

叶尖射流对风力机叶尖流场影响的数值研究

高翔^{1,2}, 胡骏^{1,2}, 王志强^{1,2}

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为了设计出更加适合非并网系统的风力机, 采用在叶尖加入射流的方法来改变叶尖流场分布。在风力机叶片顶端沿弦长布置 3 个喷口, 采用 CFD 数值模拟方法, 通过改变风力机转速获得原型和带喷口的风力机模型的气动特性以及流场分布。发现在转速低于 1200 r/min 时, 带有安装在不同位置的喷口的风力机功率增长率几乎都为零, 射流在这一转速范围内对风力机的气动性能几乎没有影响。而转速高于 1200 r/min 时, 随着转速的增大, 喷口位于叶尖中部的风力机的功率增长率快速地增大, 射流影响了 75% 以上叶高的表面的压力分布, 在大转速下吸力面低压区范围较大, 其叶尖涡量低于其他方案中, 并且在下游扩散得比其他方案快, 改善了风力机下游流场, 提高了风力机效率。喷口布置在叶尖前缘时其叶尖涡的局部涡量较原型叶片稍大, 降低了风力机功率的输出。喷口布置在叶尖尾缘时基本和原型叶片相同。该结论为设计适用于非并网系统的定桨距变速风力机提供了基础。

关 键 词: 射流; 功率增长率; 风力机气动性能; 风能利用系数; 叶尖涡
中图分类号: V232; TK83 **文献标志码:** A

Numerical study on effects of blade tip air jet on the flow field of wind turbine blade tip

GAO Xiang^{1,2}, HU Jun^{1,2}, WANG Zhi-qiang^{1,2}

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power Systems,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Co-Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to design a more suitable wind turbine for the non-grid-connected wind power system, the method of arranging air jet on the blade tip was adopted to change the flow field of blade tip. Orifices were arranged on the top of the blade tip at three chord-wise positions. Using the CFD numerical simulation method, the aerodynamic performances and flow field distribution of a wind turbine based model and models with orifices were obtained under different rotating speeds. When the rotating speed was below 1 200 r/min, all the power growth rates of wind turbine with orifices were almost zero, indicating air jet had no effect on the aerodynamic performance of wind turbines at this range of rotating speed. When rotating speed was higher than 1 200 r/min, with the increase of rotating speed, the

收稿日期:2013-11-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助;江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0224);
国家重点基础研究发展计划(2007CB210301)

作者简介:高翔(1983—),男,山东济南人,博士生,主要从事叶轮机械气体动力学研究。

power growth rates of the wind turbine with air jet at middle of the chord raised fast. The air jet affected the pressure distribution on the blade surface of 75% blade height, and the low pressure area on the suction side was larger at high rotating speed. The vorticity of blade tip vortex of the blade with air jet at middle position was lower than the other model. Meanwhile, the dissipation of the blade tip vortex was faster than that of the other model, improving the downstream flow field and the efficiency of the wind turbine. There was no obvious change when the orifice was set at the trailing edge. But for the model with orifice at leading edge, the output power declined, and the vorticity of blade tip vortex is slightly larger than the based model. This conclusion provides the foundation for designing wind turbine applicable for non-grid-connected wind power system.

Key words: air jet; power growth rate; aerodynamic performance of wind turbine; power coefficient of wind; blade tip vortex

多年来,随着人们对风能利用成本的控制和对风能利用率要求越来越高,国内外研究人员、工程人员尝试了很多技术措施来提高风力机的气动性能,比如在风力机叶片上采用 Gurney 襟翼,在襟翼上加后缘锯齿,采用脉冲射流减少叶背分离以及增加叶片表面粗糙度等^[1-4]。

不同的方法其提高风力机气动性能的原理不尽相同。射流式旋涡发生器(air jet vortex generator, AJVG)作为一种主动控制技术已在大尺寸的风力机上有所应用。大尺寸风力机叶片展弦比较大,叶片的振动较明显,采用脉冲式射流可以改善叶片的动态失速特性。实验证明,在大尺寸风力机上使用 AJVG 会获得更大的动力输出,以及降低气动载荷的动态失速的大小^[5]。在小尺寸风力机上使用脉冲式射流对改善风力机叶片的动态载荷的影响则较弱,但有研究发现若在叶尖处使用 AJVG 可改善叶尖流场结构,从而在不改变风力机叶片主体的情况下,在最大程度上控制叶尖涡生成进而提高风力机气动效率以及降低发出的噪声水平^[6]。叶尖涡的存在和发展是风力机尾流结构的一个重要特征。在近场尾流区域,叶尖涡的诱导速度对叶片的气动特性产生作用。同时旋转叶片的叶尖涡相对有限长固定叶片的情况更为复杂,因此近年来,叶尖涡是风力机空气动力学的研究重点之一^[7]。

描述叶尖涡发展可以通过烟流^[8-9]和粒子图像测速(PIV)^[10]实验方法,也可以通过空气动力学计算方法。后者主要有自由涡尾迹法(free vortex method, FVM)^[11]和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法^[12]。CFD 方法从流体控制方程(N-S 方程)出发,引入的假设和模型较 FVM 少,也不需要风力机叶片剖面二

维翼型的气动特性作为输入,因此是一种比较通用的计算方法,成为风力机尾流结构研究的重要手段。

本文在风力机叶尖设置喷口,通过在叶片顶端的射流来改变叶尖部的流场,从而影响叶尖涡的生成和结构分布。通过 CFD 方法探索叶尖射流对叶片流场的影响。

1 风力机模型和计算域

研究对象为一个直径为 0.75 m, 3 个叶片,定桨距变转速上风向水平轴风力机(下文简称风力机)。风轮叶片由标准 STORK 5.0 WPX 叶片,按 7.13:1 的比例缩小而成。该叶片按失速控制原理设计,由荷兰 STORK(现为 AEROPAC)制造,翼型为 NACA4412-4424。叶根扭转角为 8°,叶尖无扭转。桨距角和锥角均设置为 0°。风力机详细参数如表 1 所示。按照该几何参数在 UG 软件中建模,如图 1 所示。

在叶尖布置喷口,位于在叶片顶端的前部、中部、和中后部,如图 2。算例名称以及喷口详细参数见表 2,表中 c 为叶顶翼型弦长;Case 0 为无射流的原型叶片。

表 1 风力机参数

Table 1 Parameters of the wind turbine

参数	数值及说明
叶片数	3
风轮直径/m	0.75
叶尖安装角/(°)	0
叶片类型	STORK 5.0 WPX
叶片翼型	NACA 4412-4424

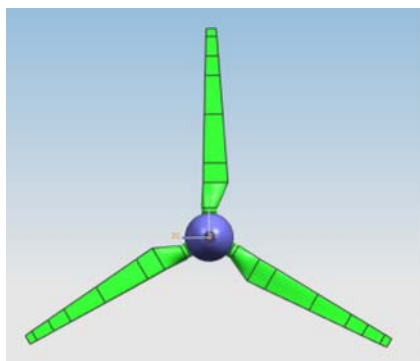


图 1 风轮 UG 模型

Fig. 1 UG model of turbine

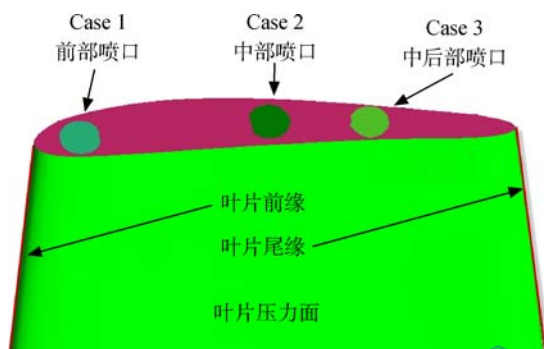


图 2 叶尖喷口位置

Fig. 2 Orifice positions at blade tip

表 2 算例设置及叶尖喷口参数

Table 2 Case setting and parameters of the orifice at blade tip

算例	喷口位置 (x/c)/%	喷口直径/ m	喷口气流 相对速度/ (m/s)
Case 1	≈ 10	2	50
Case 2	≈ 50	2	50
Case 3	≈ 70	2	50

2 数值模拟过程

2.1 计算域与网格划分

为了模拟风力机风轮流场的实际情况,在建模时考虑到以下情况:

1) 计算域模仿风洞的流场来建立. 采用圆柱体计算域,圆柱体的外壁设置成固壁并且绝对静止,来模拟风洞洞壁.

2) 计算主要考虑风力机风轮气动特性,因此忽略风力机的塔架的影响.

3) 在建立几何模型时,出口段的距离是进口段距离的 3 倍,使得风力机后的尾迹有充分的发展.

4) 针对风轮 3 个叶片的轴对称特点,应用了 120° 旋转周期边界条件,使得计算域只有实际区域的 $1/3$,从而使网格数和计算量减少.

网格生成采用自底向上的方式:首先在叶片表面以及其他边界面上生成三角形面网格;然后在叶片表面生成 7 层棱柱体网格来模拟附面层流动;通过 Density 功能来对叶片尾迹区和叶尖区进行加密来实现对叶片尾迹流动和叶尖涡细节的捕捉;最后采用 Delaunay 方法,在面网格和棱柱体网格的基础上向流场中间生成四面体网格. 调整网格体积增长率生成若干套不同数量的网格. 通过试算,对比不同网格数量下风力机叶片的气动扭矩,最终确定计算区域总网格数量(total elements)为 371 万. 试算结果表明,在上述网格密度条件下,进一步加密网格,气动扭矩不会发生明显变化.

最终生成网格如图 3 所示. 图 4 为 96% 叶高处网格细节,可以看到叶片前缘、尾缘和尾迹区网格加密效果,方框放大显示的是用于捕捉附面层流动的棱柱体网格. 图 5 为 Case 2 叶尖表面面网格分布.

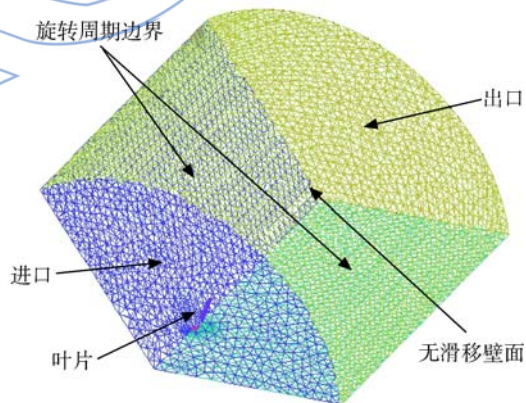


图 3 计算网格及边界设置图

Fig. 3 Computational grids and boundary setting

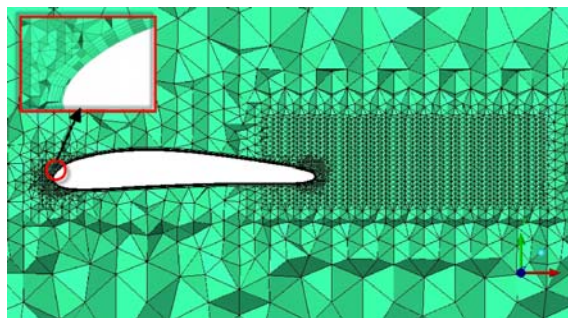


图 4 96% 叶高截面网格细节

Fig. 4 Details of the grid at 96% blade height

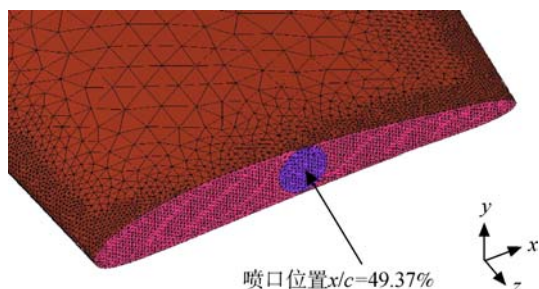


图5 叶尖表面网格分布(Case 2)

Fig. 5 Distribution of the grid at blade tip (Case 2)

2.2 计算方法和边界条件

风力机叶片的流场是三维非定常的旋转流场,当来流风速恒定,风力机处在设计状态下工作时,叶片周期性掠过求解域,相对于惯性参考系来讲,流动是非定常的.当取与旋转部件一起运动的旋转参考系时,相对这个旋转参考系分析,流动就是定常的^[13].因此,本文选择在旋转参考系下求解.来流风速为8m/s,通过改变风力机转速,获得风力机的气动特性.进口边界为轴向进气,给定速度为8m/s;出口边界给定静压为101325Pa;叶片表面为无滑移固壁边界;模拟风洞壁为无滑移固壁边界,所取直径为5倍风轮直径,保证洞壁效应可以忽略.数值模拟过程在ANSYS CFX^[14]软件中进行,湍流模型采用SST(shear stress transport) $k-\omega$;对流项采用高阶精度格式,采用隐式算法.经过600个时间步迭代,监控流量方程、动量方程、 k 方程和 ω 方程的方均根残差下降3个数量级,高转速时扭矩达到稳定,低转速时由于大分离现象的存在,扭矩呈周期性变化,认为计算收敛.

2.3 计算校核

将计算结果与实验结果进行比较,如图6所示

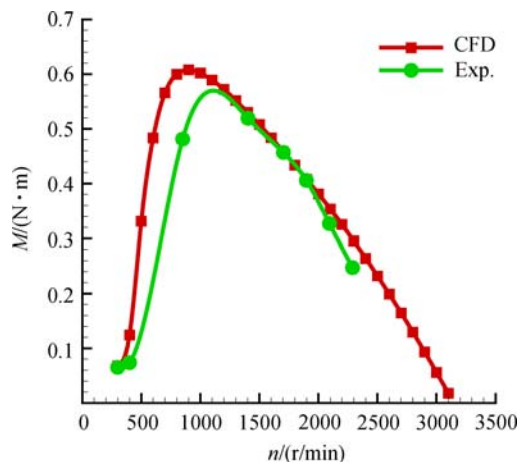


图6 风力机扭矩CFD计算结果与实验值比较

Fig. 6 Comparison of torque between CFD and experiment

示,可以看到在大转速($n > 900$ r/min)时,CFD计算扭矩与实验吻合得很好;在小转速($n < 900$ r/min)时,CFD计算扭矩比实验值偏大,这是因为在低转速范围叶片攻角较大,流场中因分离涡引起的非定常现象比较明显.可以通过采用非定常计算方法以及大涡模拟方法来提高低转速范围的数值模拟与实验值对比的精度.在本文中使用定常方法研究叶尖射流对风力涡轮流场和性能的影响还是可靠的.

3 计算结果及分析

3.1 扭矩和功率

根据式(1)可计算出相应的输出功率,图7为Case 0~Case 3的气动扭矩输出.

$$P = M\omega = \frac{Mn\pi}{30} \quad (1)$$

式中 P , M , ω 和 n 分别为风力机气动功率、扭矩、角速度和转速.

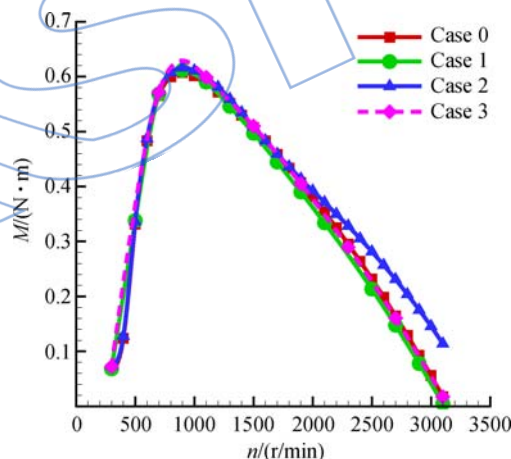


图7 风力机扭矩随转速变化曲线

Fig. 7 Torque of the wind turbine vary with rotating speed

从图7和图8可以看出,在小转速 $n < 1200$ r/min范围,Case 0~Case 3的扭矩、功率相同;当 $n > 1200$ r/min时,与Case 0相比,Case 1的输出要小,Case 2明显较大且随着转速增加差值加大,Case 3与Case 0基本重合.

3.2 功率增长率

为了更加清晰地显示出Case 1~Case 3输出功率的差别,这里引入功率增长率(power growth rate,记为 γ)的概念,定义见式(2),其中 $i=1,2,3$.

$$\gamma_{\text{case } i} = \frac{P_{\text{case } i} - P_{\text{case } 0}}{P_{\text{case } 0}} \times 100\% \quad (2)$$

Case 1~Case 3 的功率增长率如图 9 所示. 从图 9 中可以看出, 在 $n < 1200$ r/min 时, 3 种风力机的功率增长率几乎都为零, 即射流在这一转速范围内对风力机的气动性能几乎没有影响. 而在转速 $n > 1200$ r/min 时, 随着转速的增大, Case 2 中带有位于叶尖中部射流的风力机的功率增长率快速的增大; Case 3 位于叶尖尾缘的射流则对风力机的气动性能几乎没有影响; 而 Case 1, 带有位于叶尖前缘的射流的风力机的功率增长率却是呈明显的负增长.

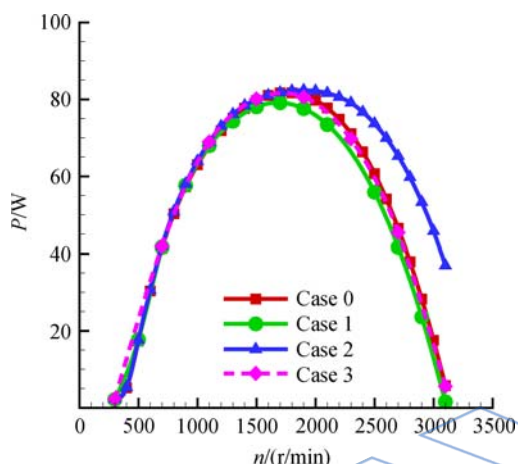


图 8 风力机功率随转速变化曲线

Fig. 8 Power of the wind turbine vary with rotating speed

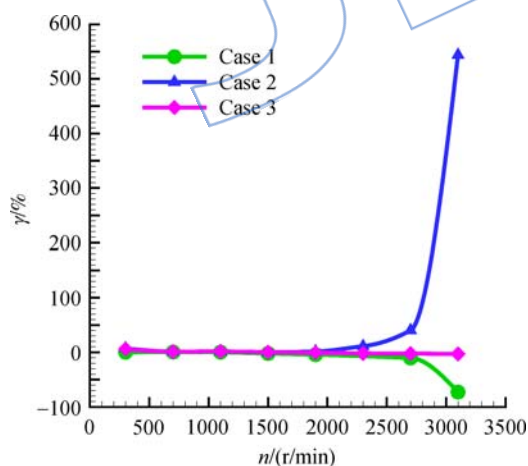


图 9 功率增长率随转速变化曲线

Fig. 9 Curves of power growth rate vary with rotating speed

3.3 风能利用率

在评价风力机性能时常用到风能利用率 (C_p) 这个概念^[15]. 本文在计算风力机的风能利用率时喷口出有质量、能量的输入, 有必要考虑其对

C_p 计算的影响. 通过对比发现, 喷口处的质量流量占来流主流的 0.002%, 该流量相对主流来说是微射流; 这部分射流所含的动能与来流动能的比值为 0.3%, 与风力机发电功率比值在小转速下约为 20%, 在大转速下约为 1.5%. 综合考虑, 这部分气流增加的能量不能直接忽略, 在计算风能利用率时要计算到总能量中. 定义 C_p 如下:

$$C_p = \frac{P}{W_1 + W_2} \quad (3)$$

其中 P 为风力机气动功率, W_1 为来流所含动能, W_2 为射流所含动能.

图 10 为 Case 0~Case 3 的风能利用率随叶尖速比变化的曲线. 叶尖速比 λ 是用来表述风力机风轮特性的一个十分重要的无量纲参数. 它等于叶片叶尖的圆周速度与远上游风速的比值. 叶片越长, 或者叶片转速越快, 同风速下的叶尖速比就越大. 由图可见在低转速 ($\lambda < 6$) 时, 4 条曲线几乎重合. 也就是说在低转速时, 射流对风力机的气动性能几乎没有影响. 在 $\lambda > 6$ 后, 明显地可以看到, 当风能利用率 (C_p) 达到最大值时, 随着 λ 的增大, 叶尖中部有射流的风力机风能利用率减小趋势最缓. 也就是说, 在高转速情况下叶尖中部带有射流的风力机其风能利用率高于没有射流的风力机. 在叶尖前缘有射流的风力机的风能利用率比没有射流的风力机要低. 而尾缘射流对风能利用率影响很小.

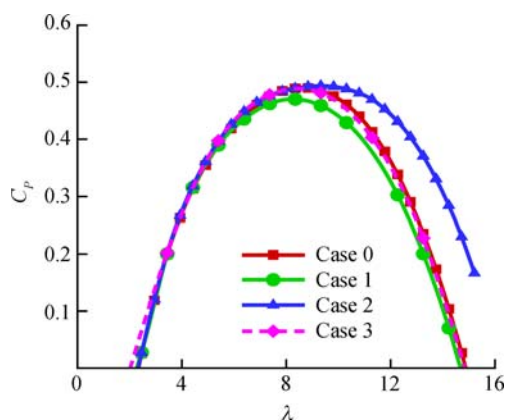


图 10 $C_p - \lambda$ 曲线

Fig. 10 $C_p - \lambda$ curves

3.4 叶尖压力分布

由图 7、图 8 面的特性曲线可以知道, 带有叶尖射流的风力机与原型风力机的气动性能在高转速下才有明显差别. 考虑到 Case 1 和 Case 2, 本文选取高转速 $n = 2300$ r/min 状态对 Case 0~

Case 3 的流场进行分析.

图 11 和图 12 给出的是 Case 0~Case 3 在高转速下叶尖(75%~100%叶高)的压力面和吸力面的压力分布.

图 11 显示, Case 0~Case 3 的叶尖压力面压力分布情况基本相同. 而图 12 中显示 Case 2 的吸力面低压区面积明显大于其他三者的, 因此 Case 2 的射流提高了叶片两面的压差, 增加了风

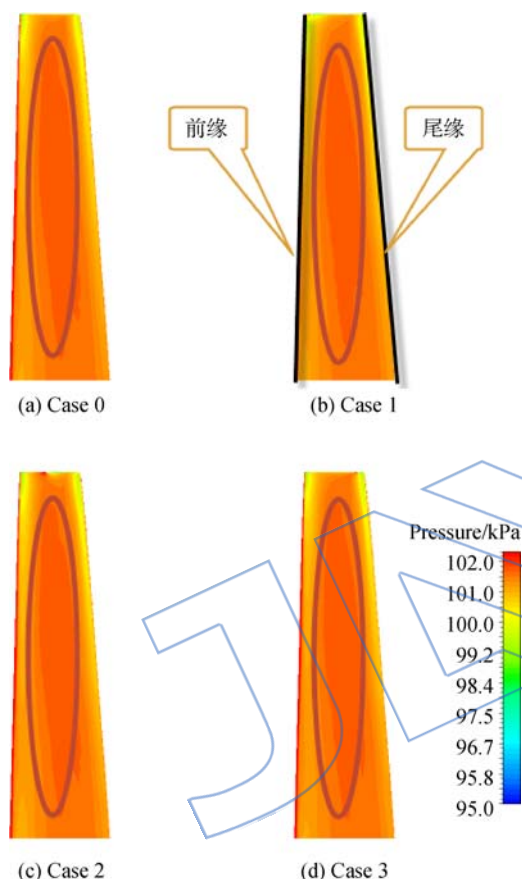


图 11 叶尖压力面压力分布

Fig. 11 Distribution of pressure on the pressure side of blade tip

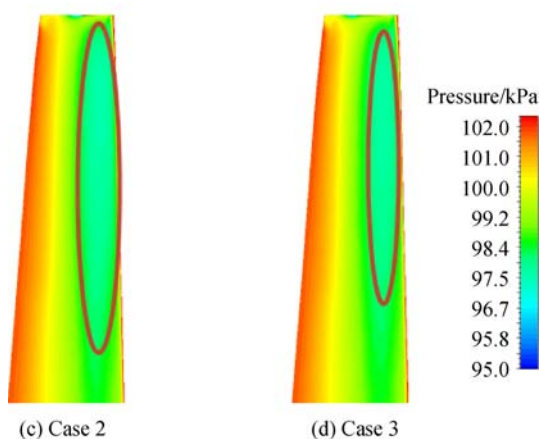
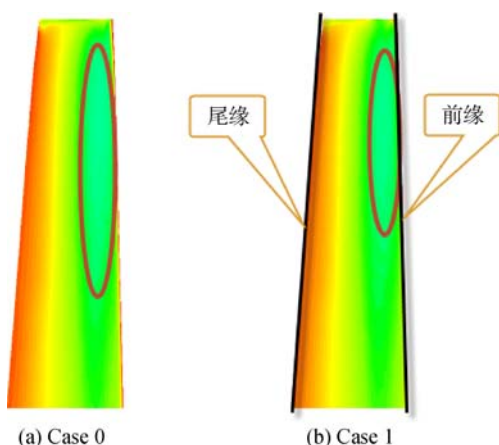


图 12 叶尖吸力面压力分布

Fig. 12 Distribution of pressure on the suction side of blade tip

力机的风轮扭矩, 从而帮助风力机提高了功率.

由于有限长叶尖附近的三维流动, 压力面的高压气体绕过叶尖进入吸力面, 导致叶尖附近表面压力分布与二维翼型的压力分布完全不同. 叶尖射流可以在一定程度上抑制三维流动, 改善叶尖及其下游的流场特性, 使叶尖附近流场趋近二维流动, 从而改变叶片表面的压力分布.

3.5 叶尖涡生成

叶尖涡是指由于风力机叶尖三维效应, 从叶尖处生成并螺旋发展至下游的集中涡系. 相对于有限翼展长度的机翼产生的翼尖涡, 风力机叶尖涡由各个叶尖生成, 在下游相互影响, 流场更加复杂, 其造成的振动和噪声危害更明显^[16]. 对于单个叶片, 旋涡的涡核是涡量集中的区域, 能量损失明显, 涡核处的总压低于周围流场^[17].

图 13 显示了 Case 0 中叶尖处几个截面的总压等值线, 反映了叶尖涡的产生过程. 从叶尖前缘开始, 叶片压力面和叶尖端面之间已有旋涡生成, 其涡核位于叶尖端面以外; 而吸力面一侧的旋涡也在 1/4 弦长处开始生成, 其涡核位于叶尖端面以内. 压力面一侧的旋涡逐渐越过叶尖向吸力面发展, 在尾缘附近与吸力面的旋涡合并成一个涡.

3.6 叶尖涡结构

涡量是旋涡强度的一种更具物理意义的度量, 其定义为^[18]

$$\omega = \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] i + \left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] j + \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] k \quad (4)$$

式中 u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的速度.

图 14 给出了 Case 0~Case 3 叶尖区域涡量

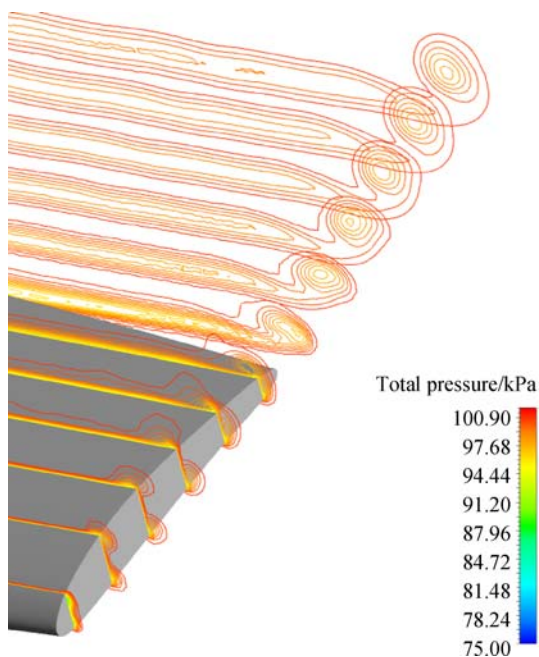


图 13 叶尖处截面总压等值线(Case 0)

Fig. 13 Isolines of total pressure on the sections of blade tip (Case 0)

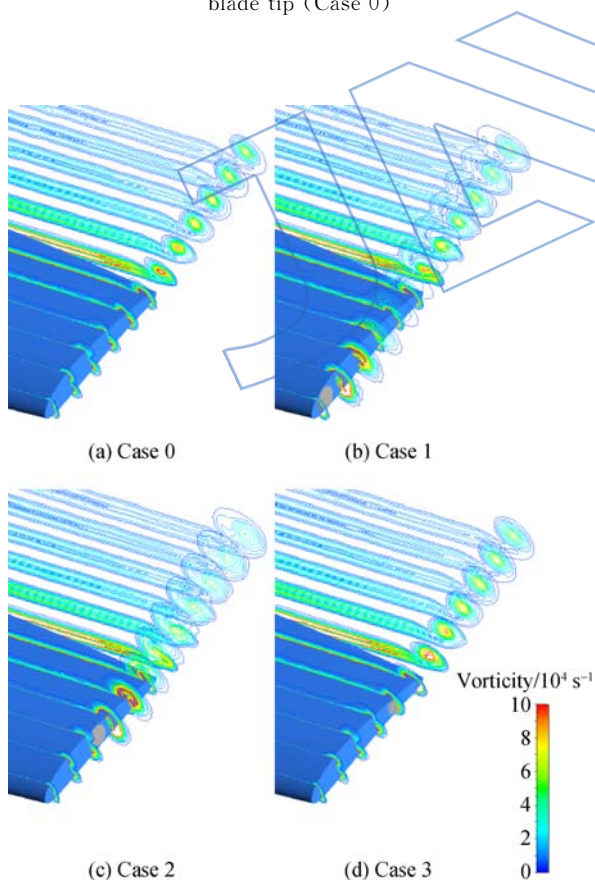
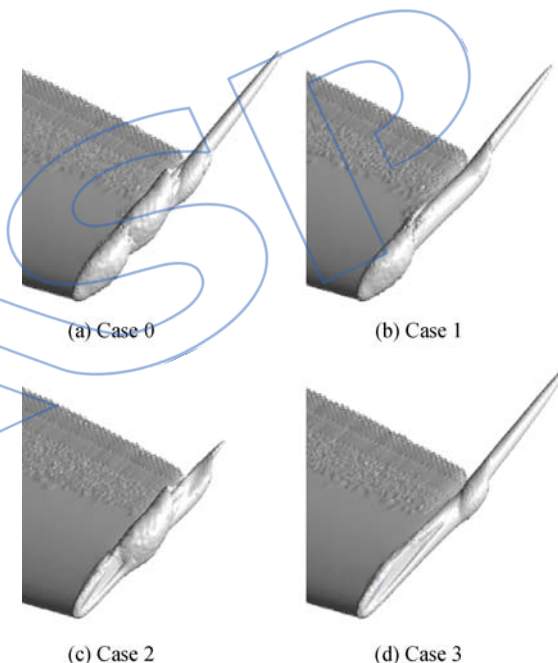


图 14 叶尖区域涡量等值线分布(Case 0~Case 3)

Fig. 14 Isolines distribution of vorticity on the blade tip (Case 0~Case 3)

等值线的分布.可以看出,Case 0 和 Case 3 涡量大小相当,分布也比较一致. Case 2 与这两者相比,在离开叶片后分布基本一样,但是在叶片靠近前缘附近涡强度较大.而 Case 3 只有在涡旋发生器附近涡量稍大,而后向下游很快减弱,向下游的发展也没有 Case 0, Case 1 和 Case 3 远.

图 15 给出的是涡量为 $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的等值面分布.从涡量等值面的分布可以更明显地看出,Case 2 中在涡旋发生器附近涡量稍大,而在离开叶尖尾缘后很快衰减,其尾迹的长度也比其他几种情况要短.可以看出,Case 2 中涡旋发生器使得叶尖涡的影响变弱,降低损失;而 Case 1 中叶尖涡范围较大,图中所示叶尖涡范围比 Case 0 和 Case 3 都略大.

图 15 涡量为 $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的等值面分布Fig. 15 Isosurface distribution of vorticity of $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$

4 结 论

本文通过对原型风力机和带有 AJVG 的风力机在来流风速为 8 m/s 并改变其转速的工况下进行数值模拟,得到其空气动力学特性曲线,并根据得出的风能利用率绘出功率增长率图,结合流场分析,总结得出:

1) 在转速低于 1200 r/min 时,带有 3 种不同安装方式 AJVG 的风力机的功率增长率几乎都为零,即 AJVG 在这一转速范围内对风力机的气动性能几乎没有影响.而在转速高于 1200 r/min 后,随着转速的增大,带有位于叶尖中部的 AJVG

的风力机的功率增长率快速地增大。

2) AJVG 影响了 75% 以上叶高的表面尤其是吸力面压力的分布,布置在叶尖中部时,在大转速下吸力面低压范围较大;在前缘和尾缘时则基本和原型叶片相同。

3) 对原型叶片的分析发现,在叶尖、压力面一侧从前缘开始生成旋涡,吸力面一侧从 1/4 弦线附近开始生成旋涡,压力面一侧的旋涡在运动过程中逐渐翻越叶尖,在尾缘附近与吸力面一侧的旋涡合并为单独的叶尖涡。

4) AJVG 在叶尖中部时,叶片尾缘后的叶尖涡的涡核处涡量低于其他方案中叶片同一位置上叶尖涡的涡量,并且尾缘后的叶尖涡耗散得比原型叶片和安装在其他位置的快,改善了风力机下游流场,提高了风力机效率;布置在前缘时其叶尖涡向下游的发展与原型相同,但局部涡量较原型稍大,降低了风力机功率的输出。布置在尾缘时,其影响较弱,性能基本和原型的相同。

参考文献:

- [1] Johnson S J, Baker J P, Van Dam C P, et al. An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs[J]. *Wind Energy*, 2010, 13(2/3): 239-253.
- [2] Baker J H, Iniyar S, Sreevalsan E, et al. A review of wind energy technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(6): 1117-1145.
- [3] Shun S, Ahmed N A. Wind turbine performance improvements using active flow control techniques[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 49: 83-91.
- [4] Maldonado V, Boucher M, Ostman R, et al. Active vibration control of a wind turbine blade using synthetic jets[J]. *International Journal of Flow Control*, 2012, 1(4): 227-237.
- [5] Ahmed N A. New horizons of applications of the 21st century aerodynamic concepts from aerospace to power generation and utilization[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 49: 338-347.
- [6] 竺晓程,田杰,欧阳华,等.带控制叶尖涡嵌入式导流管的风力机叶片:中国,CN102705176A[P]. 2012-10-03.
- [7] Vermeer L J, Sorensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(6/7): 467-510.
- [8] Alfredsson P H, Dahlberg J A. A preliminary wind tunnel study of windmill wake dispersion in various flow conditions[R]. Stockholm: the Aeronautical Research Institute of Sweden (FFA), Technical Note AU-1499, 1979.
- [9] Vermeer L J. A review of wind turbine wake research at TU Delft[R]. AIAA-2001-00030, 2001.
- [10] XIAO Jingping, WU Jie, CHEN Li, et al. Particle image velocimetry (PIV) measurements of tip vortex wake structure of wind turbine[J]. *Applied Mathematics and Mechanics: English Edition*, 2011, 32(6): 729-738.
- [11] Coton F N, Wang T, Galbraith R A M. An examination of key aerodynamic modeling issues raised by the NREL blind comparison[J]. *Wind Energy*, 2002, 5(2/3): 199-212.
- [12] Sanderse B, Pijl S P, Koren B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics[J]. *Wind Energy*, 2011, 14(7): 799-819.
- [13] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.
- [14] Ansys Official Website. ANSYS CFX features[EB/OL]. [2012-12-06]. [Http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+CFX/Features](http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+CFX/Features).
- [15] Burton T, Sharpe D, Jenkins N. 风能技术[M]. 武鑫,谷海涛,李海东,等译. 北京:科学出版社, 2007.
- [16] 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.
- [17] 马兴宇,明晓. 风力机叶尖涡特性及其控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(5): 635-639.
- MA Xingyu, MING Xiao. Characteristics and control of blade tip vortex of wind turbine[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 43(5): 635-639. (in Chinese)
- [18] 陈懋章. 粘性流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.