

风能的计算和我国风能的分布

朱瑞兆 薛 桁

(气象科学研究院天气气候所)

一、前 言

风能的利用,在我国和全世界都有着悠久的历史。由于近年来世界范围内的能源危机,风能的利用再度引起了人们的注意。

风能的优点很多。风力机是靠风力运转的。它不需要燃料,也就无需运输。同时它也不会污染环境,是一种“清洁”的能源。风能又是一种可以再生的能源。也就是说,风在通过风力机作功以后,还能在一定距离以外再次造成与原来相同大小的风力。世界上风能的具体储量,目前人们的估计颇不相同。但是总的说来,风力的潜在能量是很大的,是取之不尽、用之不竭的。

但是,风能的利用也有许多困难。风能的能量密度低,大致是水能的 1/816。要获得与水能相同的功率,风轮的直径就要比水轮的大许多倍。同时,风的能量不稳定,它不仅受到天气、气候的影响,还要

受到地形因子的影响。另外,风有阵性,时大时小,也给风能的利用带来困难。

风力过小或过大,都难以利用。风速很小时,风力机无法启动。风速超过 20 米/秒(或 27 米/秒)时,风力机的安全会受到影响,这时就需要关闭风机,停止运转。

下面介绍一下风能的计算方法和我国风能资源的分布。

二、风能的计算

根据流体力学可知,气流的动能为:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

上式中 m 为一团气体的质量, v 为气流速度。在 1 秒钟内气流以速度 v 垂直流过截面积为 F 的气体的体积为:

$$V = v \cdot F$$

则体积为 V 的空气质量是:

$$m = \rho V$$

也即:

$$m = \rho v F$$

上式中 ρ 为空气密度, 其单位为公斤/米³。此时气流所具有的动能为:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho F v^3 \quad (2)$$

此式即通常所用的风能公式。由 (2) 式可以看出, 风能与气流通过的面积成正比, 与风速的立方成正比。因此, 风速的较小误差, 能引起风能的较大误差; 故在风能利用中取什么样的风速是要慎重考虑的问题。

面积 F 可以看作是风力机风轮旋转一圈所扫过的面积, 那么:

$$F = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

上式中 D 为风轮直径, 所以:

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{8} D^2 \rho v^3 \quad (4)$$

但是风轮只能把穿过它的风能的一部分吸收变成机械能, 故风轮效能总是小于 1。根据苏联沙比宁 (Г. X. Сабинин) 计算, 最理想的高能利用率为 0.687, 但实际上只有 0.4 左右。一般将此称为风能利用系数, 用 ξ 表示。这样, 风力机的实际功率应乘 ξ , 即

$$W = \frac{\pi}{8} D^2 \rho v^3 \cdot \xi \quad (5)$$

在标准大气下, $\rho = 1/8$ 公斤力·秒²/米⁴, 代入 (5) 式:

$$W = \frac{\pi}{8} D^2 \frac{1}{8} \cdot v^3 \cdot \xi$$

整理后:

$$W = \frac{\pi}{64} D^2 v^3 \xi \text{ 公斤力} \cdot \text{米/秒} \quad (6)$$

又因 1 马力 = 75 公斤力·米/秒, 再将 π 的数字代入, 则由 (6) 式可得:

$$W = (D^2 v^3 / 1530) \cdot \xi \text{ 马力} \quad (7)$$

若以瓩为单位, 因 1 马力 = 0.736 瓩, 故 (7) 式可改写成:

$$W = (D^2 v^3 / 2080) \cdot \xi \text{ 瓩} \quad (8)$$

公式 (7) 和 (8) 是计算风力机实际功率用的。利用它们可以把不同风速和不同直径风轮的功率直接计算出来。

现在和我们气象工作关系最密切的是, 估计一地的风能潜力大小时, v 取什么风速。取日、月和年的平均风速? 还是取自记 24 次的 10 分钟风速? 根据我们对全国三百多站风速资料进行的对比分析, 发现用日、月、年的平均风速计算风的能量, 其误差很大。以一年中 ≥ 3 米/秒的总时数和风能 (瓩) 来比较, 两站平均风速基本相同时, 其 ≥ 3 米/秒的时数可相差几百小时, 风能可相差 1.2—1.7 倍 (最多可相差 2.4 倍)。例如, 林芝和福州的平均风速都是 2.0, 但是其 ≥ 3 米/秒的风速时数却相差 528 小时, 风能相差 115 瓩; 西沙和五道梁的平均风速都是 4.8, 但其 ≥ 3 米/秒的风速时数却相差 892 小时, 风能相差 109 瓩。

若以各级风速 (≥ 3 、4、5 …… 20 米/秒) 相比较, 差异也很大。例如, 张掖和赤峰两站年平均风速仅相差 0.05 米/秒, 但张掖的 ≥ 3 米/秒风速要比

赤峰多 417 小时, 而 4—8 米/秒的风速张掖反比赤峰少 692 小时, > 8 米/秒张掖又比赤峰多 93 小时。虽然张掖比赤峰年平均风速小 0.05 米/秒, 其能量密度还大 10.2 瓦/米²。同时从对三百多个站的统计来看, 年平均风速相同, 其 ≥ 3 米/秒的时数以及风能相同者甚少。若以相差 5% 算作相同者, 其站数也只占总站数的 5% 以下。所以我们认为以平均风速估计一地的风能或可利用的风速 (≥ 3 米/秒) 的小时数都是不恰当的, 而必须根据 24 次自记记录, 按不同等级风速出现的频率计算各地的风能和小时数。

公式 (7) 和 (8) 是假定在标准大气下得出的公式, 现在很多人不考虑海拔高度等因素而直接利用这两个公式计算风力机的实际功率, 这也是不妥当的, 因为这样作只是在海拔 500 米以下误差不大。若超过 500 米, 这两式就有误差了。这主要是随着海拔增高空气密度减小而造成的。故此时仍需回到风压的基本公式 (2), 按当地的压温湿计算空气密度 ρ , 其公式为:

$$\rho = \frac{1.2930}{1 + 0.00367t} \left(\frac{P - 0.378e}{760} \right) \quad (9)$$

其中 P 为气压 (毫米); t 为气温 ($^{\circ}\text{C}$); e 为绝对湿度 (毫米)。我们根据全国三百余站的计算, 得出海拔高度与空气密度的指数经验公式如下:

$$\rho = 1.225 e^{-0.0001z} \quad (10)$$

$$r = 0.98$$

其中 ρ 为对应 z 的密度, z 为海拔高度, r 为相关系数。由

(10) 式可见空气密度的影响还是很大的。这也会直接影响到能量的计算。我们按 8 米/秒风速计算各高度的风能如附表。由表中可以看出, 3000 米处的风能仅是 500 米以下处的 74%, 4000 米处是其 67%。

附表

项目 \ 海拔高度 (米)	≤ 500 米	1000	2000	3000	4000	5000
空气密度	1.225	1.11	1.00	0.91	0.82	0.74
风能 (瓩)	313.6	284.2	256.6	233.0	209.9	189.4
比值	1.00	0.90	0.82	0.74	0.67	0.60

有了空气密度, 再代入 (2) 式计算风能, 才是当地真实的风能。

下面谈一下风能密度的计算。风能密度是一地风能潜力大小的指标值。因为它既反映了各级风速出现的频率, 又反映了空气密度的影响, 所以现在各国多采用这个指标值。其计算方法是将公式 (2) 的 F 取作 1, 即为:

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3 \text{ (瓦/米}^2\text{)}$$

一地的风能密度大小, 要视该地常年平均风能的多少而定, 即:

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3 dt \quad (11)$$

式中 $\bar{W}$ 为平均风能密度, v 为对任何时刻的风速, T 为总的时数。在知道了风速的概率分布 $P(v)$ 后, 平均风能密度还可根据下式求得:

$$\bar{w} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 P(v) dv \quad (12)$$

近地层风速概率分布,有很多模式,常用的有韦伯(Weibull)分布,其概率密度形式为:

$$P(v)dv = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp[-(v/c)^k] dv$$

这里 c 为标度因子, k 为形状因子。这两个参数的变化与天气气候特点、地形等因素有关。通过风速观测的样本可确定这两个参数,然后再估算风能。此外,也可以从风速自记资料中直接统计各个站、各等级风速出现的累积小时数,然后利用风能公式(2)计算各级风速下的能量。再将各等级风能之和除以总时数,即得到一地年或月的平均风能密度(单位:瓦/米²),即:

$$\bar{w} = \frac{\sum \frac{1}{2} N_i \rho v_i^3}{N} \quad (13)$$

上式中 N_i 和 N 分别表示各等级风速全年累积小时数和总时数。

由于风力机在风速 3 米/秒以下时不能启动, 20 米/秒(国外有取 27 米/秒的)以上时对风力机有破坏的危险, 所以称 3—20 米/秒为可利用的风能。依此计算的风能密度称为有效风能密度。

三、我国风能资源分布

根据全国有效风能密度(如图 1)和 ≥ 3 米/秒

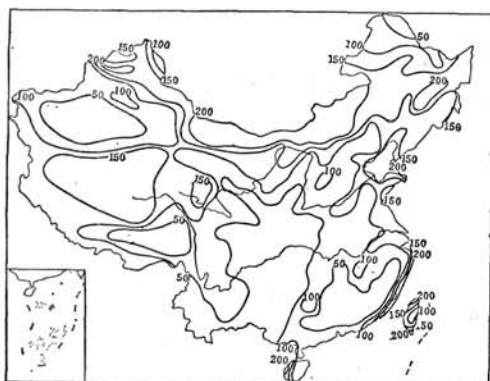


图 1 我国风能有效能量密度分布图(瓦/米²)

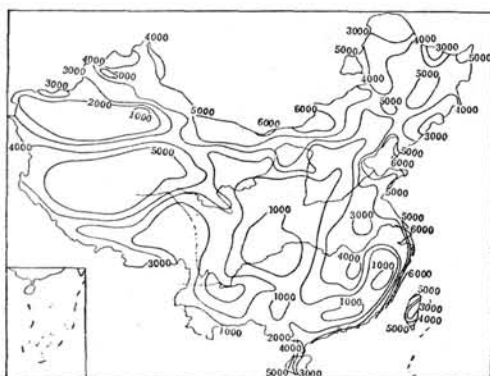


图 2 全年 3—20 米/秒风速累积小时数分布图

的年累积小时数(如图 2), 可以将全国分为四个区域。

I 区: 风能资源丰富区 主要集中在东南沿海及其岛屿, 风能密度在 300 瓦/米²以上, ≥ 3 米/秒全年为 7000—8000 小时。 ≥ 200 瓦/米² 的风能密度等值线与海岸线平行, 但向内陆减弱很快。风能丰富区约在离海岸 50 公里狭窄带里, 在不到 100 公里的地带风能密度降至 50 瓦/米²以下。

II 区: 风能资源较丰区 这一区包括四个地带:

(1) 内蒙和甘肃北部, 其风能密度在 200—300 瓦/米², ≥ 3 米/秒全年有 5000—6000 小时, 从北向南逐渐减小。但其梯度远较东南沿海小, 且分布较广, 为我国连成一片的最大地带。

(2) 黑龙江、吉林省的东部及辽东和山东半岛沿海地区, 风能密度也在 200 瓦/米²以上, ≥ 3 米/秒风速在 5,000 小时以上。

(3) 青藏高原北部, 风能密度在 150—200 瓦/米²之间, ≥ 3 米/秒风速也在 5,000 小时以上。青藏高原由于海拔高, 空气密度较小, 能量密度较同是 5,000 小时的地方为小。

(4) 东南沿海 50—100 公里, 海南岛西部, 台湾岛南端、北端以及新疆阿拉山口地区。这些地区风能密度都在 200 瓦/米²以上, ≥ 3 米/秒全年小时数也都在 5,000 以上。

III 区: 风能季节利用区 这一区风力季节变化较大, 有的冬春季风力大, 有的夏秋季风力大, 还有的春秋季节大等。这一区风能的利用要采取综合利用的措施。否则, 需要用风力时则无风, 故在江苏有句谚语, 风能是“救穷不救急”。这不但说明了风能给人们带来的好处, 也包含有风能的不稳定性及季节利用的内容。这一区风能密度在 50—150 瓦/米²之间, ≥ 3 米/秒的风速有 1500—5000 小时。这一区分布较广, 包括长江、黄河中下游, 东北、华北和西北除 II 区以外的地区和青藏高原东部等地带。

IV 区: 风能资源贫乏区 包括云贵川大部, 甘肃、陕西南部, 河南、湖南南部, 福建、广东、广西的内陆山区以及塔里木盆地和雅鲁藏布江河谷地区等。其有效风能密度在 50 瓦/米²以下, ≥ 3 米/秒风速在 1500 小时以下。这一区尤以四川盆地和西双版纳的风能最小, 其风能密度每平方米只有十几瓦, ≥ 3 米/秒风速仅为 300 小时。所以这一地区除高山顶和峡谷外, 风能潜力很低, 无利用价值。

四、风能随高度变化

在近地面层内, 空气运动受到地面的摩擦, 而使速度减小。离地面愈高, 摩擦愈小, 风速增大, 故风速一般随高度而增大。风速与高度关系为:

$$\frac{u_n}{u_1} = \left(\frac{H_n}{H_1} \right)^\alpha$$

式中 u_1 、 u_n 分别为 H_1 、 H_n 高度上的风速, α 为参数。 α 的数值, 随地面粗糙程度之不同而各异。一般海面为 0.107 (1/9.3), 空旷原野为 0.146 (1/6.9), 城镇为 0.25 (1/4)。根据我们在武汉 146 米铁塔实测三年的资料, $\alpha = 0.19$ (1/5.3), 大风时 $\alpha = 0.16$ (1/6.3)。若风力机高于 10 米, 还需要进行高度订正。

适当提高风机高度, 不但可以提高风能的捕获能力, 同时也可减小空气乱流对风机的破坏作用, 因此是值得重视的问题之一。但除小山顶上外, 高度越高造价也随着提高, 也需从经济效益上来考虑。