

Study and Application of the High-Altitude Wind Power

Zhenglin Zhu, Xiaolong Bi, Rui Xue

College of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China

zljhu@njit.edu.cn

Abstract: As the winds up at high altitudes are surprisingly strong and steady, the feasibility that the high-altitude wind power can be used to generate electricity is mainly talked about. Based on the theoretical calculations and force analysis of the wind powered generator, a gliding flight model of the high-altitude wind powered generator is produced, and the force required to maintain the flight is about 2% of the total of the lift force and gross weight of the high-altitude wind powered generator. On the other hand, the high-altitude wind powered generator is small in size, light in weight and high efficiency.

Keywords: wind energy; high-altitude wind power; wind powered generator; model; study and application

高空风能应用技术研究与应用

朱正林, 毕小龙, 薛 锐

南京工程学院, 南京, 中国, 211167

zljhu@njit.edu.cn

摘 要: 针对高空气流持续、恒定、强劲、风向稳定的特点, 本文研究了高空风能能够为我们人类所利用的可能性。在对风力发电机的叶片进行了理论计算和受力分析基础上, 提出一个能够在高空悬浮飞行的滑翔式风力发电机模型, 并计算出维持飞行所需的力为风力发电机产生的升力和自重之和的 2%, 具有体积小、重量轻、效率高的优点, 因而具有很好的实用性。

关键词: 风能; 高空风力发电; 风力发电机; 模型; 研究应用

1 引言

风能是一种洁净可再生能源, 储量丰富, 由于条件限制绝大部分局限于近地风能的开发和利用。伴随着风能技术的不断进步, 风能的应用范围也从传统的陆地延伸到海上, 而且已经投入商业运行。另一方面, 高空空气流场均匀, 风速相对恒定, 风向稳定, 而且气流风力既强劲又持久, 据研究表明发电效率可达 85% 以上, 比地面风力发电机高出 3 倍^[1], 这又给人类新能源的应用又提供了广阔前景。虽然高空风能无限, 如何利用成为首先要解决的问题; 如果采用传统近地风能的应用技术开发高空风能, 那么单位功率投入惊人, 而且占地广, 对环境造成很大的破坏。

根据高空风能的特点, 充分利用高空气流的性能, 采用悬浮于空气中的飞行技术, 使风力发电机停留在高空, 产生的电能通过电缆输送到地面, 为高空风能的开发提供帮助。

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目(06KJD470078)

2 高空风能资源无限

2.1 高空风能的分布与计算

通常将不同高度的大气层分为摩擦层(1000 米以下)、自由大气(1000 米以上)两个区域。虽然在地面的风速比较低, 但是随着海拔高度的增加, 在自由大气层的风速将达到每小时数百公里。风速与海拔高度的关系可以用以下的指数公式^[2]来表示:

$$v_n = v_l (H_n / H_l)^{\alpha} \quad (1)$$

式中: H_l 、 H_n 为海拔高度, m; v_n 为高度 H_n 处的风速, m; v_l 为高度 H_l 处的风速; α 为风速随着高度的变化关系, 常取 $\alpha = 0.142$ 。

对式(1)进行变换, 可以得到海拔高度与风速的关系, 如下所示:

$$H_n = H_l (v_n / v_l)^{1/\alpha} \quad (2)$$

根据公式(2), 可以求得在几个典型的风速倍数 β ($\beta = v_n / v_l$) 下相应的海拔高度倍数 θ ($\theta = H_n / H_l$) 的关系, 如表 1 所示。

Table 1. Variation of the velocity, altitude and energy

表 1. 风速倍数 β 与海拔高度倍数 θ 、能量倍数 e 的关系

序号	风速倍数 β ($\beta=v_n/v_1$)	海拔高度倍数 θ ($\theta=H_n/H_1$)	能量倍数 e ($e=W_n/W_1$)
1	1.5	17.4	3.375
2	2.0	131.8	8
3	2.5	634.5	15.625
4	3.0	2290.9	27

由表 1 可见, 如果要使风速增加到 2 倍, 即 $v_n=2v_1$ 时, 那么海拔高度 H_n 为所对应的参考基础高度的 131.8 倍, 即 $H_n=131.8H_1$ 。因而, 要想获得很大的风能, 就必须使风力发电机安装到很高的位置, 这种传统近地风能的应用技术成本必然很高, 其它不可控风险也相应增加。因而采用高空悬浮技术使风力发电机悬浮在高空发电是一种可行的方法。

2.2 高空风能的计算

风能的利用主要就是将空气的动能转换为我们能够利用的能量形式, 如机械能、电能等。风能的大小一般可以按照如下公式计算:

$$W = \rho A v^3 / 2 \quad (3)$$

式中: W 为风能大小, W ; ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; A 表示单位时间内流过垂直于风速的横截面积, m^2 ; v 表示风速, m/s 。

由于风能的大小与速度的 3 次方成正比, 同样可以求得在几个典型的风速倍数 β ($\beta=v_n/v_1$) 下相应的能量倍数 e , 即风速为 v_n 时对应的风能 W_n 与风速为 v_1 时对应的风能 W_1 之比, 也列于表 1 中。

对式 (3) 式进行变换得:

$$A = 2W / (\rho v^3) \quad (4)$$

由式 (4) 可知: 在风能 W 不变的条件下, 单位时间内流过垂直于风速的横截面积与风速的三次方成反比, 如当风速倍数为 2 时, 获得相同的功率所需的面积 A 仅为 1/8, 因而可以减小风力发电机的体积和重量, 尤其是叶片的长度变为 $1/(2\sqrt{2})$ 倍。

3 高空风力发电机的受力及可行性分析

3.1 高空风力发电机叶片受力分析

3.1.1 风力发电机叶片受力分析

风力发电机的叶片在运行时受到的力可解以分为两个: 一个垂直于气流速度的升力 F_L , 另一个是平行

于气流速度的阻力 F_D , 叶片剖面形状和受力状况如图 1 所示。 F_L 和 F_D 的大小分别如下式所示:

$$F_L = \rho C_L A v^2 / 2 \quad (5)$$

$$F_D = \rho C_D A v^2 / 2 \quad (6)$$

式中: ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; C_L 和 C_D 分别表示翼型的升力系数和阻力系数; A 表示面积, m^2 ; v 表示风速, m/s 。

分析式 (5) 和 (6), 如果面积、密度、风速相同, 则升力 F_L 和阻力 F_D 的大小由翼型的升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 的大小所决定, 即升阻比:

$$\lambda = F_L / F_D = C_L / C_D \quad (7)$$

根据实验室测试和实践过程的经验, 升阻比 λ 的大小的主要影响因素之一是叶片翼型: 对于平板型叶片, $\lambda=10$; 对于扭曲型叶片 $\lambda=50\sim100$, 其它翼型 λ 在以上二者之间^[3]。总体来讲, 阻力 F_D 相对升力 F_L 来讲是非常小的。

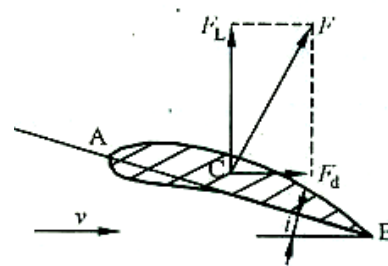


Figure 1. Force analytical graph of the blade
图 1. 风力发电机叶片受力分析图

3.1.2 高空风力发电机整体受力分析

在高空中的风力发电机稳定运行时主要有以下几个力的作用: 叶片升力 F_L 、叶片阻力 F_L/λ (如果采用多组叶片, 总阻力以 $(\sum F_L)/\lambda$ 表示)、自身重量 G 等。由于叶片升力产生的力矩和发电机阻力矩平衡, 因而高空风力发电机整体受力对外表现为:

- 总阻力以 F_g 表示: 为所有叶片的阻力之和 $(\sum F_L)/\lambda$ 以及其它部位产生的阻力;
- 总重量用 G_0 表示: 自身重量 G 以及附加的其它部件产生的重力。

由以上的受力分析可知, 要使风力发电机在空中悬浮运行, 必须克服以下两个力的作用: 阻力 F_g 和自身重量 G_0 ; 对于现代大型风力发电机而言, 叶片大多采用扭曲型叶片, 升阻比 $\lambda=50\sim100$, 阻力相对升力来讲很小, 因此平衡自身总重量所需的力是讨论的重点, 总的受力情况如图 2 所示。

3.2 高空风力发电机可行性分析

3.2.1 高空悬浮的方法

通过对高空风力发电机的受力分析, 克服自重是解决问题的关键所在。克服重力的方法较多, 根据目前在工业中使用的技术, 能够让风力发电机在高空运行的基本途径有两种方式: 第一种方式是采用常见的风力发电机的塔架支撑方式, 这种方式因其高度有限, 满足不了高空的风能捕捉要求; 第二种方式是采用风力发电机在空中悬浮或者飞行方式, 这种方式理论上可以使风力发电机停留在任意高度, 能够满足风能的捕捉要求, 因而空中悬浮或者飞行是较好的选择。

3.2.2 悬浮可行性分析

通过工程实际和实验相结合, 风力发电机悬浮在高空是可能的。通过试验证明, 利用滑翔的飞行原理可以满足要求, 如图 2 所示。

这种“滑翔式风力发电机”前后可以装有两组叶片, 能够有效提高风能的利用效率, 而且使风力发电机得到很好的平衡。克服自身重量的方法是: 在风力发电机平衡点两侧各安装一个水平机翼型叶片, 利用其产生的升力来支持风力发电机的自重, 如图 2 所示; 这样产生的升力的大小可以根据风力发电机的重量来确定机翼型叶片面积大小和调整功角的大小, 以达到悬浮的目的。

而阻力的平衡可以通过两种方式来平衡。第一种方法是借助电力传输线来完成。因为风力发电机产生的电能要通过电力线输送到地面, 如果电力线的强度足够, 可以作为牵引线来平衡风力发电机, 类似于风筝。另外也可以在风力发电机的尾部或头部安装一个推进器来平衡阻力。这样, 重力和阻力平衡后风力发电机就可以平稳地在高空运行, 因其工作原理类似于滑翔飞机, 故而称之为“滑翔式风力发电机”。

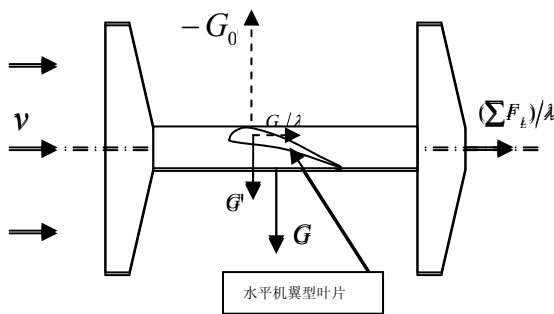


Figure 2. Force analytical graph of the wind Generator
图 2. 风力发电机受力分析图

3.2.3 “滑翔式风力发电机”悬浮受力分析

图 2 所示为“滑翔式风力发电机”受力情况。由

于增加了水平机翼型叶片, 那么风力发电机的总重力 G_0 为风力发电机的重量 G 与水平机翼型叶片的重量 G' 之和, 即:

$$G_0 = G + G' \quad (8)$$

水平机翼型叶片也会产生飞行阻力 F' , 则空中悬浮的风力发电机总飞行阻力 F_g 为 F' 与叶片阻力 $(\Sigma F_L) / \lambda$ 之和, 即:

$$F_g = (\Sigma F_L) / \lambda + F' \quad (9)$$

由于水平机翼型叶片不产生旋转运动, 和风力发电机叶片受力分析一样, 可以简化为静止风力发电机叶片, 一般情况下采用扭曲型叶片, 则 $F' = G_0 / \lambda$, 带入式(9)可得:

$$F_g = (\Sigma F_L) / \lambda + G_0 / \lambda = (\Sigma F_L + G_0) / \lambda \quad (10)$$

采用扭曲型叶片时 $\lambda = 50 \sim 100$, 总飞行阻力 F_g 就会很小, 克服阻力所需能量也就会很小, 为了维持飞行所需的力不超过风力发电机产生的升力和自重之和的 2%; 而悬浮所需动力由水平机翼型叶片来产生, 无需消耗动力。随着材料科技的不断进步, 可以采用满足材料特性的新型轻质材料, 可以进一步降低风力发电机的重量 G_0 , 从而进一步减小总飞行阻力 F_g 。如果采用推进器来平衡阻力, 整个风力发电机就像飞机在高空飞行, 只不过它没有飞行速度。

3.2.4 滑翔式风力发电机的功率及效率分析

单级叶片的风力发电机功率的计算公式如下:

$$W_s = F_L \times u_m \quad (11)$$

式中: W_s 表示功率, W; u_m 表示叶片平均速度, m/s。

式 (5) 带入式 (11) 可得:

$$W_s = \rho C_L A v^2 u_m / 2 = \rho C_L A v^2 \pi d_m n / 120 \quad (12)$$

式中: d_m 表示叶片平均直径, m; n 表示转速, r/min。

由式 (12) 可见, 风力发电机功率的大小与叶片的转速成正比, 因而可以利用高空风能的气流平稳高速的特点, 通过提高叶片转速 n 来降低叶片的平均直径 d_m , 进一步减小风力发电机的重量和阻力, 提高效率。

根据贝茨理论^[3], 风能理论最大利用率为 $\eta_{max} = 0.593$ 。但是根据实验室风动试验, 在平稳高速的气流状态下, 风力发电机的效率可以达到 75%; 据相关资料这种高空风力发电效率可达 85% 以上, 比地面风力发电机高出 3 倍^[1]。总之, 高空风力发电机的效率可以大大提高, 为高空风力发电机的实现提供了有力的条件。

4 采用高空风力发电机的优点

经过以上分析，可以归纳出采用高空风力发电机的优点：

- 气流平稳，输出电能的质量大大提高，叶轮效率高；
- 气流速度大，在输出功率相同的情况下，可以使风力发电机的体积和重量大大降低；
- 可以采用高转速发电机，减小叶片长度，也可以克服低转速风力发电机的缺点；
- 可以采用两组或者多组叶片；
- 不受地面环境的限制，对环境的影响较小。

4 结语

由于高空气流的特殊性，使用高空风能的应用已经成为可能近。虽然这种“滑翔式风力发电机”还有一些问题需要解决，但比文献^[1]中提到的风力发电机节省克服自身重量的所消耗的能量要小。由于人类的科技进步、能源短缺、环境意识不断增强，高空风力发电机研究和应用必然会得到广泛重视。

References (参考文献)

- [1] Roberts,B.W., Shepard,D.H., Caldeira, K., Cannon, M.E., Eccles, D.G., Grenier, A.J., Harnessing High-Altitude Wind Power[J], *Energy Conversion*,2007,22(1),P136-144.
- [2] WANG Chengxi ZHANG Yuan. Wind power generate electricity[M]. Beijing: China Electric Power Prees,2003.
王承熙，张源，风力发电[M]，北京：中国电力出版社，2003.
- [3] SU Shaoyu, Design and Maintenance of the wind powered generator[M]. Beijing: China Electric Power Prees,2003.
苏绍禹，风力发电机设计与运行维护[M]。北京：中国电力出版社，2003.
- [4] WANG Zhenguo CHEN Xiaoqian LUO Wencai ZHANG Weihua. Research on the Theory and Application of Multidisciplinary Design Optimization of Flight Vehicles[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2006.
王振国，陈小前，罗文彩，张为华，飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]，北京：国防工业出版社，2006.
- [5] Liao Caicai, Xu Jianzhong, Xi Guang. Using an Improved PSO Algorithm in the Wind Turbine Blades Optimization Design[J], *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008,29(5) ,P773-776.
廖猜猜，徐建中，席光，基于一种改进的PSO算法在风力机叶片优化中的应用[J]，*工程热物理学报*，2008，29(5)，P773-776.