碍物比允许的地形变化还小,可以忽略。从图 A.2 中应考虑排除由于重要障碍物尾流引起的扇形。应考虑的大小是障碍物的实际距离  $L_e$  和等效风轮直径  $D_e$ ,障碍物等效风轮直径规定如下:

$$D_e = \frac{2I_h I_w}{I_h + I_w} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$D_e$ ——等效风轮直径;

$I_h$ ——障碍物的高度;

$I_w$ ——障碍物的宽度。

对试验风力发电机组和气象测风杆都应求出排除的扇区。它们应集中在障碍物到气象测风杆或障碍物到风力发电机组的方向上。图 A.3 给出了一个例子。对停机的风力发电机组,  $L_h$  应是总高度,  $I_w$  或是靠近机组的最大塔架直径,或是叶片最大弦长。

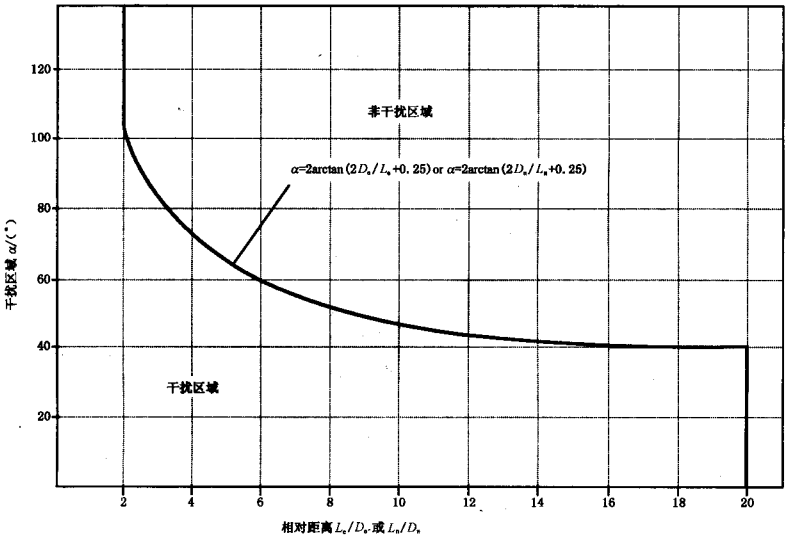
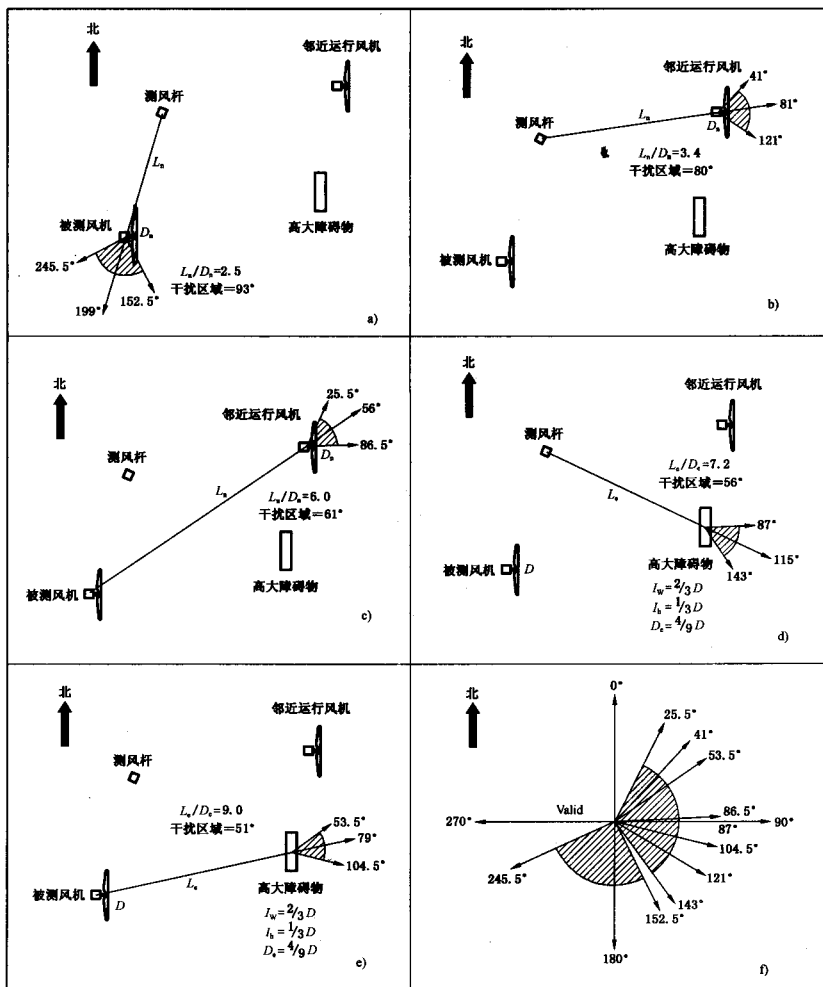


图 A.2 由于邻近物体、正在运行的风力机或高大障碍物应排除在外的扇区



本图给出的区域应将以下情况排除在外：

- a) 测风杆处在被测风力发电机组的尾流中；
- b) 测风杆处在邻近物或运行风力发电机组的尾流中；
- c) 被测风力发电机组处在邻近物或运行风力发电机组的尾流中；
- d) 测风杆处在高大障碍物的尾流中；
- e) 被测风力发电机组处在高大障碍物的尾流中；
- f) 以上所有情况的组合发生。

图 A.3 由于被测机组、邻近物体、正在运行的机组或高大障碍物而造成的尾流应排除在外的扇区的例子

**附 录 B**  
**(资料性附录)**  
**试验场地的标定**

试验场地标定的目的,是为确定由于试验场地地形引起的气流畸变修正系数。用临时安装的气象测风杆采集轮毂高度上的风速和风向来完成试验场地标定,气象测风杆安装在将要安装试验的风力发电机组的基础上,与功率性能试验使用的气象测风杆上的数据进行标定。

风速和风向测量应遵循第7章中描述的方法。数据采集应遵循8.3,数据的筛选应按8.4,数据应在最大为30°风向扇区进行归类。对每个风向扇区,应获得最少24 h从5 m/s到10 m/s风速范围的数据。

对于气象测风杆,按参考的气象测风杆测得的数据,对每个风向扇区,风力发电机组位置的测风数据与测风杆测风数据回归来确定气流畸变修正系数。

应该从多次测量中求出由于测量气流畸变修正系数有关的误差。误差分析方法应采用附录C介绍的方法。当气流畸变时,应评估其误差。但误差如果低于6.2.3中的要求,误差可以不用说明。

**附录 C**  
**(规范性附录)**  
**测量误差估算**

这个附录阐述了确定测量误差的要求。为确定误差采用 bin 方法作为理论基础,附录 D 中给出了一个误差的实例。

应以估算测量的误差补充修正测量功率曲线。误差类型:A 类由测量推算出来的,而 B 类可用其他方法估算。在这两种类型中,以标准偏差表示的误差和由(有关设备)指示误差来表达。

测量结果是功率曲线,用测量的和折算的电功率值和风速的 bin 值(见 9.1 和 9.2)来确定及计算年发电量(见 9.3),测量中的各种误差可被转换为敏感系数法得到的误差。

**表 C.1 误差产生因素**

测量参数	误差组成	误差种类
电功率	电流互感器	B
	电压互感器	B
	功率变送器或功率测量器件	B
	数据采集系统(见下面)	B
	电功率的变化	A
风速	风速仪的标定	B
	运转特性	B
	安装影响	B
	数据采集系统(见下面)	B
	受地形影响的畸变	B
空气温度	温度传感器	B
	辐射的屏蔽	B
	安装影响	B
	数据采集系统(见下面)	B
空气压力	压力传感器	B
	安装影响	B
	数据采集系统(见下面)	B
数据采集系统	信号传输	B
	系统的精度	B
	信号调理	B

**附录 D**  
**(资料性附录)**

**关于采用 bin 法确定测量误差的理论基础**

D.1 最一般的形式,在 bin  $i$  中功率的综合标准误差,  $U_{i,i}$  可用公式(D.1)表示:

$$U_{i,i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M C_{k,i} U_{k,i} C_{l,i} U_{l,i} \rho_{k,l,i,j} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

$C_{k,i}$ ——在 bin  $i$  中分量  $k$  的敏感系数;

$U_{k,i}$ ——在 bin  $i$  中分量  $k$  的标准误差;

$M$ ——在每 bin 中误差分量的数目;

$\rho_{k,l,i,j}$ ——在 bin  $i$  中分量  $k$  和 bin 中误差分量  $l$  之间的修正系数(在表达式中分量  $k$  和  $l$  都是在 bin  $i$  内)。

误差分量是单独输入量,输入到每个测得参数误差中。

D.2 估算年发电量,其综合标准误差  $U_{AEP}$  可以用最常用形式,如公式(D.2)表示:

$$U_{AEP}^2 = N_b^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M f_i C_{k,i} U_{k,i} f_j C_{l,j} U_{l,j} \rho_{k,l,i,j} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$f_i$ ——在 bin  $i$  内,在  $V_{i-1}$  和  $V_i$ :  $F(V_i) - F(V_{i-1})$  之间的相对出现的风速概率;

$F(V)$ ——作为风速函数的瑞利概率分布;

$N$ ——bin 数;

$N_b$ ——在一年中的小时数,  $\approx 8760$ 。

明显地减少修正系数全值  $\rho_{k,l,i,j}$  的可能性很小,但是,一般意义上的简化是需要的。

允许上述综合误差表达式简化到实用水平,可以做如下假设:

——误差分量或是完全修正( $\rho=1$ ,意味着得到综合标准误差线性总和)或单独修正( $\rho=0$ ,意味着平方和,如综合标准误差是误差分量平方和的平方根);

——所有误差分量(它们或类型 A 或类型 B)是相互独立的(或它们来自相同 bin 或不同 bin),除类型 B 误差分量以外,在不同 bin 中用 B 类分量相同原点进行完全修正(例如,功率变送器的误差)。

用这些假设,在一个 bin 内综合功率误差  $U_{i,i}^2$  可用公式(D.3)表示:

$$U_{i,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} C_{k,i}^2 S_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} C_{k,i}^2 U_{k,i}^2 = S_i^2 + U_i^2 \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$M_A$ ——A 类误差分量的数目;

$M_B$ ——B 类误差分量的数目;

$S_{k,i}$ ——A 类分量  $k$  在 bin  $i$  内的标准误差;

$S_i$ ——A 类在 bin  $i$  内的综合误差;

$U_i$ ——B 类在 bin  $i$  内的综合误差。

应注意,由于  $S_{p,i}$  依赖 bin 内数组的数目[见方程(D.10)],  $U_{i,i}^2$  不是和 bin 大小无关。假设意味着年发电量的综合标准误差  $U_{AEP}$  为:

$$U_{AEP}^2 = N_b^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} C_{k,i}^2 S_{k,i}^2 + N_b^2 \sum_{k=1}^{M_B} \left( \sum_{i=1}^N f_i C_{k,i} U_{k,i} \right)^2 \dots\dots\dots (D.4)$$

式中第二项的含义是,每个单独 B 类误差分量递进到对应的年发电量误差,对于单独分量,用整个 bin 的定量修正假设。最后整个 bin 综合误差分量平方加到年发电量误差结果内。实际上,在 B 类单独误差综合之前,把整个 bin 中 B 类误差综合起来是不合适的。近似的,在整个 bin 综合之前,允许在 bin 内把 B 类误差分量综合(如可以用  $S_i$  和  $U_i$ )。则导出更合适的方程:

$$U_{AEP}^2 = N_k^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} C_{k,i}^2 S_{k,i}^2 + N_k^2 \left( \sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} C_{k,i} U_{k,i}^2} \right)^2$$

$$= N_k^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 S_i^2 + N_k^2 \left( \sum_{i=1}^N f_i U_i \right)^2 \dots\dots\dots (D.5)$$

用上述表达式得到的  $U_{AEP}$ ,总是等于或大于用公式(D.4)得到的结果。

**D.3 延伸误差**

功率曲线和年发电量综合标准误差可以用附加的延伸误差表示。假定是标准分布,表 D.1 给出了可信度标准,并且还可以用此表的有效系数乘上标准误差求得可信度。

**表 D.1 延伸误差**

可信度标准/%	有效系数
68.27	1
90	1.645
95	1.960
95.45	2
99	2.576
99.73	3

例如:

下面的例子是通过每个测量功率曲线 bin 的 A 类和 B 类误差的估算来完成。求出功率曲线误差,并最后估算了年发电量的误差。

根据方程(D.5)采用综合 B 类误差分量,首先综合每个 bin 内所有误差分量,来表达每个测量参数的 B 类误差,如下是对风速而言的例子:

$$U_{v,i}^2 = U_{v1,i}^2 + U_{v2,i}^2 + \dots \dots\dots (D.6)$$

其中误差分量参考表 D.2,如这个表格采用了注和符号。其次,用 bin  $i$  中测量参数误差可表示测量标准误差:

$$U_{i,i}^2 = S_{P,i}^2 + U_{P,i}^2 + C_{v,i}^2 U_{v,i}^2 + C_{T,i}^2 U_{T,i}^2 + C_{B,i}^2 U_{B,i}^2 \dots\dots\dots (D.7)$$

$$U_{AEP}^2 = N_k^2 \left[ \sum_{i=1}^N f_i^2 S_{P,i}^2 + S_w^2 + \left( \sum_{i=1}^N f_i \sqrt{U_{P,i}^2 + C_{v,i}^2 U_{v,i}^2 + C_{T,i}^2 U_{T,i}^2 + C_{B,i}^2 U_{B,i}^2 + C_{m,i}^2 U_{m,i}^2} \right)^2 \right] \dots\dots (D.8)$$

其中由数据采集系统引起的误差是每个测量参数误差的一部分,在风速误差中包括由地形引起的气流畸变。单独地估算由于气象变化产生的误差  $S_w$ 。

这个实例仅考虑根据表 C.1 的误差分析中应包括的误差分量。在这个例子中应用了图 2 和图 3 及表 1 给出的测得功率曲线,用最后 bin 的功率作为不变功率,进行功率曲线外推(对缺少预处理数据),直到停机风速 25 m/s。图 3 和表 1 还给出这个例子的误差分析结果。表 D.3 列出所有敏感系数,表 D.4 列出 B 类误差。

**D.4 A 类误差**

只有 A 类误差需要考虑每个 bin 中测得的并折算后的电功率误差。

**D.4.1 A 类电功率误差**

每个 bin 中折算后分布的功率数据标准偏差用公式(D.9)计算:

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \dots\dots\dots (D.9)$$

式中:

$\sigma_{P,i}$ ——在 bin  $i$  内,折算后功率数据标准误差;

$N_i$ ——在 bin  $i$  内, 10 min 数据组的数目;

$P_i$ ——在 bin  $i$  内,折算后并平均的功率输出;

$P_{n,i,j}$ ——在 bin  $i$  内,数组  $j$  折算后功率输出。

表 D.2 A 类和 B 类误差

B类:仪器	注	误差	灵敏度
输出功率		$U_{P,i}$	
电流变换器 *	a	$U_{P1,i}$	$C_{P,i} = 1$
电压变换器 *	a	$U_{P2,i}$	
功率变送器或	a	$U_{P3,i}$	
功率测量装置 *	c	$U_{P4,i}$	
风速		$V_{V,i}$	
风速仪 *	b	$V_{V1,i}$	$C_{V,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$
工作特性 *	cd	$V_{V2,i}$	
安装影响 *	c	$V_{V3,i}$	
空气密度			
温度		$U_{T,i}$	$C_{T,i} = \frac{P_i}{288.15 \text{ K}}$
温度传感器 *	a	$U_{T1,i}$	
辐射屏蔽 *	cd	$U_{T2,i}$	
安装影响 *		$U_{T3,i}$	
气压		$U_{B,i}$	$C_{B,i} = \frac{P_i}{1013 \text{ hPa}}$
压力传感器 *	a	$U_{B1,i}$	
安装影响 *	c	$U_{B2,i}$	
数据采集系统		$U_{d,i}$	灵敏度系数取自实际的误差参数
信号传输 *	b	$U_{d1,i}$	
系统精度 *	cd	$U_{d2,i}$	
信号调理 *		$U_{d3,i}$	
B类:地形			
地形对气流的影响 *	bc	$U_{V4,i}$	$C_{V,i}$ (见上)
B类:方法			
方法		$U_{m,i}$	$C_{T,i}$ 和 $C_{B,i}$
空气密度的修正	cd	$U_{m1,i}$	(见上)
bin 法	c	$U_{m2,i}$	—
A类:统计			
电功率 *	e	$S_{P,i}$	$C_{P,i} = 1$
气候变化	e	$S_W$	—

注: \* 表示误差分析所需的参数。

表 D.2(续)

B类:仪器	注	误差	灵敏度
误差的识别符号: a=参照标准 b=校正 c=其他“客观”的方法 d=估计 e=统计			

在 bin 内折算后平均功率的标准误差用公式(D.10)估算:

$$S_i = S_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad \dots\dots\dots (D.10)$$

式中:

- $S_{P,i}$ ——在 bin  $i$  内, A 类标准误差;
- $\sigma_{P,i}$ ——在 bin  $i$  内, 折算后功率数据标准偏差;
- $N_i$ ——在 bin  $i$  内, 10 min 数据组的数目。

**D.4.2 A 类气候变化误差**

在特殊的气象条件下进行功率特性试验, 将会影响系统试验结果, 比如非常稳定(大的垂直风剪和低的紊流)或不稳定(小的风剪和高的紊流)大气层或频率和/或风向的大变化。用下列方式确定试验误差的数量级:

- a) 再细分试验记录为若干段, 有一个足够小的(统计的)功率误差;
- b) 对每个求得的功率曲线估算年发电量;
- c) 计算年发电量估算的标准偏差。

**D.5 B类误差**

B类假定误差与测量仪器、数据采集系统和功率特性试验场地周围地形有关。若用误差极限表示的误差, 或有绝对的, 非统一覆盖系数来表示误差, 必须估算标准误差或将其转换为标准误差。

注意, 考虑用一个误差极限表示误差 $\pm U$ , 如果假定是矩形概率分布, 其标准误差是:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (D.11)$$

假设是三角形概率分布, 其标准误差是:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}} \quad \dots\dots\dots (D.12)$$

**D.5.1 数据采集系统的 B 类误差**

对数据采集系统中, 从信号传递、信号调理、模拟量转换为数字量和数据处理都可能出现误差。对每个测量通道误差可能是不同的, 对一个可靠测量通道的整个范围, 数据采集系统的标准误差  $U_{d,i}$  可表示如下:

$$U_{d,i} = \sqrt{U_{a1,i}^2 + U_{a2,i}^2 + U_{a3,i}^2} \quad \dots\dots\dots (D.13)$$

式中:

- $U_{a1,i}$ ——在 bin  $i$  内, 信号传递和调理方面的误差;
- $U_{a2,i}$ ——在 bin  $i$  内, 数字化过程中的误差(如: 量化分辨率);
- $U_{a3,i}$ ——在 bin  $i$  内, 集成数据采集系统其他部分(软件、存储系统)方面的误差。

在这个例子中我们假设数据采集系统每个测量通道全量程的 0.1% 为标准误差。

**D.5.2 电功率 B 类误差**

功率变送器的误差由电流和电压互感器及功率变送器的误差组成的。这些器件的误差通常由其分级来表示。

用功率变送器、电流互感器、电压互感器和数据采集系统标准误差的综合来计算每一 bin 电功率标准误差  $U_{P,i}$ ：

$$U_{P,i} = \sqrt{U_{P1,i}^2 + U_{P2,i}^2 + U_{P3,i}^2 + U_{DP,i}^2} \dots\dots\dots (D.14)$$

式中：

$U_{P1,i}$ ——在 bin  $i$  内，电流互感器误差；

$U_{P2,i}$ ——在 bin  $i$  内，电压互感器误差；

$U_{P3,i}$ ——在 bin  $i$  内，功率变送器误差；

$U_{DP,i}$ ——在 bin  $i$  内，功率通道数据采集系统的误差。

在本例子中，电流、电压互感器和功率变送器全假设为 0.5 级。

根据 GB/T 1208, 0.5 级电流互感器(这里设定电流互感器的标称负载与标称功率 1 000 kW 相匹配而不是 200% 的标称功率)的误差极限在 100% 负载条件下为电流值的  $\pm 0.5\%$ 。然而，在 20% 和 5% 负载条件下，其误差极限相应地增加到  $\pm 0.75\%$  和  $\pm 1.5\%$  电流值。对于风力发电机组的功率特性测量，最重要的发电量是在减少功率时产生的，因此，我们预期 20% 负载条件下  $\pm 0.75\%$  电流值的误差极限有一个较合适的平均值。假定误差为矩形分布并且三个电流互感器的误差是由诸如：气温、电网频率等外部影响因素引起的，因而，可认为这些误差是完全相关(一般假定除外)并可线性叠加的。由于每个电流互感器占功率测量的三分之一，因此，根据所有电流互感器误差正比于功率得出公式(D.15)：

$$U_{P1,i} = \frac{0.75\% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{3} \times 3 = 0.43\% \cdot P_i [\text{kW}] \dots\dots\dots (D.15)$$

根据 GB/T 1207, 0.5 级电压互感器的误差极限在满负载条件下为电压值的  $\pm 0.5\%$ 。假定误差为矩形分布，电网电压通常很稳定但不受风力发电机组功率的影响，三个电压互感器的误差假如和电流互感器一样由外界因素引起的，如：气温、电网频率等。因而，可认为这些误差是完全相关(一般假定除外)并可线性叠加的。由于每个电压互感器占功率测量的三分之一，因此，根据所有电压互感器误差正比于功率得出下式：

$$U_{P2,i} = \frac{0.5\% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{3} \times 3 = 0.29\% \cdot P_i [\text{kW}] \dots\dots\dots (D.16)$$

如果电流和电压互感器工作在次级回路的工作负载极限之外，应增加附加误差。

根据 GB/T 13850, 0.5 级功率变送器的误差极限在标称功率为 2 000 kW (标称功率为 1 000 kW 风力发电机组的 200%) 时为 10 kW。假定误差为矩形分布，功率变送器的误差为：

$$U_{P3,i} = \frac{10 \text{ kW}}{\sqrt{3}} = 5.8 \text{ kW} \dots\dots\dots (D.17)$$

考虑到测量通道的电功率测量范围为 2 500 kW 且数据采集系统的误差是此范围的 0.1%，每个 bin 功率变送器的标准误差为：

$$U_{P,i} = \sqrt{(0.43\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (0.29\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (5.8 \text{ kW})^2 + (0.1\% \cdot 2\,500 \text{ kW})^2} \\ = \sqrt{(0.52\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6.3 \text{ kW})^2} \dots\dots\dots (D.18)$$

### D.5.3 风速的 B 类误差

风速测量中的误差是几个误差分量的组合，通常，最重要的是地形对气流的干扰、风速仪的安装影响和风速仪的校正误差。如果地形满足附录 A 的地形要求，根据风速仪塔架与风力发电机组间的距离可确定地形对气流畸变引起的误差为 2% 或 3%。如果按照附录 B 对试验场地进行修正，应使用此修正得出的标准误差，但应小于最大气流干扰的三分之一。如果以三维气流模型对试验场地进行标定，所使用的误差应小于最大气流影响的二分之一。除非风速仪安装在管状杆顶部，否则，须考虑安装影响(横

杆和塔的影响)造成的气流干扰。风速仪的校正误差和工作特性(超速、余弦响应、对温度和空气密度的敏感性)造成的误差是测量的主要误差因素。

数据 bin *i* 组中风速的 B 类误差  $U_{v,i}$  可表示为:

$$U_{v,i} = \sqrt{U_{v1,i}^2 + U_{v2,i}^2 + U_{v3,i}^2 + U_{v4,i}^2 + U_{av,i}^2} \quad \dots\dots\dots (D.19)$$

式中:

- $U_{v1,i}$ ——在 bin *i* 内, 风速仪标定误差;
- $U_{v2,i}$ ——在 bin *i* 内, 风速仪工作特性引起的误差;
- $U_{v3,i}$ ——在 bin *i* 内, 由安装影响引起的气流干扰误差;
- $U_{v4,i}$ ——在 bin *i* 内, 由地形引起的气流畸变误差;
- $U_{av,i}$ ——在 bin *i* 内, 由于在数据采集系统中风速测量的误差。

用测得功率曲线局部斜率确定敏感系数:

$$C_{v,i} = \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (D.20)$$

估算风速仪标定的标准误差为 0.2 m/s, 估算风速仪工作特性引起的误差为风速的 0.5%; 估算由于安装影响引起的气流干扰标准误差为风速的 1%, 估算由于地形引起的气流畸变标准误差为风速的 3%; 考虑测量通道风速范围为 30 m/s 而风速采集系统的误差是这个范围的 0.1%; 在每个 bin 内, 风速的标准误差是:

$$\begin{aligned} U_{v,i} &= \sqrt{(0.2 \text{ m/s})^2 + (0.5\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (1\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (3\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0.1\% \cdot 30 \text{ m/s})^2} \\ &= \sqrt{(3.2\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0.20 \text{ m/s})^2} \quad \dots\dots\dots (D.21) \end{aligned}$$

**D.5.4 空气密度 B 类误差**

从空气温度和压力测量得出空气密度。

空气温度测量要包括下列误差分量:

- 温度传感器标定的误差;
- 由于温度传感器不完整辐射屏蔽引起的误差(不好的屏蔽传感器处温度升高);
- 由于安装引起的误差(如果温度传感器不是在轮毂高度上, 垂直空气温度剖面从白天到晚上的变化会影响温度的估算)。

对每 bin 测得空气温度标准误差  $U_{T,i}$  可表示为:

$$U_{T,i} = \sqrt{U_{T1,i}^2 + U_{T2,i}^2 + U_{T3,i}^2 + U_{dT,i}^2} \quad \dots\dots\dots (D.22)$$

式中:

- $U_{T1,i}$ ——在 bin *i* 内, 温度传感器标定误差;
- $U_{T2,i}$ ——在 bin *i* 内, 不良温度传感器辐射屏蔽引起的误差;
- $U_{T3,i}$ ——在 bin *i* 内, 温度传感器安装影响引起的误差;
- $U_{dT,i}$ ——在 bin *i* 内, 空气温度影响数据采集系统的误差。

对海平面情况, 由下式估算空气温度测量敏感系数:

$$C_{T,i} = \frac{P_i}{288.15} [\text{kW/K}] \quad \dots\dots\dots (D.23)$$

如果传感器不是位于轮毂高度上, 为修正相对轮毂高度的空气温度、空气压力传感器的测量应首先包括修正系数, 要考虑由于传感器修正引起的误差, 而且应包括压力传感器的误差(标定的)。每 bin 测得空气压力标准误差  $U_{B,i}$  是:

$$U_{B,i} = \sqrt{U_{B1,i}^2 + U_{B2,i}^2 + U_{B3,i}^2} \quad \dots\dots\dots (D.24)$$

式中:

- $U_{B1,i}$ ——在 bin *i* 内, 空气压力传感器标定误差;

- $U_{Bz,i}$ ——在 bin  $i$  内,由于空气压力传感器安装影响引起的误差;
  - $U_{Bz,i}$ ——在 bin  $i$  内,因数据采集系统中空气压力测量误差。
- 对海平面情况,为估算空气压力测量灵敏度系数,用公式(D. 25):

$$C_{Bz,i} = \frac{P_i}{1013} [\text{kW/hPa}] \quad \dots\dots\dots (D. 25)$$

如果平均气温很高,相对湿度引起误差可能是重要的。在海平面并且空气温度为 20℃,0%~100%相对湿度下,空气密度变化为 1.2%。空气密度变化分别在 30℃和 40℃时为 2.0%和 4.0%。因此,在高温下,推荐测量相对湿度并修正。在这个例子中,没有考虑相对湿度的影响。

假定温度传感器的标准误差为 0.5℃,假定产生标准误差为 2℃的温度传感器的屏蔽,由于温度传感器安装影响引起的标准误差是取决于离开轮毂高度的垂直距离;假定离轮毂高度每 10 m 是在 10 m 以上高度上标准误差的 1/3℃,而如果安装低于 10 m,假定附加一个标准误差 1℃;用离地 2 m 高度上的传感器和轮毂高度为 30 m,由于安装影响引起误差为 1.9℃;考虑测量通道 40℃的温度范围,而数据采集系统的误差是这个范围的 0.1%;对每组空气温度标准误差表达式为:

$$U_{T,i} = \sqrt{(0.5 \text{ K})^2 + (2.0 \text{ K})^2 + (1.9 \text{ K})^2 + (0.1\% \cdot 40 \text{ K})^2} = 2.8 \text{ K} \quad \dots\dots (D. 26)$$

用一个标准误差为 3.0 hPa 来评价压力传感器,假定其压力根据 ISO 2533 修正到轮毂高度(这样,对一个标准大气压,在传感器和轮毂高度之间高度差 28 m,就是 3.4 hPa);假定由于采用引起的误差按 10%修正,即是 0.34 hPa。考虑压力通道测量范围为 100 hPa,而数据采集系统标准误差为这个范围的 0.1%;空气压力标准误差表示为:

$$U_{Bz,i} = \sqrt{(3.0 \text{ hPa})^2 + (0.34 \text{ hPa})^2 + (0.1\% \cdot 100 \text{ hPa})^2} = 3.0 \text{ hPa} \quad \dots\dots (D. 27)$$

**D. 5.5 综合的 B 类误差**

每 bin 的 B 类误差组合为:

$$U_i = \sqrt{U_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 U_{V,i}^2 + C_{T,i}^2 U_{T,i}^2 + C_{Bz,i}^2 U_{Bz,i}^2}$$

$$= \sqrt{(1.14\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6.3 \text{ kW})^2 + C_{V,i}^2 [(3.2\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0.20 \text{ m/s})^2]}$$

.....(D. 28)

**D. 6 综合标准误差——功率曲线**

通过叠加 A 类误差和所有的 B 类误差可得出功率曲线中每 bin 中的综合标准误差:

$$U_{c,i} = \sqrt{S_i^2 + U_i^2} = \sqrt{S_{P,i}^2 + U_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 U_{V,i}^2 + C_{T,i}^2 U_{T,i}^2 + C_{Bz,i}^2 U_{Bz,i}^2}$$

$$= \sqrt{S_{P,i}^2 + (1.14\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6.3 \text{ kW})^2 + C_{V,i}^2 [(3.2\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0.20 \text{ m/s})^2]}$$

.....(D. 29)

**D. 7 综合的标准误差——年发电量**

通过叠加所有 bin 的 A 类误差和 B 类误差可得出年发电量的综合标准误差:

$$U_{AEP} = N_b \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 S_i^2 + \left( \sum_{i=1}^N f_i U_i \right)^2}$$

$$= N_b \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 S_{P,i}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^N f_i \sqrt{(1.14\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6.3 \text{ kW})^2 + C_{V,i}^2 [(3.2\% \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0.20 \text{ m/s})^2]} \right\}^2}$$

.....(D. 30)

表 D.3 敏感系数

bin <i>i</i>	功率曲线		敏感系数		
	风速 $V_i /$ $\text{ms}^{-1}$	电功率 $P_i /$ $\text{kW}$	风速 $a_{v,i} /$ $\text{kW}/\text{ms}^{-1}$	空气温度 $a_{T,i} /$ $\text{kW}/\text{K}$	空气压力 $a_{p,i} /$ $\text{kW}/\text{hPa}$
1	1.59	-0.85	-1.71	0.00	0.00
2	2.02	-0.74	0.26	0.00	0.00
3	2.51	-0.81	-0.14	0.00	0.00
4	3.04	-0.50	0.57	0.00	0.00
5	3.53	-0.67	-0.33	0.00	0.00
6	4.04	0.16	1.60	0.00	0.00
7	4.55	7.32	14.15	0.03	0.01
8	4.99	25.89	41.94	0.09	0.03
9	5.54	61.43	64.60	0.21	0.06
10	6.00	93.16	68.84	0.32	0.09
11	6.47	129.78	79.25	0.45	0.13
12	6.97	174.46	88.47	0.61	0.17
13	7.53	231.77	103.46	0.80	0.23
14	8.02	283.63	103.93	0.98	0.28
15	8.51	339.55	113.87	1.18	0.34
16	9.00	387.22	98.50	1.34	0.38
17	9.51	445.98	115.67	1.55	0.44
18	9.99	504.51	120.47	1.75	0.50
19	10.50	565.17	119.84	1.96	0.56
20	11.01	620.67	107.78	2.15	0.61
21	11.50	680.87	124.37	2.36	0.67
22	12.02	731.22	96.45	2.54	0.72
23	12.46	770.77	89.68	2.67	0.76
24	13.03	820.11	86.27	2.85	0.81
24	13.53	850.86	62.13	2.95	0.84
25	13.99	884.94	73.13	3.07	0.87
27	14.47	923.82	81.68	3.21	0.91
28	14.98	940.46	32.89	3.26	0.93
29	15.49	956.59	31.44	3.32	0.94
30	15.92	972.27	36.74	3.37	0.96
31	16.50	990.54	31.49	3.44	0.98
32	16.93	994.74	9.75	3.45	0.98
33	17.45	987.43	-14.09	3.43	0.97
34	18.01	976.59	-19.21	3.39	0.96
35	18.51	980.11	7.07	3.40	0.97
36	18.91	984.33	10.51	3.42	0.97
37	19.50	964.56	-50.46	3.31	0.94
38	20.01	975.12	40.31	3.38	0.96
39	20.53	934.42	-78.58	3.24	0.92
40	20.97	952.60	40.87	3.31	0.94

表 D.4 B 类误差

bin i	电功率 $U_{P,i}/$ kW	风 速		空气温度		空气压力	
		$U_{V,i}/$ $\text{ms}^{-1}$	$a_{V,i} \times U_{V,i}/$ kW	$U_{T,i}/$ K	$a_{T,i} \times U_{T,i}/$ kW	$U_{B,i}/$ hPa	$a_{B,i} \times U_{B,i}/$ kW
1	6.30	0.21	-0.35	2.80	-0.01	3.00	0.00
2	6.30	0.21	0.06	2.80	-0.01	3.00	0.00
3	6.30	0.22	-0.03	2.80	-0.01	3.00	0.00
4	6.30	0.22	0.13	2.80	0.00	3.00	0.00
5	6.30	0.23	-0.08	2.80	-0.01	3.00	0.00
6	6.30	0.24	0.38	2.80	0.00	3.00	0.00
7	6.30	0.25	3.50	2.80	0.07	3.00	0.02
8	6.30	0.26	10.74	2.80	0.25	3.00	0.08
9	6.31	0.27	17.27	2.80	0.60	3.00	0.18
10	6.32	0.28	19.09	2.80	0.91	3.00	0.28
11	6.34	0.29	22.81	2.80	1.26	3.00	0.38
12	6.36	0.30	26.51	2.80	1.70	3.00	0.52
13	6.41	0.31	32.39	2.80	2.25	3.00	0.69
14	6.47	0.33	33.83	2.80	2.76	3.00	0.84
15	6.54	0.34	38.49	2.80	3.30	3.00	1.01
16	6.61	0.35	34.54	2.80	3.76	3.00	1.15
17	6.71	0.36	42.11	2.80	4.33	3.00	1.32
18	6.82	0.38	45.43	2.80	4.90	3.00	1.49
19	6.95	0.39	46.86	2.80	5.49	3.00	1.67
20	7.08	0.41	43.68	2.80	6.03	3.00	1.84
21	7.23	0.42	52.08	2.80	6.62	3.00	2.02
22	7.36	0.43	41.81	2.80	7.11	3.00	2.17
23	7.47	0.45	40.01	2.80	7.49	3.00	2.28
24	7.61	0.46	39.90	2.80	7.97	3.00	2.43
24	7.70	0.48	29.63	2.80	8.27	3.00	2.52
25	7.80	0.49	35.86	2.80	8.60	3.00	2.62
27	7.92	0.50	41.20	2.80	8.98	3.00	2.74
28	7.98	0.52	17.08	2.80	9.14	3.00	2.79
29	8.03	0.53	16.80	2.80	9.30	3.00	2.83
30	8.08	0.55	20.10	2.80	9.45	3.00	2.88
31	8.14	0.56	17.77	2.80	9.63	3.00	2.93
32	8.15	0.58	5.63	2.80	9.67	3.00	2.95
33	8.13	0.59	-8.36	2.80	9.59	3.00	2.92
34	8.09	0.61	-11.72	2.80	9.49	3.00	2.89
35	8.10	0.63	4.42	2.80	9.52	3.00	2.90
36	8.12	0.64	6.70	2.80	9.56	3.00	2.92
37	8.02	0.66	-33.06	2.80	9.28	3.00	2.83
38	8.09	0.67	27.04	2.80	9.48	3.00	2.89
39	7.96	0.69	-53.95	2.80	9.08	3.00	2.77
40	8.01	0.70	28.62	2.80	9.26	3.00	2.82