DOI: 10.3901/JME.2013.18.144

一种新型垂直轴式风机叶轮的数值仿真*

田文龙 宋保维 毛昭勇
(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 合理开发利用风能是缓解当前化石能源危机的一个重要途径。提出一种垂直轴式活动叶片风机叶轮的设计方案, 叶轮上安装多枚直板型活动叶片, 叶片在绕安装轴公转的同时绕自身安装轴自转。为探索该叶轮的工作机理, 研究其自启动性能和不同旋转速度下的发电特性, 采用滑移网格技术对叶轮进行二维定常和非定常数值流体计算, 分析其工作环境下的压力场和速度场的基本特点。计算结果表明: 该叶轮具有良好的自启动性能, 其平均静态力矩系数为 1.09; 叶轮在速比系数时获得最大功率系数 0.449, 约为 Savonius 叶轮最大功率系数的 2 倍。

关键词: 风机叶轮 活动叶片 垂直轴 滑移网格 计算流体力学

中图分类号: TK89

Numerical Simulations of Vertical Axis Wind Turbine with Controllable Blades

TIAN Wenlong SONG Baowei MAO Zhaoyong
(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Wind power gives us non-polluting alternative to reduce the exploration of conventional fossil fuels. A novel vertical axis wind turbine (VAWT) has been developed that consists of several controllable flat blades. A computational investigation of the output characteristics of the VAWT has been conducted using the commercial computational fluid dynamics (CFD) code ANSYS 13.0. A validation study was performed using a Savonius turbine and good agreement is obtained with experimental data. Both fixed and rotating two-dimensional CFD simulations are conducted to further investigate the performance of the VAWT. Steady simulations have demonstrated that the VAWT has good self-starting ability with an averaged static torque coefficient of 1.09. The predicted maximum averaged power coefficient is 0.449, which is nearly 2 times of the Savonius turbine.

Key words: Wind turbine Controllable blade Vertical axis wind turbine Sliding mesh Computational fluid dynamics

0 前言

可再生能源的开发和利用日益受到人们的重视, 其中, 风能因经济性、环保等优点成为国内外研究的热点。根据叶轮轴线与风向的相对位置, 风机叶轮可分为水平轴式叶轮^[1]和垂直轴式叶轮 (Vertical axis wind turbine, VAWT)。由于垂直轴式叶轮能够在复杂紊流下有效工作, 因此其更适合于应用在复杂地形的小型风力发电场所, 如偏远地区的农村^[2]。此外, 相比水平轴叶轮, 垂直轴式叶轮轴线与来流方向垂直, 可以捕获任何方向的风能^[3],

结构简单, 很适合小型化独立发电。

目前研究比较多的垂直轴式叶轮有 Savonius 和 Darrieus 两种。HWANG 等^[4]对 Darrieus 叶轮变桨距结构进行了运行规律和发电性能方面的研究; LAIN 等^[5]利用 CFD 技术对 Darrieus 叶轮进行了 2 维数值仿真, 研究了叶轮输出特性及叶片失速问题; LI 等^[7]考虑了 3 维影响, 通过建立涡模型, 对 Darrieus 叶轮性能进行了准确预计。AFUNGCHUI 等^[8]从理论方面对 Savonius 叶轮的 nonlinear 瞬态势流进行了研究, 并对其流体动力进行了准确预计; SAHA 等^[9]通过水洞试验对 Savonius 叶轮的结构参数进行了优化设计; SHIGETOMI 等^[10]研究了两个 Savonius 叶轮之间的干扰问题; GOLECHA 等^[11]研究了导流板对 Savonius 叶轮发电性能, MOHAMED 等^[12]对导

* 国家自然科学基金资助项目(51179159)。20121011 收到初稿, 20130410 收到修改稿

流板进行了优化设计。

Darrieus 叶轮为升力型叶轮，不能够自启动；Savonius 叶轮能够在低风速(2 m/s)下自启动，但其发电效率较低，不超过 25%^[13]。本文设计了一种新型垂直轴风机叶轮，该叶轮所安装的叶片为活动叶片，叶轮在绕安装轴旋转的同时叶片规律偏转，具有较好的自启动性能和发电效率。本文重点对叶轮进行了二维定常和非定常数值模拟，研究了叶轮的自启动性能和不同叶轮旋转速度下的发电特性，分析了其工作环境下的压力场和速度场的基本特点，为实际的设计安装工作提供预测和指导。

1 活动叶片风机叶轮机械设计

如图 1a 所示，活动叶片风机叶轮主要由 4 枚直板型叶片、旋转十字支架、固定轴、1 个小带轮、4 个大带轮以及 4 根同步带组成。直板型叶片的中部有一根安装轴，通过该安装轴将 4 枚叶片安装在旋转十字支架的末端，在 4 个叶片安装轴的顶部各固定一个大带轮，通过 3 根传送带将 4 枚叶片连接起来，相邻两个叶片的初始安装夹角为 45° 。小带轮固定安装在固定轴的顶部，并通过同步带与一个大带轮连接。小带轮与大带轮的半径比为 1:2。旋转十字支架可绕固定轴自由旋转。

如图 1b 所示，叶轮的工作原理如下：在风力的作用下，叶片受力驱动十字支架逆时针旋转，受同步带的约束，各叶片在绕固定轴公转的同时也绕自身安装轴自转，自转角速度为公转角速度的一半。这种叶片运动方式的好处在于在叶片公转的一周里，在 A 点和 C 点附近区域受升力作用驱动叶轮；在 B 点附近区域，叶片在来流方向的投影面积较大，受较大的阻力作用驱动叶轮；而在 D 点附近区域，叶片的迎风面积较小，所受阻力较小。

2 计算数学模型

为进一步探索活动叶片叶轮的工作机理，研究叶轮的启动特性和不同旋转角速度时叶轮的发电特性，本文对叶轮分别进行了二维定常和非定常数值计算。

2.1 物理模型简化

由于采用直叶片，可以忽略叶片展长方向的影响，从而选定单位展长(1 m)进行二维数值仿真计算。在数值计算过程中，为降低计算量而又不影响计算精度，去掉叶轮中对数值计算不必要的结构特

(a) 三维图

(b) 俯视二维简图

图 1 活动叶片风机叶轮

征，仅保留四枚叶片。图 2 为叶轮在来流速度 U 冲击下以角速度 ω 匀速转动的情形，叶片绕中心轴 O 转动。二维计算简化结构的主要参数见下表。

图 2 二维计算简化结构示意图

表 发电装置简化结构主要参数

参数	数值
叶片数目	4
叶片弦长/mm	500
来流速度/(m/s)	6
叶轮半径/mm	500

2.2 计算域选取及边界条件设置

为了让来流发展充分，避免由于计算区域过窄或过小而对计算结果产生负面影响，参考文献[13]中所采用的计算域尺寸，将计算区域设为 $12\text{ m} \times 6\text{ m}$ 矩形区域，叶轮位于计算域长度方向的

对称轴上且距上游 3 m 的位置, 如图 3 所示。

图 3 计算域和边界条件设置

计算域由 1 个外部静止域、1 个内部旋转域和 4 个内部旋转子域组成, 叶片包裹于内部旋转子域内。

计算域的边界包括: 静止域和内部旋转域、内部旋转域和 4 个内部旋转子域的交界设为滑移边界, 出口边界设为自由流出口, 上下边界设为滑移壁面, 叶片表面设定为无滑移壁面, 考虑实际工作情况下的风速^[6,14], 将入口边界设为恒定速度入口 (6 m/s)。

计算利用滑移网格技术, 通过编辑 UDF 函数, 设定内部旋转域和 4 个内部旋转子域的重心变化函数, 即内部旋转子域的自转角速度等于其公转角速度的一半, 内部旋转域的角速度等于内部旋转子域的公转角速度。共计算 9 组不同公转旋转角速度的情况。

2.3 网格生成

利用 ANSYS13.0 软件自带的网格划分工具进行计算域网格划分。在二维计算中, 由于四边形网格具有占用内存少的优点, 且对边界层计算非常有利, 所以对整个计算域采用四边形网格划分, 如图 4、5 所示。在壁面上设置边界层进行局部加密以提高计算精度, 第一层网格厚度为 1 mm, 使 Y^+ 值分布在 30~100, 边界层增长率为 1.2, 共设置 10 层。经过网格无关性验证, 将壁面首层网格长度分别设为 0.01 m、0.005 m 和 0.003 m (对应网格总数分别为 40 000、50 000 和 65 000), 发现计算结果差别不超过 1%, 因此将总体网格数设为 40 000 左右。

图 4 静止域网格划分

图 5 旋转域网格划分

2.4 求解设置

计算基于 Standard $k-\varepsilon$ 模型。Standard $k-\varepsilon$ 模型适于涉及快速应变、中等涡、局部转流的复杂剪切流动, 在旋转机械的旋转流场计算情况下有更高的可信度和精度。

采用非平衡壁面函数的近壁面处理和二维稳态分离解法的隐式解法。在控制方程的离散格式上, 压力插值采用 Standard 方式, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。动量方程、紊动能 k 方程和耗散率 ε 方程均采用一阶迎风格式。

每种工况下计算 3 个旋转周期, 每个旋转周期设定 180 个时间步^[6], 根据叶轮旋转速度的不同设定相应的时间步长, 使每时间步内旋转域转动 2° 。每个时间步内迭代 100 次。流场的连续性、 x 和 y 方向的分量紊动能 k 方程和耗散率 ε 的残差收敛标准设为 1×10^{-5} 。

2.5 数值方法验证

该新型叶轮与 Savonius 叶轮均是阻力型叶轮, 且其两者工作条件(风速、叶轮转速)相似, 因此利用 Savonius 叶轮来进行数值方法验证。对常规两叶片 Savonius 风力发电机叶轮(图 6)进行了数值仿真计算, 计算了不同旋转速度时叶轮所受平均力矩, 叶轮详细几何参数及测试条件见文献[14]。

图 6 Savonius 示意图

将计算结果和 HAYASHI 等^[14]的风洞试验结果进行了对比, 结果见图 7。可以看到, 本文数值计算结果与试验结果较为吻合, 当 $\omega > 30 \text{ rad/s}$ 时最大相对误差不超过 6.67%。仿真结果总体上略高于试验结果, 这可能是因为采用 2 维数值计算未考虑壁面影响以及 3 维叶片叶尖损失。

图7 本文仿真结果与 HAYASHI 等的结果对比

3 计算结果分析

对叶轮分别进行了二维定常和非定常计算。为消除尺寸影响, 便于分析, 定义如下量纲一系数。

速比系数表示叶片中心公转速度与来流速度的比值

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (1)$$

力矩系数是力矩的量纲一化表示

$$C_m = \frac{M}{0.5 \rho U^2 R S} \quad (2)$$

功率系数是功率的量纲一化表示

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho U^3 S} = \lambda C_m \quad (3)$$

式中, ω 为叶轮旋转角速度, ρ 为空气密度, 取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, U 为来流速度, R 为叶轮半径, M 为力矩, P 为功率, S 为叶轮特征迎风面积, 定义为 $S = 2RH$, 在二维计算时取 $H = 1 \text{ m}$ 。

3.1 叶轮自启动性能分析

自启动能力是风机叶轮的一个重要指标。为研究活动叶片叶轮的自启动能力, 计算了叶轮在不同旋转位置 φ 的静态力矩。在来流 6 m/s 的情况下, 从 $\varphi = 0^\circ$ 开始每间隔 10° 对一周内不同叶轮旋转位置的情况进行定常数值计算, 各叶片及叶轮总的静态力矩随 φ 的变化关系如图 8 所示。图 8 表明, 叶片在旋转一周的过程中, 静态力矩系数存在一大一小两个正区间, 分别为 $\varphi = [-60^\circ, 120^\circ]$ (由于周期性, $\varphi = [-60^\circ, 0^\circ]$ 的区间与 $\varphi = [300^\circ, 360^\circ]$ 的区间相同) 和 $\varphi = [170^\circ, 250^\circ]$, 存在两个较小的负区间, 分别为 $\varphi = [120^\circ, 170^\circ]$ 和 $\varphi = [250^\circ, 300^\circ]$ 。正区域 $\varphi = [-60^\circ, 120^\circ]$ 的面积要远大于其他区域面积。叶片静态力矩系数在 $\varphi = [30^\circ, 110^\circ]$ 的区间内保持在 0.9 左右。4 个叶片所产生的静态力矩系数变化一致,

相邻叶片的静态力矩系数曲线相差 90° , 与其叶轮的几何安装位置对应。叶轮总静态力矩系数变化周期为叶片静态力矩系数变化周期的 $1/4$, 其平均值为 1.09, 远高于 Savonius 叶轮的总静态力矩系数 $0.16^{[15]}$, 表明活动叶片叶轮在任何旋转位置都能够良好启动。

图8 叶轮静态力矩系数随旋转位置的变化曲线

3.2 叶轮发电性能分析

3.2.1 力矩特性分析

保持来流速度恒定, 对速比系数 $\lambda = 0.2, 0.3, \dots, 1.0$ 的 9 种情况进行了计算。周期内叶轮平均力矩系数随 λ 的变化关系如图 9 所示。当 $\lambda = 0.3$ 时, 平均力矩系数出现最大值, 而随着 λ 的增加, 平均力矩系数呈近似直线关系递减。当 $\lambda = 1.0$ 时, 平均力矩系数为负, 此时叶轮无法从来流中获取能量正常发电, 这也说明该叶轮为阻力型叶轮, 叶轮驱动力为流体阻力, 叶片公转线速度不能超过来流速度。随着叶轮旋转速度增加, 叶片与来流间的相对速度变小, 因此流体对叶片的阻力减小, 体现为叶轮平均力矩系数的减小。

图9 平均力矩系数随速比系数变化曲线

λ 为 0.4、0.5 和 0.6 三种情况下单叶片的力矩系数随旋转位置 φ 的变化关系如图 10 所示。从图 10 中可以看到, λ 越大, 叶片力矩系数曲线越低。随着 φ 的增加, 力矩系数先增加, 在 $\varphi = 25^\circ$ 附近出

现最大值,随后力矩系数剧烈下降,下降趋势在 $\varphi=120^\circ$ 附近停止。力矩系数在 $\varphi=[120^\circ, 270^\circ]$ 的区间内出现小幅波动,总体上呈现先增加后减小的趋势,在 $\varphi=180^\circ$ 附近有一个极大值。力矩系数的最小值出现在 $\varphi=270^\circ$ 附近的位置。在 $\varphi>270^\circ$ 的范围内,不同 λ 对应的力矩系数曲线基本重合,呈迅速上升趋势。

图 10 周期内不同 λ 时单叶片力矩系数

图 11 是 $\lambda=0.5$ 时 4 个不同旋转位置叶轮附近流场的压力云图,由于各叶片之间间距 90° ,因此图 11 描述了 16 个不同位置的叶片附近流场压力云图。当 $\varphi=20^\circ$ 时(图 11b 中左下位置的叶片),叶片迎风面和顺风面存在的压差最明显,对比图 10 可以发现,该点对应叶片力矩系数取得最大值的旋转位置。从图 12a、12b 的速度矢量图可见,下游两枚叶片处在上游两枚叶片的尾流中,由于尾流为不规则的紊乱流,因此下游两枚叶片的力矩系数会出现小幅波动,体现为图 10 中的 $\varphi=[120^\circ, 270^\circ]$ 区间内力矩系数的波动;同时,来流在经过上游两枚叶片后速度减小,对比图 11c、11d,发现来流对下游叶片的作用力减小,叶片迎风面和顺风面的压力差没有上游叶片的明显,这也说明了图 10 中力矩系数在 $\varphi=[120^\circ, 270^\circ]$ 区间内明显低于其他区间内的值。

图 11 $\lambda=0.5$ 时叶轮不同旋转位置流场压力云图(Pa)

图 12 $\lambda=0.5$ 时叶轮不同旋转位置流场速度矢量图(m/s)

3.2.2 功率特性分析

由式(3)可得叶轮平均功率系数(即捕能效率)随 λ 的变化关系,如图 13 所示。从图 13b 可以看到,随着叶轮旋转速度的增加,叶轮平均功率先增加后减小。当 $\lambda=0.5$ 时,平均功率系数出现最大值 $C_{pmax}=0.449$ 。平均功率系数的这种变化趋势可以解释为:该活动叶片叶轮为阻力型叶轮,随着速比系数增加,叶轮上的平均力矩系数呈近似直线的关系递减(图 9),而由式(5)知平均功率系数是平均力矩系数与速比系数之积,因此平均功率系数近似为速比系数的二次函数,存在一个极大值 C_{pmax} ;叶轮驱动力为流体阻力,所以叶片公转速度不能大于来流速度,这也说明为何叶轮平均功率系数在 $\lambda>1$ 时为负值。根据文献[15]的试验数据,Savonius 叶轮的最大平均功率为 0.24,活动叶片叶轮最大平均功率的是 Savonius 叶轮的 2 倍,其应用前景是非常可观的。

图 13 平均功率系数随 λ 变化曲线

4 结论

本文提出了一种活动叶片风机叶轮的设计方案,对叶轮流场进行了二维定常和非定常数值计算,研究了叶轮的自启动性能和发电特性,简要分析了叶轮的工作机理。

(1) 叶轮自启动性能良好,其平均静态力矩系数为 1.09,远高于 Savonius 叶轮的静态力矩系

数 0.16。

(2) $\lambda=0.3$ 时平均力矩系数出现最大值, 随着 λ 的增加, 平均力矩系数呈近似直线的关系递减, $\lambda>1$ 时叶轮平均力矩系数为负, 无法正常发电。

(3) 随着叶轮旋转速度的增加, 叶轮功率系数先增加后减小; 叶轮在 $\lambda=0.5$ 时获得最大功率系数 0.449, 约为 Savonius 叶轮最大功率系数的 2 倍。

参 考 文 献

- [1] 姜海波, 曹树良, 阳平. 水平轴风力机的功率极限[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 113-118.
JIANG Haibo, CAO Shuliang, YANG Ping. Power limit of horizontal axis wind turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 113-118.
- [2] ARMSTRONG S, FIEDLER A, TULLIS S. Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences[J]. Renewable Energy, 2012, 41(1): 13-22.
- [3] YANG B, LAWN C. Fluid dynamic performance of a vertical axis turbine for tidal currents[J]. Renewable Energy, 2011, 36(12): 3355-3366.
- [4] HWANG I, LEE Y, KIM S. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1532-1540.
- [5] LAIN S, OSORIO C. Simulation and evaluation of a straight-bladed darrieus-type cross flow marine turbine[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2010, 69(12): 906-912.
- [6] NOBILE R, VAHDATI M, BARLOW J, et al. Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study[C]//Proc. of the World Renewable Energy Congress, 8-13th May, Sweden, 2011: 22121.
- [7] LI Y, CALISAL S. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine[J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2325-2334.
- [8] AFUNGCHUI D, KAMOUN B, HELALI A, et al. The unsteady pressure field and the aerodynamic performance of a Savonius rotor based on the discrete vortex method[J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 307-313.
- [9] SAHA U, THOTLA S, MAITY D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8): 1359-1375.
- [10] SHIGETOMI A, MURAI Y, TASAKA Y, et al. Interactive flow field around two Savonius turbines[J]. Renewable Energy, 2011, 36(11): 536-546.
- [11] GOLECHA K, ELDHO T, PRABHU S. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine[J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 3207-3217.
- [12] MOHAMED M, JANIGA G, PAP E, et al. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade[J]. Renewable Energy, 2010, 35(11): 2618-2626.
- [13] DRAGOMIRESCU A. Performance assessment of a small wind turbine with cross flow runner by numerical simulations[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 957-965.
- [14] HAYASHI T, LI Y, HARA Y, et al. Wind tunnel tests on a three-stage out-phase Savonius rotor[J]. Japanese Society of Mechanical Engineers International Journal, series B, 2005, 48(1): 9-16.
- [15] IRABU K, ROY J. Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 32(4): 580-586.

作者简介: 田文龙(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为海洋可再生能源开发和利用。

E-mail: nostic@foxmail.com

宋保维, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为水下航行器总体设计技术, 系统可靠性理论及其应用, 水下特种减阻降噪技术, 多学科设计优化技术, 系统效能等。

E-mail: songbaowei@nwpu.edu.cn

毛昭勇, 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为系统可靠性理论及其应用, 多学科设计优化技术等。

E-mail: maozhaoyong@nwpu.edu.cn