

论水平轴风力发电机效率

严强 蒋超奇

(上海麟风风电设备有限公司 www.sawt.com.cn, 上海, 200063)

摘要: 本文主要探讨了水平轴风力发电机效率计算中的方法缺陷, 指出了产生计算误差的理论原因。通过对某型水平轴风力发电机的效率修正, 证明了其实际效率值要比计算效率值小很多。

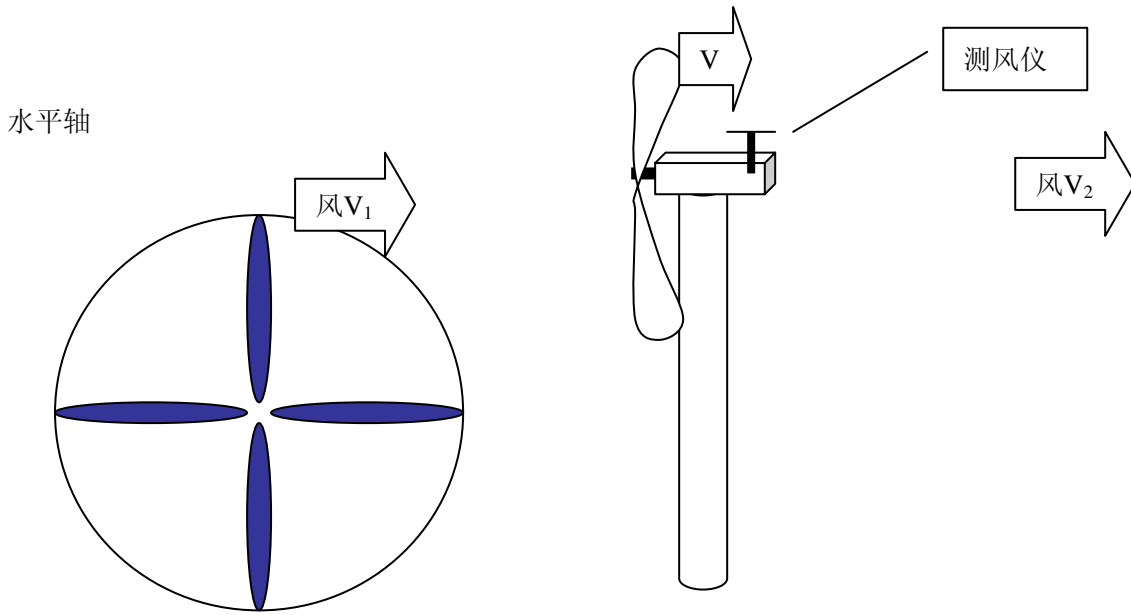


图1 水平轴风力发电机示意图

1 贝兹理论

a 名词解释

实度比: 叶片受风面积之和与风轮扫风面积之比。

尖速比: 叶尖处的线速度和风速之比。

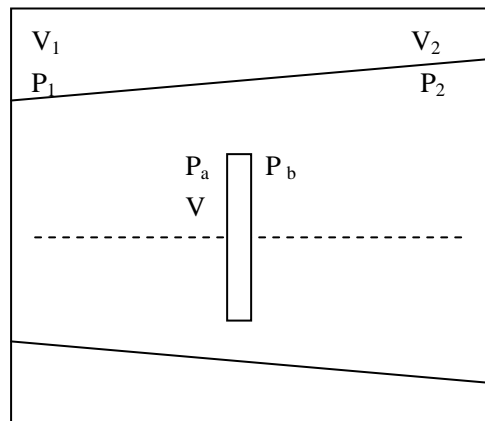


图2 贝兹理论示意图

b 假设条件:

- 1) 风轮没有锥角、倾角、偏角
- 2) 风没有粘性
- 3) 风轮流动模型可以简化为一个单元流管
- 4) 风轮前、后的气流静压相等 $P_1=P_2$
- 5) 作用在风轮上的推力是均匀的

c 计算公式

作用在风轮上的推力 T 为: $T=m(V_1-V_2)$

式中 V_1 为来流风速, V_2 为风流过风轮后无穷远处的风速, $m=\rho SV$, 是单位时间内的质量流量。

根据风轮前后的压力差, 作用在风轮上的推力可以表达成 $T=S(P_a-P_b)$, 式中 P_a 是风轮前的风压, P_b 是风流过风轮后的风压

根据伯努力方程可得:

$$1/2 \rho V_1^2 + P_1 = 1/2 \rho V^2 + P_a$$

$$1/2 \rho V_2^2 + P_2 = 1/2 \rho V^2 + P_b$$

$$V = 1/2 (V_1 + V_2)$$

令 $V = V_1(1-a)$ 则 $V_2 = V_1(1-2a)$

$V_2/V_1 = (1-2a)$ 为流过风轮后无穷远处的风速与来流风速之比,

$a = (1-V_2/V_1)/2$ 为扰流因子,

则水平轴风轮的轴功率为:

$$P = m(V_1^2/2 - V_2^2/2)$$

$$P = 2 \rho SV_1^3 a(1-a)^2$$

风轮最大轴功率发生在 $dp/da=0$ 时, 即

$$dp/da = 2 \rho SV_1^3 (1-4a+3a^2) = 0, \text{ 当}$$

$$a = 1/3 \text{ 时, 即 } (V_2/V_1 = 1/3 \text{ 时})$$

$$P_{\max} = 16/27 (0.5 \rho SV_1^3)$$

$$C_p = P / (0.5 \rho SV_1^3)$$

$$C_{p\max} = 16/27 = 0.593$$

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

(1)

$$a = (1-V_2/V_1)/2$$

当 V_2/V_1 为 $1/2$ 时, 即 $a=1/4$, $C_{p1/2} = 0.563$

当 V_2 / V_1 为 2/3 时, 即 $a=1/6$, $C_{p_{1/6}} = 0.463$

当 V_2 / V_1 为 7/10 时, 即 $a=3/20$, $C_{p_{7/10}} = 0.434$

当 V_2 / V_1 为 15/20 时, 即 $a=5/40$, $C_{p_{5/40}} = 0.383$

当 V_2 / V_1 为 8/10 时, 即 $a=1/10$, $C_{p_{8/10}} = 0.324$

当 V_2 / V_1 为 9/10 时, 即 $a=1/20$, $C_{p_{9/10}} = 0.18$

从以上计算结果得知, 风能利用率取决于扰流因子 a 值的大小, 也就是风流过风轮后无穷远处的风速差值与来流风速之比, 从能量守恒定律可以理解为风能通过风轮后, 由于风能被风轮吸收后, 风能下降导致风速由 V_1 下降到 V_2 , 如果随着流过风轮后的风速 V_2 与来流风速 V_1 比值的不断接近, 扰流因子 a 将迅速下降, 导致 C_p 值快速下降。

2 叶素理论

由于贝兹理论仅仅从质量守恒、动量定理和能量守恒出发, 推导出风力发电机的理论 C_p 值, 而叶素理论则把叶片分成许多微段(叶素), 把绕各个叶素的相对流动看作是彼此独立的二维流动。根据翼型理论, 可以求出叶片剖面的空气动力和力矩, 然后沿叶片半径积分, 再沿方位加以平均, 就能得出整个叶片的气动力和力矩。叶素理论的不足之处是忽略了各叶素之间的相互干扰。由于叶素理论不仅考虑到轴向扰流对风速的影响, 也考虑到梢部损失, 因此计算的结果比贝兹理论要精确。

但由于应用叶素理论设计水平轴风机的方法本身的缺陷, 计算过程中无法将叶片在旋转过程中的风阻考虑在内, 虽然气动阻力对水平轴风机翼型设计的影响较小, 但对风轮的风能转换效率 C_p 值的影响很大, 因此用叶素理论的计算方法较适合于叶片设计和计算, 而不适合直接用于水平轴风力发电机风能利用率 C_p 值的计算, 如果用叶素理论的方法直接计算水平轴风力发电机的风能利用率, 就必须对计算结果进行修正。

事实上在水平轴风力发电机中, 由于要获得较高的尖速比, 叶片的实度都选择的较小, 尤其在叶尖部分被设计的很窄, 结果叶片接触到的风能很少, 而且扫过叶片的能量中, 很大一部分还产生轴向推力使叶片产生弯曲, 因此风能转换成机械能的更少, 这是水平轴风力发电机效率较低的原因。以下是水平轴风力发电机设计中应用叶素理论常用的两种方法。

Glauert 方法在忽略叶片阻力和叶梢损失对水平轴风力发电机 C_p 值的影响条件下推导出能量方程式和 C_p 计算公式:

$$b(1+b) \lambda^2 = a(1-a)$$

$$C_p = 8 / \lambda_0^2 \int_0^{\lambda_0} b(1-a) \lambda^3 d\lambda = 2b(1-a) \lambda_0^2$$

其中 a 为轴向扰流因子, b 为切向扰流因子, λ 为尖速比。

为了修正 Glauert 方法中叶梢损失的影响, 在 Wilson 方法中考虑叶梢损失, 但仍忽略叶片阻力的条件下

得出能量方程和 C_p 计算公式:

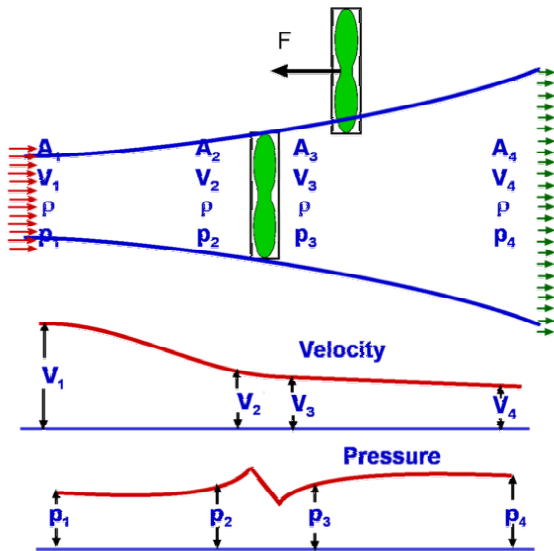
$$a(1-aF)=b(1+b)\lambda^2, \text{ 其中 } F \text{ 为叶梢损失系数}$$

$$dC_p = \left\{ \frac{8}{\lambda_0^2} b(1-a)F \lambda^3 d\lambda \right\}, \text{ } dC_p \text{ 为不同截面处的风能利用系数。}$$

目前世界上大多数用 Wilson 方法设计水平轴风力发电机的叶片和计算风能利用率。

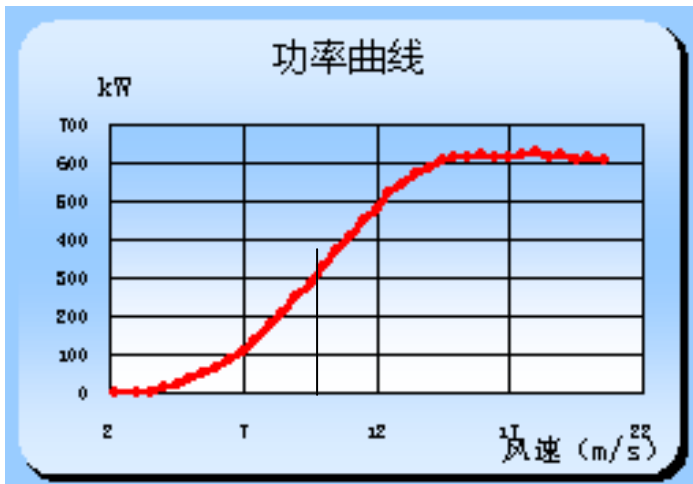
3 C_p 值修正

图 4 为金风科技 S43/600 型, 600 千瓦风力发电机的风/功率曲线, 由于水平轴风力发电机测得的风速为机舱尾部的风速, 风力发电机在运行过程中, 其计算机根据该风速及相对应的输出功率进行动态采样, 自动绘制该风机的风/功率曲线, 机舱尾部 5 米处测得的风速即不是 V_2 更不是 V_1 值, 是比 V 值小, 但可近似为 V 值, 根据 C_p 的定义: $C_p = p / (0.5 * \rho * S * v^3)$, 在理论计算中 v 是来流风速 V_1 , 而在计算机实际采样中, v 是测风仪测得的风速 V , 而 V 小于 V_1 , 因此要对 C_p 值进行修正。



左图为风扫过风轮后实际的风速、风压情况。
 V_1 为来流风速, V_2 和 V_3 是风轮前、后的风速,
 近似贝茨理论中的 V , V_4 是无穷远的风速, 为
 贝茨理论中的风速 V_2

图 3 气流扫过风轮后风速, 风压分布曲线



该风机的迎风面积为 1466 m^2 , 从计算机动态采样绘制的功率曲线得知, 在测风仪测得的风速为 9.5 m/s 时, 输出功率达到 300 kW , 计算其 C_p 值为 39%

图 4 金风科技 S43/600 型风力发电机计算机采样生成的风速-功率曲线

根据 300 千瓦时, 风速仪测得的风速 9.5 米计算, 对应的Cp值为 39%, 由于风机需要先从风能转换到机械能, 再从机械能转变到电能过程中的损耗, 按照目前公认的损耗经验值为 30%, 即效率为 0.7, 因此该风机的理论Cp值为 $0.39/0.7=55.7\%$, 根据贝兹理论, 当风力发电机的理论Cp值为 55.7%时, 通过公式 (1) 计算出 $a=0.242$, 因此 $V_1=V/(1-a)=9.5/(1-0.24)=12.53$ 米/秒, 即通过修正后的来流风速为 12.53 米/秒, 然后根据功率曲线得到修正后的Cp值为 16.97%, Cp值经过一次修正后下降 67%, 显然Cp值被大大的高估了。

现以第一次修正后的Cp值 16.97%估算, 则理论Cp值为 $0.1697/0.7=24.2\%$, 根据贝兹理论, 当风力发电机的理论Cp值为 24.2%时, 通过公式 (1) 计算出 $a=0.0698$, 因此 $V_1=V/(1-a)=9.5/(1-0.0698)=10.2$ 米/秒, 即通过修正后的来流风速为 10.2 米/秒, 然后根据功率曲线得到第二次修正后的Cp值为 31.4%, 高于第一次的修正值。

现以第二次修正后风机的Cp 31.4%估算, 则理论Cp值为 $0.314/0.7=44.86\%$, 根据贝兹理论, 当风力发电机的理论Cp值为 44.86%时, 通过公式 (1) 计算出 $a=0.1575$, 因此 $V_1=V/(1-a)=9.5/(1-0.1575)=11.28$ 米/秒, 即通过修正后的来流风速为 11.28 米/秒, 然后根据功率曲线得到第三次修正后的Cp值为 23.3%, 低于第二次的修正值。

修正次数	修正 a 值	修正风速	修正 cp 值
0	0.000000	0.000000	0.3900000
1	0.2420000	12.53298	0.1697141
2	0.6980000	10.21286	0.3136458
3	0.1575000	11.27596	0.2330344
4	0.1032000	10.59322	0.2810588
5	0.1333000	10.96112	0.2536978
6	0.1155000	10.74053	0.2696522
7	0.1257000	10.86584	0.2604305
8	0.1198000	10.79300	0.2657385
9	0.1231000	10.83362	0.2627608
10	0.1212000	10.81020	0.2644725
11	0.1223000	10.82374	0.2634806
12	0.1217000	10.81635	0.2640213
13	0.1220000	10.82005	0.2637509
14	0.1219000	10.81881	0.2638410

通过多次修正, S43/600 的实际Cp值近似于 26.4%, 但由于在修正过程中假设风轮后测得的风速近似为V, 而贝兹理论中的V值是风轮前的风速, 比风轮后测量的风速要高, 因此风力发电机实际的Cp值比修正后的Cp值还要小一些。例如假设风轮后测得的风速是V值的 90%, 用上述方法重新修正, V_1 值最终被修正为 11.62 米/秒, 则最终Cp被修正为 21.3%。

之所以修正后的 Cp 值远小于理论计算值, 是由于在应用叶素理论进行计算时的假设条件与实际情况有很大差异, 尤其是忽略空气阻力对 Cp 值的影响, 因此叶素理论更适合设计水平轴风力发电机的叶片, 而不适合直接用于计算风力发电机的风能利用率。

另外，关于水平轴变桨距风力发电机的效率问题，变桨距的目的是为了在任何风速下保持最大 C_p 值，提高不同风速下的平均 C_p 值，而不是提高 C_p 的极限值，因此变桨距和定桨距的风-功率曲线必定在 C_p 值最大处相交。

参考文献：

- [1]. 熊礼俭. 风力发电新技术与发电工程设计、运行维护及标准规范实用手册. 中国科技文化出版社
- [2]. 蔡纯，张秋生. 风力发电机组功率曲线的修正. 广东电力，2003 年 2 月 ， 第 16 卷， 第 1 期