

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.019

基于计算流体动力学的 S 型风力机性能分析

徐小韵,郑 源,赵振宙,刘文明

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:以单位宽度功率为指标,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及 SIMPLE 算法,研究叶片高度对 S 型风力机性能的影响.从等过风面积和等直径 2 种工况出发,选取 4 个不同系列的高径比 α ,对风力机进行三维数值模拟.模拟结果与根据 $L-\sigma$ 准则提出的从增加叶片高度来提高风力机单位宽度功率的可行方案吻合.同时得出,当 $\alpha = 6$ 时,风力机性能最优.

关键词:S 型风力机;计算流体动力学;单位宽度功率;高径比;风能利用系数

中图分类号:TM614;TK8 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)03-0332-05

Savonius 风力机是典型的阻力型垂直轴风力机,由芬兰萨沃纽斯(Savonius)于 20 世纪 30 年代发明^[1],两半圆叶片交错成 S 形,简称为 S 型风力机. S 型风力机因转速较低,风能利用系数($C_p \approx 0.15$)低于水平轴风力机($C_p \approx 0.45$)和达里厄垂直轴风力机($C_p \approx 0.35$)而发展缓慢^[2-3].但 S 型风力机具有结构简单、造价便宜、维修及安装方便、无需调风装置和启动力矩大等优点^[4-6],因此近年来诸多学者主要从叶片个数、偏心距、上下盖板几个方面^[7-9]对其进行研究,以提高其风能利用系数.

此外,关于风力机叶片几何尺寸(包括叶片直径 d 、旋转直径 D 、叶片高度 H)的研究主要集中在原模型的对比实验上,而对于高度直径比研究甚少.如,最初 Savonius^[1]通过对比 30 多种叶片几何尺寸,在风洞和自然风下进行风力机的模型和原型测试,得出相同风速下,风力机在自然风中转速更高的结果.随后, Bach^[10]对 S 型风力机也进行了相关研究,所得最高风能利用率为 0.24. Newman^[11]在改变叶片几何尺寸进行风力机性能对比实验和数值计算时,发现风洞对测试结果有一定的干扰,风力机原型的性能与模型测试结果存在偏差,得到的最高风能利用率为 0.20.

Menet 等^[12-13]的研究表明,增加叶片高度可以提高 S 型风力机的单位宽度功率,对改善风力机的性能有一定的影响.因此,本文以单位宽度功率为指标,探讨了高度对 S 型风力机性能的影响规律,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术对风力机进行数值模拟,分析了在等过风面积和等直径 2 种工况下叶片高度对单位宽度功率的影响.

1 风能理论与 $L-\sigma$ 准则

1.1 风能理论

风能利用系数 C_p 为风力机输出功率与风能的比值:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho Sc^3} \tag{1}$$

其中

$$P = \omega M$$

$$S = H(2d - e) = HD$$

式中: P ——风力机输出功率, W; S ——风力机过风面积, m^2 ; ρ ——空气密度,通常取 1.25 kg/m^3 ; c ——风速, m/s ; ω ——叶片角速度, r/min ; M ——力矩, $N\cdot m$; e ——偏心距, m ; d ——叶片直径, m ; D ——风力机旋转直径, m ; H ——叶片高度, m .

尖速比 λ 为叶片线速度与来流风速的比值:

收稿日期:2009-05-15

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2006BAA01A27-3);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AA05Z429)

作者简介:徐小韵(1985—),女,江苏无锡人,硕士研究生,主要从事垂直轴风力发电技术研究. E-mail: xuxiaoyun19850904@163.com

$$\lambda = \frac{\omega R}{c} \tag{2}$$

式中 R 为风力机旋转半径 m .
力矩系数 C_m 为

$$C_m = \frac{M}{0.25\rho DSc^2} \tag{3}$$

1.2 $L\text{-}\sigma$ 准则

$L\text{-}\sigma$ 准则^[12-13]是相同机械应力下水平轴与垂直轴风力机单位宽度功率的比较准则,其中, L 为过风面积的宽度,即风力机的旋转直径 D , σ 为叶片的机械应力.该准则提出了单位宽度功率的概念(即风力机垂直于迎风面单位宽度上的功率),指出风力机在考虑叶片所受机械应力时,相比其他高转速的风力机,S 型风力机单位宽度功率更大.单位宽度功率为

$$P_{L,H} = C_{p\max}\rho \frac{\pi}{2} R \frac{c^3}{2} = \frac{1}{8} C_{p\max}\rho\pi Dc^3 \tag{4}$$

$$P_H = P_{L,H}L = \frac{1}{8} C_{p\max}\rho\pi D^2c^3 \tag{5}$$

$$P_{L,V} = C_{p\max}\rho H \frac{c^3}{2} \tag{6}$$

$$P_V = P_{L,V}L = C_{p\max}\rho (DH) \frac{c^3}{2} = C_{p\max}\rho [(2d - e)H] \frac{c^3}{2} \tag{7}$$

式中: P_H 、 $P_{L,H}$ ——水平轴功率和单位宽度功率; P_V 、 $P_{L,V}$ ——垂直轴功率和单位宽度功率; $C_{p\max}$ ——理论上风力机能达到的最大风能利用系数.从式(5)和式(7)可看出, P_H 仅与 D 有关,而 P_V 还与 H 有关.同时,在偏心距 e 一定时, P_V 由叶片直径 d 和叶片高度 H 共同决定.因此,叶片高度与直径之比 α (简称高径比)对 S 型风力机单位宽度功率及风能利用系数有影响.

2 数值优化

2.1 数学模型

Saha 等^[14]通过实验证明, $k\text{-}\epsilon$ 双方程模型适用于 S 型风力机流场的研究.因此,采用标准 $k\text{-}\epsilon$ 湍流模型对叶片周围流场进行模拟,湍动能 k 和湍动能耗散速度 ϵ 的模型方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon_3} G_b) - C_{\epsilon_2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{9}$$

式中: G_k ——由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b ——由于浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M ——可压湍流中脉动扩张的贡献; C_{ϵ_1} 、 C_{ϵ_2} 、 C_{ϵ_3} ——经验常数; σ_k 、 σ_ϵ ——与湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数; S_k 、 S_ϵ ——用户定义的源项.

流体材料设为理想气体,求解基于 Reynolds 平均的 N-S 不可压无黏方程^[15]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \tag{10}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \tag{11}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \tag{12}$$

式中: ρ ——密度; p ——流体微元体上的压力; μ ——动力黏度; $\mathbf{u}$ ——速度矢量; S_u 、 S_v 、 S_w ——动量方程的广义源项.

2.2 风力机模型及网格划分

风力机由 2 个叶片组成,如图 1(a)所示.叶片直径 $d = 1.8 \text{ m}$,厚度 2 mm ,偏心距 $e = 0.3d$.采用 Gambit 软件建立三维模型,网格类型为 TGrid,如图 1(b)所示.计算过程中,采用区域加密方法对叶片区域流场网格进一步加密,网格总数超过 200 万.

2.3 计算方法及边界条件

采用 SIMPLE 算法求解压力耦合方程,二阶迎风离散格式^[16],收敛残差标准为 10^{-5} .如图 1(b)所示,进口(区域 1)采用速度边界条件,风速设为 9 m/s ,出口(区域 2)采用自由扩展边界条件,叶片区域流体为旋转流体,叶片采用相对旋转固体壁面边界条件.

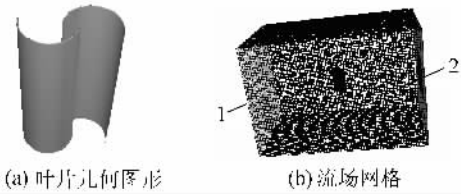


图 1 S 型风力机结构

Fig. 1 Structure of Savonius rotor

3.1 等过风面积下不同高径比的对比

图 2 显示了等过风面积工况下不同高径比 α 对风力机性能的影响. P 和 P_L 随 α 的变化规律如图 2(a)所示.由 $L\text{-}\sigma$ 准则可得,增加叶片高度可以提高单位宽度功率,在相同过风面积下,单位宽度功率随高径比的增加而增加,但叶片直径减小;当单位宽度功率增加速度大于叶片直径减小速度时,风力机的输出功率增加.因此,在高径比 $1\sim 6$ 范围内, P 和 P_L 随 α 的增加而增加.

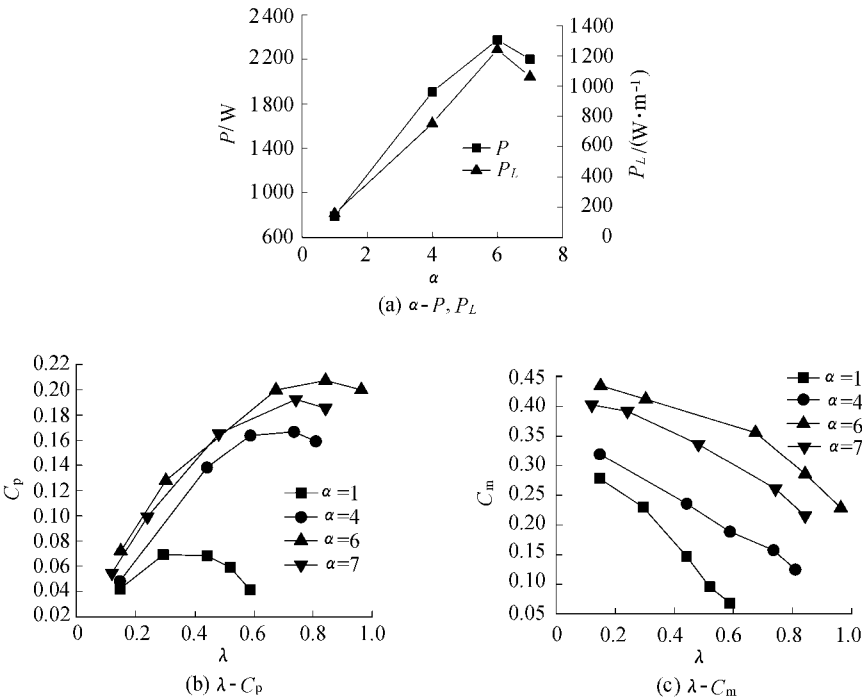


图 2 等过风面积下不同高径比对 S 型叶片的影响

Fig. 2 Influence of different height-diameter ratios on Savonius rotor in same wind area

当高径比继续增加,叶片半圆直径过小,气流急速转弯易造成旋涡或脱离,引起有效功的损失,如图 3 所示.

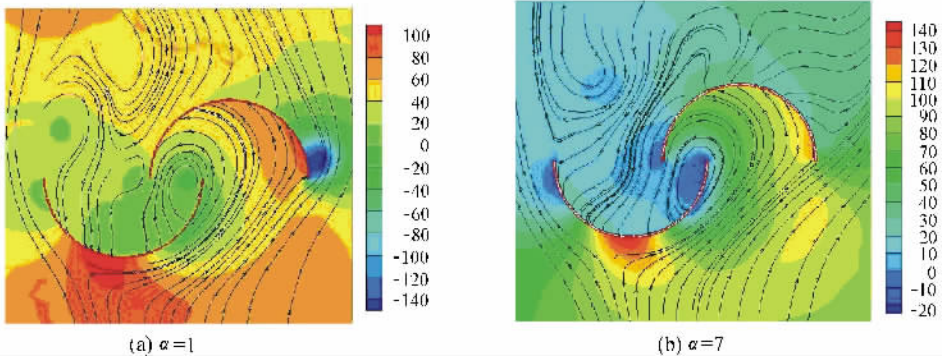


图 3 等过风面积下叶片的压力云图(单位:Pa)

Fig. 3 Pressure nephograms for blades in same wind area (units: Pa)

因此,当 $\alpha > 6$ 时, P 和 P_L 随 α 的增加而减小;当 $\alpha = 6$ 时, P 和 P_L 有最大值,分别为 2 371.16 W 和 1 241.45 W/m. 因此,在等过风面积工况下,单位宽度功率和总功率随高度增加而先上升后减小, $\alpha = 6$ 为该工况下的最佳高径比.

同时,在过风面积相同时,风能利用系数与风力机输出的功率成正比,因此,在 $\alpha = 6$ 时, C_p 有最大值 0.2,如图 2(b)所示.此外,由图 2(c)可知,在尖速比 0~1 范围内,力矩系数在 $\alpha = 6$ 时最大.

3.2 等叶片直径下不同叶片高度的对比

在保持叶片直径不变的条件下,分别取 $\alpha = 1, 4, 6, 7$,比较叶片高度对单位宽度功率的影响,计算结果如表 1 所示.当叶片直径不变时,增加叶片高度可以提高单位宽度功率,从而增加输出的总功率,但过风面积也随叶片高度增加而增加;当功率的增加速度大于过风面积的增加速度,即单位宽度功率的增加速度大于叶片高度的增加速度时,风能利用系数上升.从表 1 可看出, P_L 的变化规律与等过风面积工况下类似.随叶片高度增加, P_L 先增大后减小,在 $\alpha = 6$ 时,即叶片高度为 10.8 m 时, P_L 有最大值 560.96 W/m.

从表 1 可看出,当 $\alpha = 6$ 时,风力机性能最佳,风能利用系数 C_p 有最大值 0.20,力矩系数 C_m 达 0.27,两者变化趋势相近.

4 结 语

采用计算流体动力学技术,通过增加叶片高度来提高单位宽度功率的方法,分析了叶片高度对风力机性能的影响.等过风面积工况下,侧重模拟叶片高度与直径之比对单位宽度功率和总功率的影响;等叶片直径工况下,主要计算叶片高度对单位宽度功率增加速度的影响.在所取的 4 个高径比系列中, S 型风力机在 $\alpha = 6$ 时单位宽度功率达到最大值,与 Menet 提出的从增加高度来提高单位宽度功率的可行方案吻合;当 $\alpha = 6$ 时,风力机的风能利用系数最大,表明增加叶片高度对风力机的性能起到一定的改善作用.

参考文献:

[1] SAVONIUS S J. The S-rotor and its application[J]. Mechanical Engineering, 1931, 53(5): 333-338.

[2] TWIDWELL J W, WEIR A D. Renewable energy resources[M]. Cambridge, Britain: The University Press Cambridge, 1985: 411.

[3] ELDRIDGE F R. Wind machines[M]. New York: Van Nostrand, 1980: 214.

[4] 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[M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2006.

[5] 张国铭. 论制造兆瓦级垂直轴风力发电机的合理性[J]. 风力发电, 2001, 9(4): 25-29. (ZHANG Guo-ming. Rationality of generator manufacturing on the megawatt level vertical axis windgenerator[J]. Wind Power, 2001, 9(4): 25-29. (in Chinese))

[6] 孙云峰, 田德. 垂直轴风力发电机的发展概况及趋势[J]. 农村牧区机械化, 2008, 10(2): 42-44. (SUN Yun-feng, TIAN De. Trends and development overview of vertical axis wind turbine[J]. Mechanization in Rural & Pastoral Areas, 2008, 10(2): 42-44. (in Chinese))

[7] SHELDAHL R E, FELTZ L V, BLACKWELL B F. Wind tunnel performance data for two and three bucket Savonius rotor[J]. Journal of Energy, 1987, 12(3): 160-164.

[8] MODI V J, FERNANDO M S U K. On the performance of the Savonius wind turbine[J]. Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME, 1989, 111(5): 71-81.

[9] MOJOLA O O, ONAZANYA O E. Performance testing of a Savonius windmill rotor in shear flow[J]. Wind Engineering, 1984, 8(2): 109-121.

[10] BACH G. Investigation concerning Savonius rotors and related machines[M]. Quebec, Canada: Brace Research Institute Press, 1931.

[11] NEWMAN B G. Measurement on a Savonius rotor with variable gap[R]. Sherbrook, Canada: Sherbrook University, 1994: 116-118.

[12] MENET J L, VALDES L C, MENART B. A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the $L\text{-}\sigma$ criterion[J]. Renewable Energy, 2001, 22(4): 491-506.

[13] MENET J L, MENART B. Une procédure de comparaison de quelques éoliennes classiques basée sur l'utilisation du critère $L\text{-}\sigma$ [C]// Nancy In Proceedings of 15th French Mech Symp 2001. [S. l.]: XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2001: 352-358.

表 1 等叶片直径下叶片高度变化对 S 型叶片的影响

Table 1 Influence of different blade heights on Savonius rotor with same diameter of blades

H/m	$P_L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1})$	C_p	C_m
1.8	68.41	0.14	0.20
7.2	328.37	0.17	0.24
10.8	560.96	0.20	0.27
12.6	519.91	0.16	0.22

[14] SAHA U K ,RAJKUMAR M J. On the performance analysis of Savonius rotor with twister blades[J]. Renewable Energy ,2006 ,31(8) : 1776-1788.

[15] VERSTEEG H K ,MALALASEKERA W. An Introduction to computational fluid dynamics :the finite volume method[M]. New York : Wiley ,1995.

[16] PATANKER S V ,SPALDING D B. A calculation processure for heat ,mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. Int J Heat Mass Transfer ,1972 ,15(9) :1787-1806.

Evaluation of performance of Savonius rotors based on computational fluid dynamics

XU Xiao-yun , ZHENG Yuan , ZHAO Zhen-zhou , LIU Wen-ming

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The standard $k-\epsilon$ turbulent model and SIMPLE algorithm were employed to study the influence of blade height on the performance of Savonius rotors using the index of power per unit width. 3D numerical simulations of the rotors under two different conditions of the same wind area and the same blade diameter were performed by selecting four different height-diameter ratios of blades. The simulated results suport the feasible scheme of increasing of blade height in order to improve the power per unit width of rotors according to the $L-\sigma$ criterion. The capacity of the rotors is greatest when the height-diameter ratio is 6.

Key words : Savonius rotor ; computational fluid dynamics ; power per unit width ; height-diameter ratio ; utilization coefficient of wind energy

·简讯·

河海大学将举办纪念刘光文教授百年诞辰系列活动

2010年7月30日是我国著名水文学家、河海大学博士生导师刘光文教授百年诞辰。刘光文教授毕生从事水利事业的教育和科学研究工作,是我国水文学科的奠基人和河海大学水文系的创办人,也是一位享誉国内外的教育家、科学家,深受业界和河海大学广大师生的敬重和爱戴。他的一生是奋斗的一生、奉献的一生,他所作出的卓越贡献永载中国水利事业的史册。

为了缅怀刘光文教授热爱党、热爱社会主义祖国、热爱水利事业和教育事业的高尚情操,治学严谨的工作作风和刻苦钻研、严格要求、善于探索、谦虚谨慎的敬业精神,凝聚广大校友和师生力量,继承发扬光荣传统,创造出更加辉煌的业绩,河海大学将于2010年校庆期间举办纪念刘光文教授百年诞辰系列活动,主要内容如下:

- a. 召开“纪念刘光文教授诞辰100周年座谈会”。
- b. 举办刘光文教授学术思想及水文学科发展战略研讨会。
- c. 出版《刘光文教授百年诞辰纪念文集》。
- d. 发行刘光文教授纪念邮册。
- e. 设立刘光文教授生平事迹及学术成就展示室。
- f. 塑建刘光文教授铜像,举行刘光文教授铜像揭幕仪式。
- g. 设立刘光文水文科技教育基金。

“积力之所举,无不胜也;众智之所为,无不成也。”河海大学竭诚欢迎社会各界、广大校友和全校师生以各种方式给纪念刘光文教授百年诞辰系列活动关心、帮助和支持,助推纪念刘光文教授百年诞辰系列活动取得圆满成功。

(本刊编辑部供稿)