

# 我国风能资源的初步研究

屠其璞 史慧敏

## 提 要

本文用平均风速和平均最大风速确定风速韦伯分布参数  $k$ 、 $c$ ，并根据  $k$ 、 $c$  计算了全国 165 个测站的理论风能的各种特征量，分析了风能特征量的分布规律，指出：我国风能资源以内蒙地区、渤海湾沿岸、东南沿海、东北平原、青藏高原等地为最丰富，四川盆地、塔里木盆地为最小；风能资源随高度升高先是迅速增加，而后逐渐减慢。

我国是使用风能最早的国家之一，在公元前几百年就用风车磨面、汲水。近年来由于技术的发展，风能利用效率不断提高，风能作为一种取之不竭的自然能源重又得到了广泛的注意<sup>[1]</sup>。本文对我国风能资源状况作一初步分析，以期为开发和利用我国的风能资源提供气候学背景。

## 一、风能的概率分布

风能就是运动空气具有的动能。在单位时间内通过单位面积的空气流所具有的动能即风的功率密度 (wind power density)

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

式中  $\rho$  为空气密度， $V$  为风速。如所周知， $\rho$  和  $V$  都可看作具有一定概率分布的随机变量， $P$  作为两个随机变量的函数，当然也是一个随机变量。因此，我们首先研究它的统计特征即  $P$  的数学期望和方差。

对一个指定地点， $\rho$  随气压和气温而改变。观测资料表明，在近地层中， $\rho$  的数学期望的量级为  $10^0$ ，方差的量级为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ，而  $V^3$  的数学期望的量级为  $10^2 \sim 10^3$ ，方差的量级通常可达  $10^4 \sim 10^6$ 。因此， $P$  的随机变化主要是  $V^3$  的随机变化引起的，在实际工作中，对一个指定地点，我们可以把  $\rho$  近似地看作常数，这样  $P$  的概率分布特征实际上就决定于  $V$  的概率分布特征了。

在研究风速的概率特征特别是研究风能利用时，常用韦伯 (Weibull) 分布

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

来表示风速的概率分布<sup>[2]</sup>。式中  $k$  和  $c$  为韦伯分布的两个参数,  $k$  称作形状参数, 是一个无因次量,  $c$  称作尺度参数, 它的量纲即速度单位。与 (2) 式相应的风速  $V$  的分布函数为

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

$V$  的数学期望和方差分别为

$$E(v) = c \Gamma\left[1 + \frac{1}{k}\right] \quad (4)$$

$$\text{Var}(v) = c^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^2 \right\} \quad (5)$$

式中  $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ ,  $\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)$  为  $\Gamma$  函数。贾斯特斯(Justus)等<sup>[2]</sup>曾讨论过根据风速观测资料估计风速韦伯分布参数的各种方法。根据我们的试验, 在这些方法中以采用逐时观测资料的平均数一方差法和最小二乘法为最好, 但所需风速资料需根据原始记录作专门统计, 在研究大范围风速的概率分布特征时, 费工费时, 实际有很多困难。从我国现有整编资料情况出发, 我们用多年平均风速和最大风速来估计风速的韦伯分布参数。

设  $V_{\max}$  为某一月(年)内观测到的十分钟平均最大风速, 根据最大风速统计定义, 显然它出现的概率为

$$P(V \geq V_{\max}) = \exp\left[-\left(\frac{V_{\max}}{c}\right)^k\right] = \frac{1}{24 \times 6 \times d} \quad (6)$$

式中  $d$  为该月(年)的天数。对 (6) 式作逆变换, 並考虑到 (4) 式, 得

$$\frac{V_{\max}}{E(v)} = \frac{[\ln(24 \times 6 \times d)]^{1/k}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (7)$$

观测资料表明,  $k$  值通常变动范围为 1.0~2.6 之间, 此时  $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \approx 0.90$ , 于是从 (7) 式得  $k$  的近似解为

$$k = \ln[\ln(144d)] / \ln[0.90 V_{\max} / E(v)] \quad (8)$$

又据 (4) 式可得

$$c = \frac{E(v)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (9)$$

这里  $E(v)$  可用风速观测值的算术平均代替。

我们分别用最小二乘法和 (8) 式计算了南京不同年份 9 个月的风速韦伯分布参数  $k$  值, 並以最小二乘法所得的估计值为标准, 统计用最大风速和平均风速所得分布参数  $k$

估计值的平均误差仅0.02, t 检验结果表明, 误差的数学期望与“0”无显著差异, 即可认为两种方法所得估计值之间没有系统误差。k 的较大误差大都与抽样随机性造成的  $V_{\max}$  对多年平均状况的明显偏离有关。本文的目的在于分析多年平均的风能特征, 因此, 在以后的讨论中, 都是根据  $V$  和  $V_{\max}$  的多年平均值估计风速的韦伯分布参数, 这样由于抽样随机性小, k 的估计精度无疑还可较上述试验有明显提高。

风速的概率分布确定之后, 风速立方值  $Y = V^3$  的概率密度函数不难确定为

$$f(y) = \frac{k}{3c^k} y^{k/3-1} \exp\left[-\frac{1}{c^k} y^{k/3}\right] \quad (10)$$

(10)式表明  $Y = V^3$  也服从韦伯分布, 它的形状参数和尺度参数分别为  $k/3$  和  $c^3$ , 于是

$$E(v^3) = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (11)$$

$$\text{var}(v^3) = c^6 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{6}{k}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \right]^2 \right\} \quad (12)$$

根据观测资料求得风速  $V$  的韦伯分布参数, 相应的风的功率密度的统计特征也就可以完全确定了。

我们根据全国除台湾省以外的165个测站的观测资料, 计算了各站全年风速韦伯分布参数  $k$  和  $c$ , 绘制了  $k$ 、 $c$  值分布图(图1)。由图可见, 内蒙地区、渤海湾沿岸、东



图 1 Weibull 参数  $k$  值分布图

南沿海和岛屿、东北平原、北疆和青藏高原是  $c$  和  $k$  值的高值区, 浙闽丘陵、四川盆地、塔里木盆地和河套平原是低值区。从全国范围来看,  $c$  和  $k$  值之间存在着密切相

关, 两者的线性相关系数达0.85, 它们之间的统计关系可用回归方程表示为

$$k = 0.8965 + 0.1550 c \quad (13)$$

风速和风速立方的变差系数为

$$C_v(v) = \frac{\sqrt{\text{var}(v)}}{E(v)} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (14)$$

$$C_v(v^3) = \frac{\sqrt{\text{var}(v^3)}}{E(v^3)} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{6}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{3}{k}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)} \quad (15)$$

$C_v(v)$  和  $C_v(v^3)$  都随  $k$  的增大而减小。

## 二、我国的风能资源

(1)式给出了瞬时风功率密度的表达式, 作为一地常年的风能资源的指标, 在实际工作中通常采用风的功率密度的数学期望

$$E[P] = E[\rho v^3]/2 \quad (16)$$

假定空气密度与风速无关, 则平均功率密度为

$$E[P] = E[\rho] \cdot E[v^3]/2 \quad (17)$$

根据第一节分析, 空气密度的月或年平均平均值可以据状态方程用月或年的平均气压  $\bar{P}$  和平均气温  $\bar{T}$  估算, 即

$$E[\rho] = \frac{\bar{P}}{R \bar{T}} \quad (18)$$

式中  $R \approx 2.87 \times 10^2$  焦耳/千克·度, 为干空气的气体常数, 于是平均功率密度可表示为

$$E[P] = \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{P}}{R \bar{T}} \cdot E[v^3] \quad (19)$$

### 1. 总的平均功率密度 $E[P]$

根据风速资料, 求出风速的韦伯分布参数  $k$  和  $c$ , 即可由(11)式和(19)式计算出平均功率密度  $E[P]$ 。必须指出, (11)式求得的  $E[v^3]$  包括了风速从 0 到  $\infty$  范围内的平均, 故用(11)式得到的  $E[v^3]$  代入(19)式求得的  $E[P]$  称为总的平均功率密度。

我们计算了165个测站的总的平均功率密度, 绘出全国平均功率密度分布图(图2)。由图可见, 内蒙地区、渤海湾沿岸、东南沿海、东北平原、青藏高原和新疆北部为平均功率密度的高值区, 一般在80瓦特/米<sup>2</sup>以上, 最大的如山东半岛的成山头, 内蒙的朱日和、福

建的平潭、崇武均可达200瓦特/米<sup>2</sup>以上（由于沿海岛屿的测点缺乏本文所要求的足够长年代的自记记录，我们仅据平潭、崇武两站的定时观测记录进行计算，没有计算更多站点的风能值，所以东南沿海的大风能区未能在图上充分反映出来）。四川盆地、塔里木盆地、浙闽丘陵为平均功率密度的低值区，一般在20瓦特/米<sup>2</sup>以下，成都、宜宾、汉中均在5瓦特/米<sup>2</sup>以下。

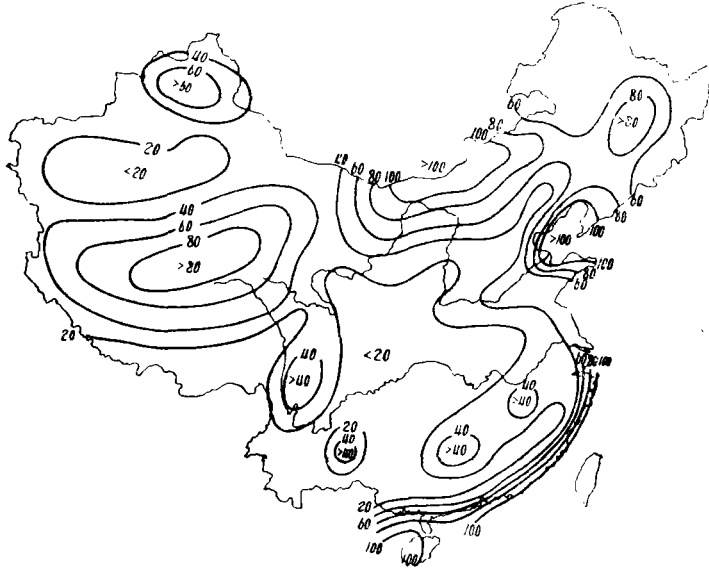


图 2 全国平均功率密度分布图 (瓦特/米<sup>2</sup>)

## 2. 平均可用功率密度 $E_a [P]$

风的总能量不可能全部为风能发动机所利用，一般风能发动机有三个风速指标：启动风速  $V_0$ ，额定风速（或称最佳风速） $V_1$ ，极限风速  $V_2$ 。当风速在  $V_0 - V_1$  之间时，随着风速的增大，风力机输出功率也增大；而当风速在  $V_1 - V_2$  之间时，风能只起到维持最大输出功率的作用（其理论值为  $P = \rho V_1^3 / 2$ ），风力机输出功率不再随风速而增大；当风速大于  $V_2$  时，风力机将被摧毁，此时必须关闭风力机以保护设备。因此，我们称  $V_0 - V_2$  之间对风能利用有贡献的风速立方平均值为可用风速立方平均值，用  $E'[y]$  表示。显然

$$\begin{aligned}
 E'[y] = & \frac{\int_{v_0^3}^{v_1^3} y^k \frac{k}{3c^k} y^{k/3-1} \exp\left[-\left(\frac{1}{c^k}\right) y^{k/3}\right] dy}{\exp\left[-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right]} + \\
 & + \frac{v_1^3 \left\{ \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] \right\}}{\exp\left[-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right]} \quad (20)
 \end{aligned}$$

于是，平均可用功率密度可表示为

$$E_u[P] = \frac{1}{2} \frac{\bar{P}}{R \bar{T}} E'[y] \quad (1)$$

我们根据对江苏省风能发动机的初步了解，并参照美国NASA的100千瓦风能发动机，选定  $V_0=3.0$ 米/秒， $V_1=8.0$ 米/秒， $V_2=27.0$ 米/秒，计算了165个测站的平均可用功率密度，并绘制了平均可用功率密度分布图（图3）。

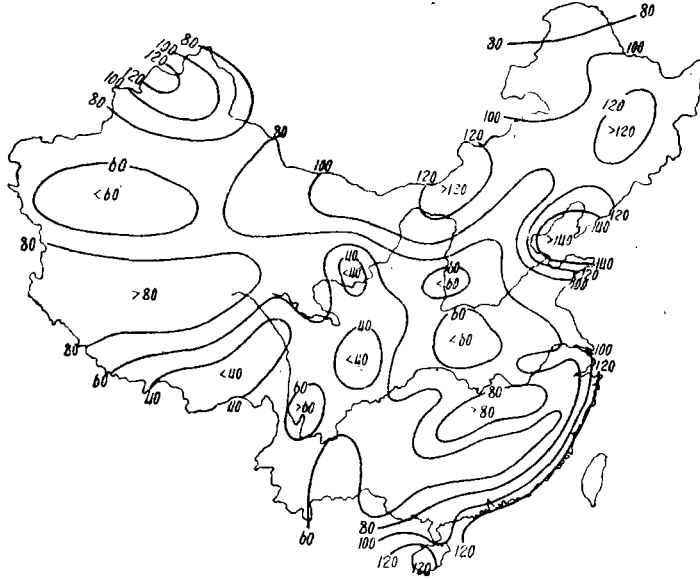


图3 全国平均可用功率密度分布图（瓦特/米<sup>2</sup>）

由图可见，平均可用功率密度的分布趋势与总的平均功率密度相同。一般  $E[P]$  高值区也是  $E_u[P]$  的高值区， $E[P]$  的低值区也是  $E_u[P]$  的低值区。此外，我们还看到一个有意义的事实，即  $E[P]$  大的地区， $E_u[P]$  可能比  $E[P]$  还小，例如塘沽、成山头、大连、海南岛的东方、浙江沿海的象山和石浦等。而  $E[P]$  小的地区， $E_u[P]$  一般均比  $E[P]$  大，例如南疆、华中等地区。这是因为  $E[P]$  大的地区平均风速大，出现大风速的概率也大，但是当风速大于额定风速  $V_1$  时，风的能量不能完全被发动机提取，所以  $E_u[P]$  比  $E[P]$  小。而在  $E[P]$  小的地区，平均风速小，出现大风速的概率小，风的能量大部分集中在可被风能发动机利用的范围内，所以  $E_u[P]$  比  $E[P]$  大。为了能在各种条件下都能充分利用风能，可以在  $E[P]$  大的地区配备大功率的风能发动机，而在  $E[P]$  小的地区配备小功率的风能发动机。一地选用何种功率的风能发动机，可根据风速概率分布确定。

### 3. 风能可用时数 $T$

根据一地风速概率分布以及风能发动机的风速指标值，可以求得该地风能发动机的实际可工作时数，即风能可用时数  $T$  为

$$T = 24 \times d \times \int_{v_0}^{v_2} f(v) dv = 24 \times d \times \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{v_0}{c} \right)^k \right] - \exp \left[ - \left( \frac{v_2}{c} \right)^k \right] \right\} \quad (22)$$

式中  $d$  为月 (年) 的日数。

根据全国165个测站绘制的风能可用时数  $T$  分布图 (图4) 表明, 风能可用时数  $T$  的分布趋势与  $E[P]$ 、 $E_u[P]$  的分布大致相同, 内蒙、渤海湾、东南沿海地区为  $T$  的高值区, 年可用风能时数在6000小时以上, 平均每天16小时以上, 南疆、华北平原、四川盆地、浙闽丘陵为  $T$  的低值区, 年可用风能时数在2000小时以下, 其中四川盆地平均每天还不到3小时。

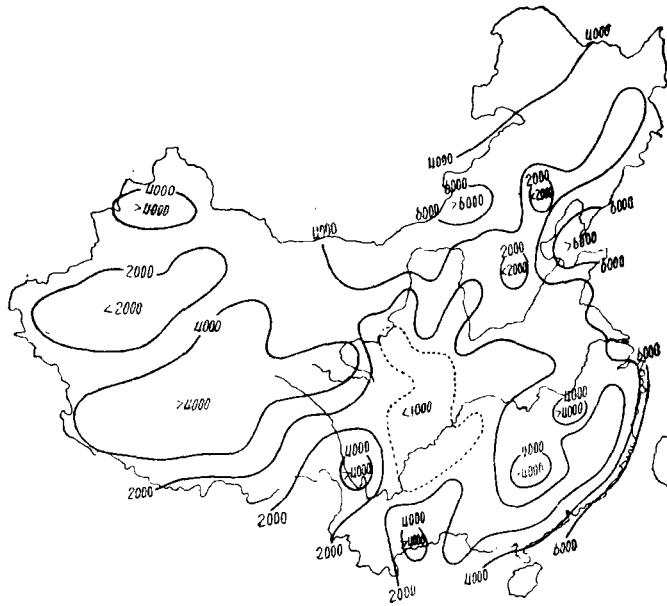


图4 风能可用时数分布图 (小时)

### 三、风能资源的垂直分布

在近地层中, 风速有明显的垂直变化, 因此风能也随高度有明显的变化。为了合理规划风能利用, 研究风能垂直变化规律是很有意义的。一些研究结果<sup>[3]</sup>表明, 韦伯分布参数在近地面层中随高度变化很有规律, 根据这种规律, 我们不难从一个高度的韦伯分布参数推求其它高度的韦伯分布参数, 从而认识风能资源随高度变化的规律。

贾斯特斯等指出, 尺度参数  $c$  随高度的变化可以用指数律

$$\frac{c}{c_0} = \left( \frac{z}{z_0} \right)^n \quad (23)$$

表示。这里  $z_0$  为风仪所在高度， $c_0$  为  $z_0$  高度的风速分布尺度参数。实际上，由于  $c$  指的数值主要取决于平均风速，所以  $c$  依指数律随高度变化这一规律，不难从平均风速依指数律随高度变化得到解释。

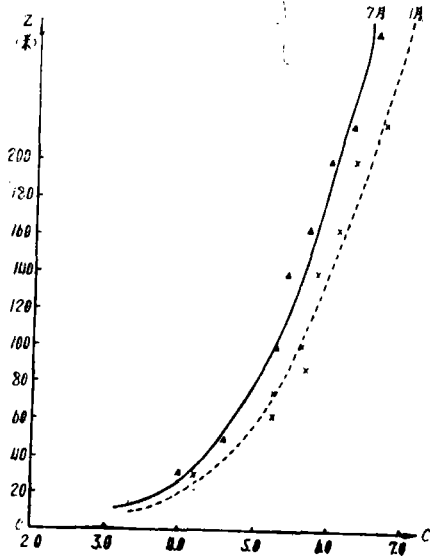


图 5  $c$  随高度的变化

图 5 给出了南京 1、7 月份风速韦伯分布参数  $c$  随高度的变化。用最小二乘法拟合  $c$  的廓线得南京 1、7 月份风速韦伯分布参数  $c$  的指数律廓线的指数值分别为 0.2079 和 0.2132，它们和贾斯特斯等得到的美国的指数  $n$  的平均值 0.23 十分接近。

韦伯分布的另一个参数  $k$  在近地层中随高度的变化也很有规律，开始  $k$  随高度增加而增加，大约在 60 米附近  $k$  达极大值 ( $k_{max}$ )，随后，随着高度增加  $k$  值重又减小。贾斯特斯等指出  $k/k_{max}$  随高度变化的曲线随季节和地理位置的变化甚小，因此，可以根据一些气象塔的观测资料求得  $k$  值随高度变化的通用曲线。图 6 给出南京 1、7 两月  $k/k_{max}$  随高度的变化。由图可见，不同季节

$k/k_{max}$  的廓线没有明显差异，与贾斯特斯给出的美国通用曲线相比基本特征也很相似。

根据南京观测资料，我们求得  $k$  随高度变化的经验公式为

$$k(z) = k_0 \frac{1 - 0.0758 [\ln(z/53)]^2}{1 - 0.0758 [\ln(z_0/53)]^2} \quad (24)$$

式中  $z_0$  和  $k_0$  分别为风仪所在高度和该高度的风速韦伯分布参数，显然，根据一个高度的风速观测资料求得该高度的风速韦伯分布参数  $c_0, k_0$  后，由经验公式 (23) 和 (24)，即可求得该地任意高度的风速韦伯分布参数，从而认识各高度的风能状况。

我们用 (23) 和 (24) 式计算了  $c_0, k_0$  取各种数值时各高度的  $c(z), k(z)$ ，并据此计算了各高度总的平均功率密度、平均可用功率密度、风能可用时数。作为例子，表 1 给出  $c_0 = 3.0$  和  $c_0 = 5.0$  时的计算结果，它们大致代表了我国风能有一定利用前景地区的一般状况。

由表 1 可见，尽管  $c$  值随高度依指数律递增，但由于  $\Gamma(1+3/k)$  项的作用， $E[P]$  随高度的变化却可近似地看作是线性的，与十米高度相比，大致高度每升高十米， $E[P]$  平

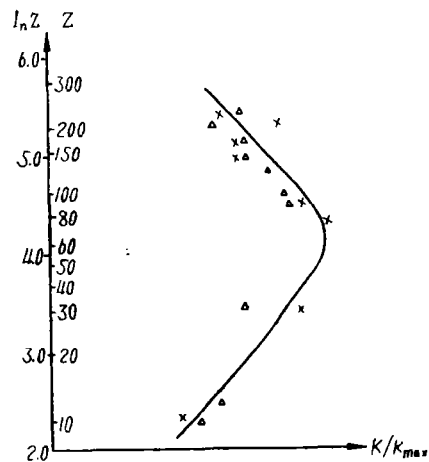


图 6  $k/k_{max}$  随高度的变化



均递增20~25%，且递增速率在 $c_0$ 值较小时大于在 $c_0$ 值较大时。可用功率密度 $E_u[P]$ 和风能可用时数 $T$ 随高度的变化与 $E[P]$ 不同，在贴近地面的几十米中， $E_u[P]$ 和 $T$ 随高度增加很快，但到了上层 $E_u[P]$ 和 $T$ 随高度增加的速率很快减慢，到了200米高度甚至略有减小，这是因为随着高度增加，出现大风速的概率也增加，当风速大于发动机额定风速 $V_1$ 时，风能不能完全被利用，因此，平均功率密度虽然很大，但实际可利用的部分却并不增加甚至反而减小。应该指出， $E_u[P]$ 和 $T$ 随高度的变化与地面风速分布及风能发动机的三个风速指标 $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 有关。

表1 风能特征量随高度的变化

高度 (米)	项 目			$E[P]$		$E_u[P]$			$E[P]$		$E_u[P]$	
	C	K	$T/T_{10}$	(瓦特/米 <sup>2</sup> )	(瓦特/米 <sup>2</sup> )	C	K	$T/T_{10}$	(瓦特/米 <sup>2</sup> )	(瓦特/米 <sup>2</sup> )		
10	3.00	1.35	1.00	43	77	5.00	1.70	1.00	130	101		
20	3.49	1.60	1.24	49	78	5.69	2.02	1.16	157	110		
30	3.81	1.67	1.39	59	82	6.13	2.12	1.22	187	116		
40	4.05	1.72	1.50	68	86	6.47	2.16	1.26	216	120		
50	4.25	1.73	1.57	78	89	6.74	2.17	1.28	242	122		
100	4.94	1.67	1.76	130	101	7.66	2.11	1.32	365	129		

从风能资源随高度变化的这些规律出发，只要适当提高风能发动机装置高度，即使在地面风速较小地区的风能资源也能得到充分利用。但随着风能发动机装置高度的增加，经济投资也急剧增加，而在一定高度上风能资源的增长率却明显降低。因此，根据风能资源的情况，可以确定一个最经济而有效的高度，在这一高度装置发动机，能使投资发挥最大经济效益。从我国大多数地区考虑，我们初步认为20~30米高度是比较合适的。

#### 四、结 语

由于资料的限制，只能对我国大范围风能资源状况作一概略研究。但风状况明显地受地形、地理条件的影响，在地形、地理条件复杂地区，水平距离相隔不远的两地，风状况也可有明显差异，因而风能资源也各不相同，只有通过对这些地区的风能特征量的具体计算和分析之后才能得到较为准确的认识。本文采用的计算风能的方法，同样可以应用于分析中、小范围风能资源。

#### 参 考 文 献

- [1] E. W. Hewson, Generation of Power from the Wind, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 56, No. 7, 660—675, 1975.
- [2] C. G. Justus, Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distribution, J. Appl. Meteor., Vol. 17, No. 3, 350—353, 1978.
- [3] C. G. Justus, Nationwide Assessment of Potential Output from Wind Powered Generators, J. Appl. Meteor., Vol. 15, No. 7, 673—678, 1976.

# A Preliminary Study of Wind Power Resource in China

Tu Qipu    Shi Huimin

## ABSTRACT

The Weibull distribution parameters  $k, c$  are determined by mean wind and averaged maximum wind data. According to the values of the parameters, all characteristic quantities are computed with respect to data of theoretical wind power from 165 stations over China. The distributions of the quantities show that maximum wind power resource is available in Nei Monggol Autonomous Region, the coast along the Buohai Bay, the coastland in Southeast China, the vast plain of Northeast China and the Qinghai-Xizang Plateau and the minimum is found over the Sichuan Basin and the Tarim Basin. The analysis indicates that wind power resource increases with height quickly and then falls off slowly at further ascent.