

新能源——风能的计算研究

孙济良 陈喜军

孙秀艳

(水利水电科学研究院, 北京 100044) (唐山市水利局)

提 要

风速是风能计算中十分重要的气象因子,它是一随机变量。能反映各地区风速特点的一个重要形式是风速分布模型。该文提出一种通用性强的新的风速分布模型,它随模式参数的变动而改变模型结构,以适应各地区风速分布特征,具有普遍实用意义。

关键词: 风能 风速 模型 研究

引 言

我国面积广大,风能是非常可观卓有前景的洁净新能源。风能不仅潜力大,而且还具有周而复始,可以再生;取之不尽,用之不竭;分布广泛,就地取用;使用风能不破坏不污染环境等优点,受到了人们普遍重视。由于风速是决定风能大小的唯一重要因子,它又是一随机变量。所以,必须加强对它进行科学分析,研究各地不同条件下这一能量的变化规律。

风能计算取值决定于风速估值是否合理可信。由于气候地理因素的复杂性,形成各地风速分布多变的事实,充分体现了各地风速分布将服从不同的理论概率分布,作为这种概率分布模型,各有其特点和应用范围。困难的是无法从成因上和理论上证明某地区风速该属于何种分布。那么,在风能概率计算中,只能采用多种模型进行拟合,哪种拟合最优就采用哪种。然而这种方法,一是工作量大,计算麻烦;更主要的是多种模型的统计参数,其合理性不宜综合比较分析。

本文针对风速现象的随机性这一本质特性,提出能反映这一自然规律的随机应变的风速分布模型,随各地区实际分布而变换模

型参数与之拟合,这就比较切实地解决了当前风能计算中存在风速模型难以确定的问题。

1 风速分布模型

风速作为一种随机现象,必然存在总体分布。虽然无法从成因上和理论上证明它服从于何种分布,但根据大量资料通过统计推断,并采用某种理论分布与实际的经验分布拟合的方法,是可以近似地分析它的分布型式的。其必要条件是拥有足够多的气象资料,由此可以判断一个地区风速的分布规律。

我国幅员辽阔,气候地理因素错综复杂。各地区风速统计特征的差异性十分悬殊,能综合反映各地区风速特点的一个最重要的形式是风速分布模型。

国内外对风速分布,曾有过不少的研究和探索,可用一定的统计模型来进行拟合。通常用于拟合风速分布的模型有7种:瑞利(Rayleigh)分布; Γ (Gamma)分布;韦布尔(Weibull)分布;三参数韦布尔分布;皮尔逊(Pearson)Ⅱ型分布;对数正态分布和耿贝尔(Gumbel)或称极值Ⅰ型分布。其中,韦布尔分布普遍认为是一种形式简单且与实际风速分布能较好地拟合的概率模型,是目前风能计算中普遍采用的一种分布模型。

笔者推出一种通用性强的分布模型。其最大特点,当模型参数取某些特定值时,即转化为其它 12 种分布,其中也包括上述 7 种分布模型,它们的转化条件见表 1。表中,新模

型密度函数

$$P(v) = \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)}(v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \cdot \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] \quad (1)$$

表 1 新分布模型包含的 7 种分布及转化条件

转化条件	转化的分布	
	模型	密度函数 $P(v)$
$\delta=0, a=1,$ $\beta=1/2\delta^2, b=1/2$	瑞利分布	$\frac{v}{\delta^2} [\exp(-v^2/2\delta^2)]$
$\delta=0, b=1$	Γ 分布	$\frac{\beta^a}{\Gamma(a)} [v^{a-1} \exp(-\beta v)]$
$b=1/m, a=1,$ $\beta=1/d$	韦布尔分布	$\frac{m}{d} (v-\delta)^{m-1} \exp[-(v-\delta)^m/d]$
$\delta=0, a=a/m,$ $b=1/m, \beta=1/d$	三参数韦布尔分布	$\frac{m}{d^{a/m} \Gamma(a/m)} v^{a-1} \exp(-v^m/d)$
$b=1$	皮尔逊 I 型分布	$\frac{\beta^a}{\Gamma(a)} (v-\delta)^{a-1} \exp[-\beta(v-\delta)]$
$b=10$	对数正态分布	可从分布的统计特性分析论证新模型与对数正态分布相近似
$b=10$	耿贝尔分布	可从分布的统计特性分析新模型与耿贝尔分布相近似

1.1 新模型的概率密度函数

新模型是由 Γ 分布经过指数转换推导而得,其概率密度函数^[1]见公式(1),其中, $\delta \leq v \leq \infty$, v 为随机变量,这里特指风速; δ 、 a 、 β 和 b 分别为模式的位置、形状、比例和变换参数。

1.2 矩与参数

实践证明,风速分布呈偏态型的概率分布,要描写这样一种分布至少要有 3 个统计参数,即风速的平均值 $\bar{v}$ 、离差系数 C_v 和偏态系数 C_s 。

通常用矩来表示随机变量的各统计参数,又根据矩和统计参数的关系得到统计参数与模式参数的关系

$$\bar{v} = [\Gamma(a+b)/\beta^a \Gamma(a)] + \delta \quad (2)$$

$$C_v = [\Gamma(a)\Gamma(a+2b) - \Gamma^2(a+b)]^{1/2}$$

$$/[\Gamma(a+b) + \delta\beta^a \Gamma(a)] \quad (3)$$

$$C_s = [\Gamma^2(a)\Gamma(a+3b) - 3\Gamma(a)\Gamma(a+b) \cdot$$

$$\Gamma(a+2b) + 2\Gamma^3(a+b)]$$

$$/[\Gamma(a)\Gamma(a+2b) - \Gamma^2(a+b)]^{3/2} \quad (4)$$

1.3 概率曲线与风速设计值

对式(1)进行积分,得新概率模型的分布函数 $P(v)$,即超过累积概率

$$P = P(v \geq v_P) = \int_{v_P}^{\infty} \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} \cdot (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] dv \quad (5)$$

令

$$t = \beta(v - \delta)^{1/b} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得新模型的概率曲线

$$P = \int_{t_P}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(a)} t^{a-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

联立求解式(2)、(3)得 δ 和 β ,并代入式(6)、(7),即可计算各种概率的风速设计值 v_P

$$v_P = \bar{v}(1 + \Phi_P C_v) \quad (8)$$

式中:

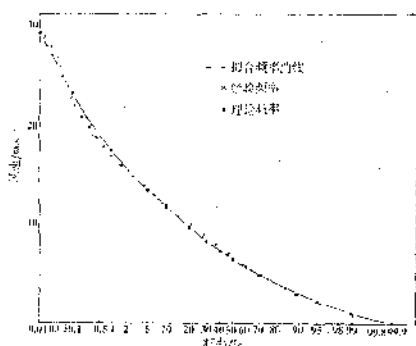
$$\Phi_P = [\Gamma^b \Gamma(a) - \Gamma(a+b)] / [\Gamma(a)\Gamma(a+2b) - \Gamma^2(a+b)] \quad (9)$$

1.4 实例

以浙江嵊泗站风速观测资料为例(计算过程从略)。拟优适线得统计参数见表 2;新风速模型与经验分布拟合结果是满意的(见附图)。

表2 崂山风速统计参数

v	C_v	C_s	b
7.00	9.50	1.00	10.0



附图 崂山平均风速经验分布与风速模型拟合

2 由新风速模型计算风能

根据风能密度定义,风能密度 w 只和大气密度 ρ 、风速 v 有关。对于指定地点,当视 ρ 为常量时,风能密度由风速唯一决定。所以,风能密度只有当风速比较合理地确定的前提下,才能较正确地估算。

2.1 平均风能密度

风能密度是评价一个地区风能潜力最方便和最有价值的量。从风能密度公式 $w = \rho v^3 / 2$ 可知,风能大小与气流速度的三次方成正比,可见风速取值对风能潜力估计起决定性作用。

由于风速具有随机性这一本质特点,必须通过长期观测资料,进行平均风况分析,才能了解和掌握其变化规律。因此,在时段 T 内平均风能密度 $\bar{w}$ 可由风能密度公式积分而得

$$\bar{w} = \int_0^T \frac{\rho}{2f} v^3 dt \quad (10)$$

当 T 时段内风速的概率分布 $P(v)$ 被确定后,平均风能密度便可根据式(11)求得

$$\bar{w} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \rho v^3 P(v) dv \quad (11)$$

假设风速的概率分布服从新风速模型,则由式(11)、(1)得

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \rho v^3 \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \\ &\quad \cdot \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] dv \\ &= \frac{\rho}{2} \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} \int_0^\infty \frac{\beta^a}{b} (t + \delta)^{\frac{a}{b}-1} \\ &\quad \cdot \exp(-\beta t)^{1/b} dt \\ &= \frac{\rho}{2} \frac{\beta^{a+1/b}}{\Gamma(a)} \int_0^\infty \frac{\beta^a}{b} \left(\frac{x^b}{\beta^b} + \delta \right)^3 \\ &\quad \cdot \left(\frac{x}{\beta} \right)^{b(\frac{a}{b}-1)} e^{-x} \frac{bx^{b-1}}{\beta^b} dx \\ &= \frac{\rho}{2} \left[\frac{\Gamma(a+3b)}{\beta^{3b}\Gamma(a)} + \frac{3\delta\Gamma(a+2b)}{\beta^{2b}\Gamma(a)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\delta^2\Gamma(a+b)}{\beta^b\Gamma(a)} + \delta^3 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

当新风速模型与实际观测的风速经验分布拟合最优时,取统计参数 v, C_v, C_s, b 值代入式(2)、(3)、(4),联立解出 α, β 和 δ ,然后再代入式(12),即可求得平均风能密度 $\bar{w}$ 。

2.2 有效风能密度

在风力工程中,风力机起动风速和停机风速范围内的风能称有效风能。显然,有效风能范围内的平均风能密度即为有效风能密度。根据有效风能密度定义,它的数学表达式为

$$\bar{w}_e = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2} \rho v^3 P'(v) dv \quad (13)$$

式中: $\bar{w}_e$ 为有效风能密度; v_1 为起动风速; v_2 为停机风速; $P'(v)$ 为有效范围内的条件概率分布,其密度函数:

$$\begin{aligned} P'(v) &= \frac{P(v)}{P(v_1 \leq v \leq v_2)} \\ &= \frac{P(v)}{P(v \leq v_2) - P(v \leq v_1)} \quad (14) \end{aligned}$$

有效风能密度 $\bar{w}_e$, 作为两个随机变量 (ρ, v) 的函数,则也为随机变量。因此, $\bar{w}_e$ 的数学期望

$$E(\bar{w}_e) = \frac{1}{2} E(\rho v^3) \quad (15)$$

因为 ρ 与 v 是两个独立变量,于是

$$E(\bar{w}_e) = \frac{1}{2} E(\rho) E(v^3) \quad (16)$$

当计算某一具体地点的风能时,又因 ρ 变化不大,近似视作常量,因此式(16)可写为

$$E(\bar{w}_e) = \frac{1}{2} E(v^3) \quad (17)$$

有效风速范围内风速立方的数学期望:

$$\begin{aligned} E'(v^3) &= \int_{v_1}^{v_2} v^3 P'(v) dv \\ &= \int_{v_1}^{v_2} v^3 \frac{P(v)}{P(v \leq v_2) - P(v \leq v_1)} dv \\ &= \int_{v_1}^{v_2} v^3 \frac{P(v)}{P_2 - P_1} dv \end{aligned} \quad (18)$$

利用积分法求新模型分布函数小于某个风速值 v_g 的累积概率

$$\begin{aligned} P &= P(v \leq v_g) = \int_{\delta}^{v_g} \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} \cdot \\ &\quad (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] dv \\ &= \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} \int_{\delta}^{v_g} (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \cdot \\ &\quad \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] dv \\ &\quad \frac{v' = \beta(v - \delta)^{1/b}}{\Gamma(a)} \cdot \\ &\quad \int_0^{\beta(v_g - \delta)^{1/b}} v'^{a-1} e^{-v'} dv' \end{aligned} \quad (19)$$

令

$$P_1 = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{\beta(v_1 - \delta)^{1/b}} v'^{a-1} e^{-v'} dv' \quad (20)$$

$$P_2 = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{\beta(v_2 - \delta)^{1/b}} v'^{a-1} e^{-v'} dv' \quad (21)$$

将式(20)、(21)代入式(18)得

$$\begin{aligned} E'(v^3) &= \int_{v_1}^{v_2} v^3 \cdot \\ &\quad \frac{\frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}]}{P_2 - P_1} dv \\ &= \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} \int_{v_1}^{v_2} v^3 \cdot \\ &\quad \frac{(v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}]}{P_2 - P_1} dv \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)可通过数值积分求得。所以,有效风能密度为

$$\bar{w}_e = \frac{1}{2} \rho E'(v^3) = \frac{\rho \beta^a}{2b\Gamma(a)}$$

$$\int_{v_1}^{v_2} v^3 \frac{(v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}]}{P_2 - P_1} dv \quad (23)$$

2.3 风能可利用的时间

一般在风能利用中,主要是利用有效风能。为了更合理地利用风能,必须估算出风能的可利用时间。在风速概率分布确定以后,有效风速范围内,风能的年小时数可由下式求得。

$$\begin{aligned} t &= N \int_{v_1}^{v_2} P(v) dv \\ &= N \int_{v_1}^{v_2} \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} (v - \delta)^{\frac{a}{b}-1} \cdot \\ &\quad \exp[-\beta(v - \delta)^{1/b}] dv \\ t' &= \frac{\beta(v - \delta)^{1/b}}{\Gamma(a)} N \int_{\beta(v_1 - \delta)^{1/b}}^{\beta(v_2 - \delta)^{1/b}} \frac{\beta^a}{b\Gamma(a)} \cdot \\ &\quad \left(\frac{v'}{\beta} \right)^{\frac{a}{b}-1} e^{-v'} \frac{bv'^{b-1}}{\beta^b} dv' \\ &= N \int_{\beta(v_1 - \delta)^{1/b}}^{\beta(v_2 - \delta)^{1/b}} \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} \cdot \frac{v'^{a-b}}{\beta^{a-b}} \cdot \\ &\quad \frac{v'^{b-1}}{\beta^b} \cdot e^{-v'} dv' \\ &= \frac{N}{\Gamma(a)} \int_{\beta(v_1 - \delta)^{1/b}}^{\beta(v_2 - \delta)^{1/b}} v'^{a-1} e^{-v'} dv' \end{aligned} \quad (24)$$

式中的 N 为统计时段总时间,如计算年风能可利用小时数时, N 即为全年的总时数。

3 结语

3.1 风能概率统计属于推理统计,其主要内容是利用气象资料(风速样本),通过物理成因分析加以解释后,建立数学模型,并用统计参数来表示,以推断整体资料(总体)的性质。从而了解风速分布(原型)规律的真象,进而加以应用。

3.2 风速频率模型是确定风力大小的依据。因此,风速频率模型的合理正确,对风资源利用起到十分重要的作用。我国幅员辽阔,各地气候地理条件极不一致,风速分布也各不相同,难以一种固定不变的理论模型相适应。本

文提出的通用性较强的可变动模型可随各种条件而异,通过模型模式参数的调整,改变模型自身的结构,随机显示与各种实际风速分布相适应的型式,为模型拟合实际风速分布(原型)创造了有利条件,对统计参数的综合

分析和合理确定,以及推求不同频率的设计风速,提供了比较坚实的统一基础。

参考文献

- 1 孙济良,水文频率模型与拟合——再论水文频率线型择优及参数估计,水力发电,1993年第3期.

The Research on Calculation of Wind Energy

Sun Jiliang Chen Xijun

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing 100044)

Abstract

The wind velocity is the sole important meteorological factor in the formula calculating wind energy, it is a stochastic variable. The distributed models of wind velocity are of an important form that can reflect characteristics of wind velocity in different areas. A new distributed model of wind velocity is developed. The new model can change itself structure along with variation of parameters of the model to fit in with the distributed characteristic of wind velocity in different areas. It is valuable to extensive practical application.

Key Words: wind energy wind velocity model calculation