

文章编号:1007-6735(2010)05-0423-04

导流型垂直轴风力机气动特性的数值研究

王 鑫, 童正明, 王企鲲
(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 分析了传统垂直轴风力机效率低的原因,并数值研究了带有导叶的导流型垂直轴风力机的气动性能. 研究表明,导叶不仅可以有效地降低因来流对动叶轮吸力面的直接冲击而造成的阻力扭矩,而且还有助于改善来流对动叶轮压力面的有效冲击,这些均使该风力机动叶轮的旋转扭矩得到显著增加. 因此,导流型垂直轴风力机可以有效克服传统垂直轴风力机性能上的缺陷,有望提高其风能利用效率.

关键词: 垂直轴风力机; 导流叶片; 气动性能; 数值研究
中图分类号: TK 83 **文献标志码:** A

Numerical investigation on aerodynamic performance of the vertical axis wind turbine with guiding impeller

WANG Xin, TONG Zheng-ming, WANG Qi-kun
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The reason of why the vertical axis wind turbine (VAWT) is always with low efficiency was analysed and moreover a new type of VAWT with guiding impeller was proposed. The computational fluid dynamics technique was introduced to investigate its aerodynamic performance. The results indicate that the guiding impeller can not only keep the rotor away from the direct impact of coming flow on its suction section, resulting in drag torque, but also improve the effective impact of coming flow on the pressure section of the rotor, both of which contribute to the enhancement of driving torque. So this type of VAWT can smooth away the defects of traditional VAWT and hopefully improve its efficiency.

Key words: vertical axis wind turbine; guiding impeller; aerodynamic performance; numerical investigation

风力机是风力发电系统的动力源,它将风能转化为机械能,进而推动发电机发电. 风力机按结构形式大体上分为水平轴和垂直轴两种. 水平轴风力机发展较完善,具有较高的效率而作为当今主流的风力机类型得到了广泛的应用. 由于水平轴风力机安装难度大、投资成本大且不便移动等缺点,它的使用目前往

往主要限于并网发电中,而对于一些小型离网型发电系统,目前使用最为广泛的仍是垂直轴风力机.

与水平轴风力机相比,垂直轴风机具有投资成本低、安装方便、便于移动及运行噪音小等特点,其缺点是效率较低. 这些在阻力型垂直轴风力机上表现的尤为突出^[1].

收稿日期: 2010-01-13

作者简介: 王 鑫(1985-),男,硕士研究生.

王企鲲(联系人),男,副教授. E-mail: wangqk@usst.edu.cn

本文分析了阻力型垂直轴风力机低效率的原因,在此基础上提出了一种新型的导流型垂直轴风力机^[2].通过CFD(计算流体力学)计算,数值研究了该种导流型垂直轴风力机的气动特性,并与传统的垂直轴风力机性能相比较,论证了本文所提出的导流型垂直轴风力机所具有的优越性.

1 导流型垂直轴风力机

垂直轴风力机(VAWT)的效率比水平轴风力机低的一个主要原因是当来流冲击垂直轴风轮时,在其迎风面的一侧受到的是有效的推力,而在另一侧受到的是风的阻力,上述两种力的合作用力是推动风轮旋转做功的真正有效动力.图1为一种典型的阻力型垂直轴风力机——风杯的受力分析^[3].由于迎风面上一侧风阻的存在,大大降低了垂直轴叶轮的有效受风性能.因此,只要降低该侧上的风阻,即有望能提高垂直轴风力机的效率.为此本文提出一种导流式垂直轴风力机,如图2(a)所示.它主要由导叶与动叶构成,动叶安装在中心,是旋转做功部件,而导叶则围在动叶的外部,是静止部件,主要起导流作用.由于导叶的导流作用,能使来流完全导向左侧动叶的压力面,同时对右侧动叶而言,导叶能起到挡流作用,使来流不直接冲击动叶的吸力面,这样就有望通过简单的二元叶轮来实现对整个垂直轴风力机的做功效率的提高.

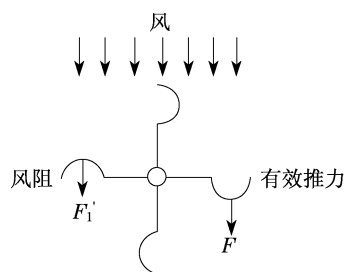


图1 垂直轴风力机气动受力示意图

Fig.1 Aerodynamic forces of the VAWT

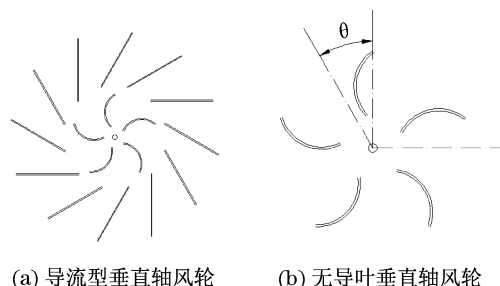


图2 垂直轴风轮示意图

Fig.2 Planar sketch of VAWT

图2(b)是与图2(a)相对应的传统无导叶型垂直轴风轮的外形示意图.本文通过CFD数值计算,比较这两种风轮的气动特性,以检验导叶的作用效果.本文计算所用的风轮外形如图2所示,动叶外径180 mm,导叶外径420 mm.动叶采用单圆弧型,共5片,导叶采用直叶片,共12片.

2 CFD计算模型与计算方法

风力机是一种典型的外部绕流场,而本文所需研究的又是风力机内部流动的细节,因此,整个CFD模拟是典型的多尺度、大分离和复杂流场的计算.为了获得较高的计算精度,计算所需用的网格数是相当巨大的,这使得计算趋于困难.但考虑到本文所提出的风轮本质上是一个二维结构,作为初步研究,本文将简化为二维流场处理.

整个计算域是二维矩形结构,以导流型垂直轴风力机为中心,上延其导叶外径的4倍,下延导叶外径的12倍,左右方向延伸导叶外径的5倍.

网格系统采用三角形非结构化网格,整个计算域的总网格数近70万,如图3所示.在壁面及流动复杂区域处,网格进行的局部加密以提高这些区域内解的分辨率,达到了网格法向无量纲尺寸 $y^+ = 2$.

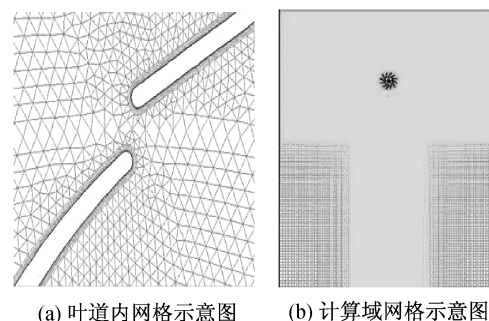


图3 计算网格示意图

Fig.3 Computational grid

本文的控制方程为二维不可压缩流雷诺时均Navier-Stokes方程.雷诺应力采用 $\kappa - \epsilon$ 湍流模型进行估计. κ 为湍动能, ϵ 为湍流耗散率.计算采用基于有限体积法的Simple系列方法.其中,动量方程、湍动能和湍流耗散率均采用具有三阶精度的Quick格式离散^[4].

边界条件为:

- 进口: 给定速度及其方向;
- 出口: 给定背压;
- 固壁: 无滑移条件.

采用多重坐标系方法模拟旋转动叶与静止导叶之间的动静结合,以整体残差下降3个量阶、进出口流量偏差小于1%作为计算收敛条件.整个计算采用商用CFD软件包Fluent 6.3完成.其中,网格生成采用Gambit组件^[5].

3 导流型垂直轴风力机气动特性分析

在相同来流与动叶转速的条件下,风作用于动叶轮时产生的扭矩越大,则风轮从风中所获得的机械能就越多,该风轮的性能自然越好.

定义无量纲扭矩系数

$$M^* = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 D_t^2 B} \quad (1)$$

式中, M 为风力机动叶轮的总扭矩; V_{∞} 为来流速度; ρ 为空气密度; D_t 为动叶外径; B 为垂直轴风轮的竖直高度.

图4为对同一动叶轮加导叶与不加导叶两种情形下总扭矩系数的比较图.

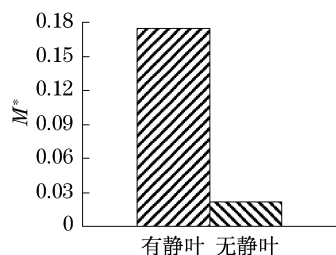


图4 两种风轮总扭矩系数比较

Fig.4 Torque comparison of the two VAWTs

图4表明,在相同来流条件下,加导叶后的导流型风力机的总转矩要比无导叶的风力机的扭矩大了近9倍,这充分说明了导叶轮的重要作用.无导叶的传统风力机,由于其右侧动叶受到较大的负转矩,使得风力机的整体有效扭矩大幅下降.当增加导流叶片后,右侧动叶的吸力面被避免了来流的直接冲击,这使负转矩大幅下降;同时由于导叶导流作用,使来流更有力地冲击左侧动叶的压力面,上述两方面原因使整个动叶轮的扭矩得到大幅度的提高.

鉴于动叶轮在旋转过程中,动叶片与来流的相对位置不同,其受到的扭矩自然也不同,而图4仅能显示动叶轮总的扭矩大小,而不能准确地揭示动叶片在不同周向位置时所受到的具体扭矩大小.为此,图5给出了有、无导叶情形下两种风轮的动叶片在不同周向位置时的扭矩系数比较.图5中 θ 角为动

叶外半径方向与 y 轴正向的夹角,以逆时针方向为正,如图2所示.

图5表明,没有导风轮作用下的传统垂直轴风力机中,来流对风轮的有效做功区为 $0^\circ \sim 120^\circ$ 区域(如图2中的角度定义方式).在此区域动叶轮获得了正的扭矩且达到最大.与之相对,在 $240^\circ \sim 360^\circ$ 区域内,来流对叶轮起到的是阻力,故其扭矩表现为负值且达到最小.这两个区域的扭矩一正一负几乎被抵消,从而导致整个动叶轮总扭矩的下降.与之显著不同的是,本文所提出的带有导叶的风轮上,有效扭矩(即正扭矩)出现了双峰现象, $30^\circ \sim 170^\circ$ 区域与 $240^\circ \sim 300^\circ$ 区域上均出现正扭矩.其中,前者为主要有效做功区,且由于导叶的导流作用使该有效做功区的扭矩强度明显增加.导流叶片的阻流作用尽管不能将动叶的阻力扭矩(即负扭矩)完全消除,但在图5中至少表明,导流型垂直轴风力机的阻力扭矩要远小于对应的无导叶风轮.

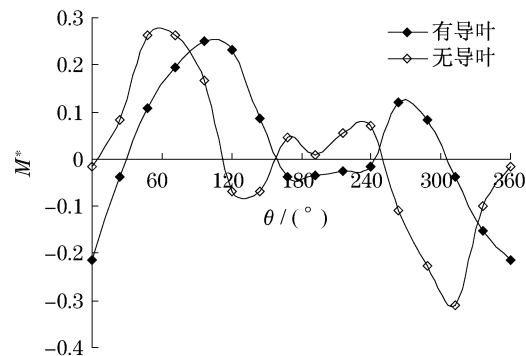


图5 两种风轮不同周向位置各风叶扭矩系数比较

Fig.5 Torque coefficient comparison of the two VAWTs at different circumferential angles

图6(见下页)给出了有、无导叶的两种垂直轴风力机在各个不同位置上流速矢量分布图.图6(a)表明,在无导叶时,来流直接作用于动叶的吸力面,产生了阻力扭矩,降低其做功功率.而添加导叶后,来流对动叶片的有害冲击被明显削弱,一部分来流被导流到动叶轮的有效做功区,推动动叶做功;另一部分则被扰动成旋涡而使其机械能耗散殆尽,从而降低了对动叶吸力面的有害冲击,改善了整个风力机的工作性能.

导流叶片的作用不仅能减少来流对动叶片吸力面的冲击阻力,而且对于风力机的主要做功区域也能起到明显积极作用,图6(b)所示,由于导流叶片的存在,改善了来流对动叶轮的有效冲击,使原本在动叶外部作无效绕流的流体被导流至风力机动叶轮的有效做功流道.尽管流体流经导叶时会存在一定

的能量损失,但总体来说仍然有助于改善来流对动叶轮的冲击,从而提高了风力机对风能的接收.

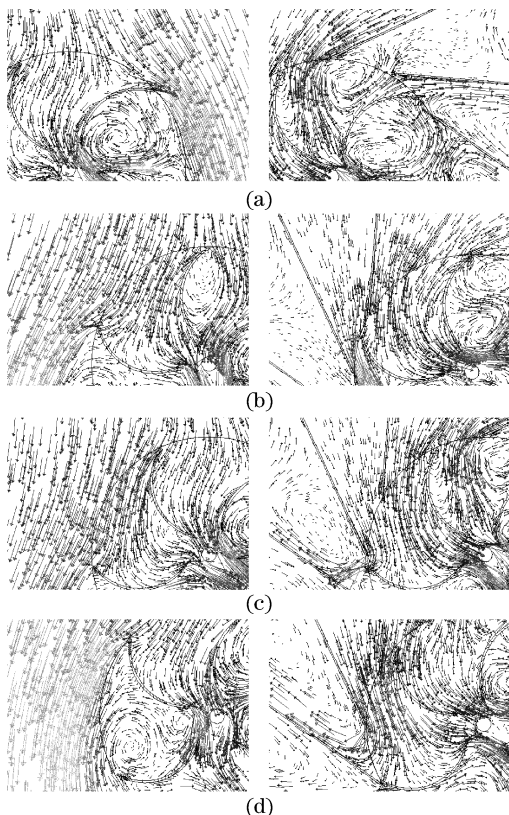


图6 两种风轮内流速分布的比较

Fig.6 Velocity comparison of the two VAWTs

定义压差系数

$$C_{\Delta P} = \frac{P_p - P_s}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2} \quad (2)$$

式中, P_p 为动叶压力面上压力; P_s 为动叶吸力面上压力.

在图6(c)中,随着动叶的相对位置改变,带有导叶的风力机仍能有效地接收更大量的来流冲击,这就说明其在转动状态下有着较好的动力连续性.图7(a)给出了动叶轮在该位置(图6(c)中靠底部)时,动叶片上压差系数沿叶片无量纲弦长 ξ 的分布.图7(a)表明,在导叶的作用下,改善了来流对动叶片的冲击角度与位置,使沿叶片弦长的压力面与吸力面对应点的压差分布更趋均匀化,且明显高于无导叶情形的风轮.由于压差力是推动动叶旋转的有效作用力,因此,这就从另一方面解释了导叶对风轮的积极作用.

图6(d)表明,不带导叶的动叶轮内部由于边界层的分离而产生较大的旋涡,使来流的动能耗散,降低了其对动叶轮的推动作用.增加导叶后旋涡消失,使来流更好地作用于动叶压力面而产生有效的推动

功.图7(b)给出了动叶轮在该位置(图6(d)中靠底部)时,动叶片上压差系数沿叶片无量纲弦长的分布.在无导叶的情形下,该动叶的压力面产生流动分离,其压力很低,而对应吸力面仍有流体绕流通过,则压力相对较高,这使整个动叶片上的压差为负,从而产生阻力扭矩,降低动叶轮旋转动力.当加上导叶以后,有效抑制了流动分离,改善了流动性能,使动叶片的压差得到显著提高,这有助于提高动叶轮的有效旋转扭矩.

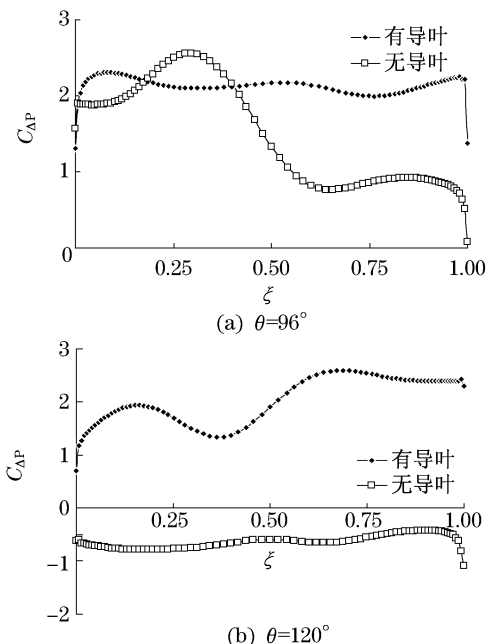


图7 两种风轮的风叶压差系数沿叶片弦长的分布

Fig.7 Pressure difference of the two VAWTs along the blade chord

4 结论

在对传统垂直轴风力机低效率原因分析的基础上,数值研究了带有导叶的导流型垂直轴风力机的气动性能.通过与不带导叶的传统垂直轴风力机的流动性能相比较,研究表明,导叶不仅可以有效地降低因来流对动叶轮吸力面的直接冲击而造成的阻力扭矩,而且还有助于改善来流对动叶轮压力面的有效冲击.这些均能显著提高动叶轮的整体动力矩,从而增加该种风力机的运行效率.这有望改变长期以来垂直轴风力机因其低效率而未被广泛采用的现状.

本文的工作是初步性的,旨在论证导叶的作用.不难发现,如果完善对导动叶的叶片型线、角度等参数的优化匹配,必将能更好地显示出导流型垂直轴风力机的优势.这些优化工作将在以后陆续发表.

(下转第432页)