一种叶片前缘前带微小圆柱的垂直轴风力机

陈珺 [1]，孙晓晶 [1]，黄典贵 [2]

(1.上海大学 上海市应用数学和力学研究所，上海 200072

2.上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093)

摘　要：本文提出了一种通过在叶片前缘前设置微小圆柱来抑制叶片上流动分离的控制方法，并对采用此流动控制方法后的升力型垂直轴风力机的气动性能进行了数值研究。结果表明，在大攻角情况下，翼型前缘前设置微小圆柱可以有效的抑制风力机叶片上的流动分离，得到增升减阻的效果；同时，与传统的升力型垂直轴风力机相比，前缘前设置微小圆柱后的垂直轴风力机在低尖速比下的风能利用率可得到大幅度的提高。

关键词：垂直轴风力机；流动分离；气动性能；风能利用率

中图分类号： TK89　　　　　　　　　**文献标识码：**A

A New Type of Vertical-axis Wind Turbine Equipped with the Blades having Micro-cylinders Installed in front of Their Leading-edges

CHEN Jun[1], SUN Xiao-Jing[1], Huang Dian-Gui[2]

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper presents a flow control method using micro-cylinder installed in front of the blade leading edge and invests the aerodynamic performance of the VAWT equipped with micro-cylinders. Numerical results suggest that the flow separation is effectively controlled by setting a micro-cylinder in front of the blade leading edge when the blade works at large attack angle. Meanwhile, the VAWT equipped with micro-cylinders has higher efficiency than regular VAWT under small tip speed ratio.

Key words: vertical axis wind turbine; flow separation; aerodynamic performance; wind energy utilization efficiency

0 前言

风能是一种无污染的可再生能源，它是可再生能源中发展最快的清洁能源，同时风力发电也是最具有大规模开发和商业化发展前景的发电方式。如果风能的1%被利用，则可以减少世界3%的能源消耗；风能用于发电，可产生世界总电量的8%~9%[1]。质量轻、结构简单、平衡性好、安装维护方便的Darrieus直叶片垂直轴风力机（SB-VAWT）具有广阔的应用前景[2]。但传统的升力型垂直轴风力机在低尖速比下常处于大攻角工况下运行，随之产生大尺度的流动分离，导致翼型的升力系数降低，阻力系数增大，最终使风力机叶片的气动性能恶化。

为了能使升力型垂直轴风力机在低尖速比下的气动性能有所提高，本文提出了一种在叶片前缘前设置微小圆柱的流动控制方法，并通过课题组自主研发的计算软件 UCFD[3]对采用这种方法来抑制垂直轴风力机叶片上流动分离的效果进行了数值模拟。同时，对在叶片前缘前设置微小圆柱后的垂直轴风力机的气动性能进行了数值模拟计算，并将得到的风能利用率与传统的垂直轴风力机的风能利用率进行了对比。

1 计算模型

计算中升力型垂直轴风力机叶片翼型选用NACA0015，翼型弦长 c=400 mm，旋转直径 D=2500 mm，自由来流速度 V=10 m/s[4]。图1为该风力机的轴向截面示意图，其中 O 为旋转中心，R 为旋转半径。图2为叶片前缘前设置微小圆柱后的放大图，

基金项目：国家自然科学基金资助项目(No.91130027)和(No.11202123)

作者简介：陈珺(1989-)，女，硕士，主要从事风能研究。 **通信作者：**黄典贵，研究员，E-mail: dghuang@usst.edu.cn

L 为前缘前微小圆柱距离叶片前缘的距离，d 为前缘前微小圆柱的直径。

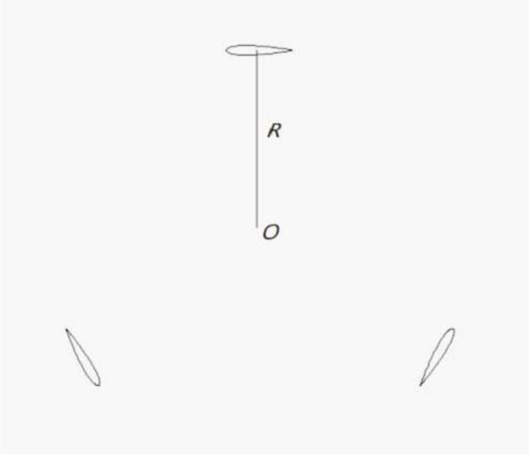

图 1 垂直轴风力机的轴向截面示意图

Fig.1 Schematic of the cross section of VAWT

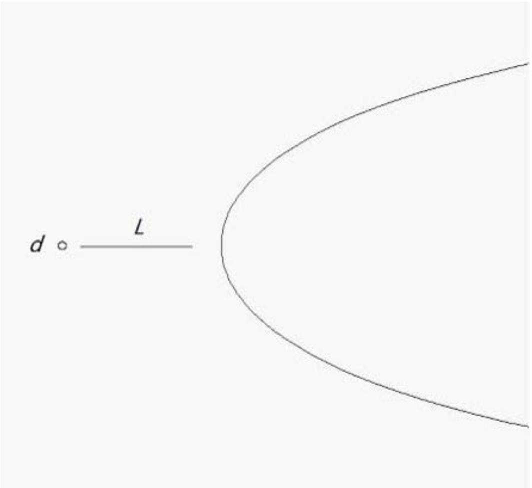

图 2 叶片前缘前设置微小圆柱示意图

Fig.2 Schematic of the micro-cylinder in front of blade leading edge

程序基于三维结构化网格，整个计算域采用结构网格，外边界距翼型弦长中心为 80 c，尽量减小边界对风力机流场的影响。同时，对叶片和微小圆柱近壁面进行了加密处理。图 3 为整个计算域网格；图 4 为翼型附近网格。

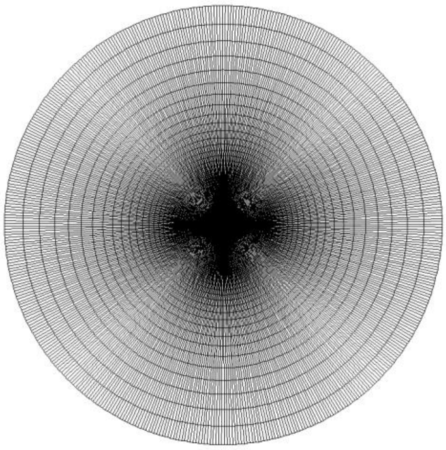

图 3 整个计算域网格

Fig.3 Whole mesh of VAWT

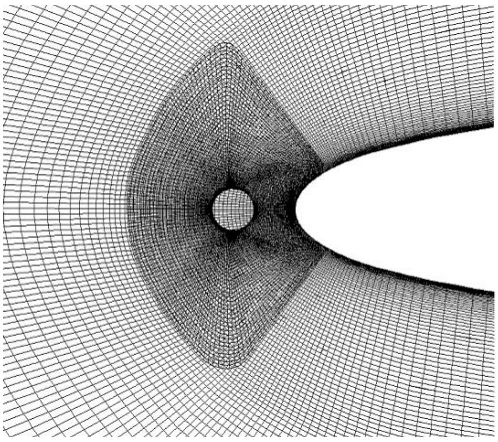

图 4 翼型附近网格

Fig.4 Mesh around the airfoil

2 数值方法

本文通过求解二维不可压非定常 N-S 方程来数值模拟风力机流场，选用 Spalart-Allmaras (S-A)湍流模型，空间采用 Roe's 三阶迎风格式，计算域外边界为圆形，边界条件设置为速度进出口，翼型和微小圆柱的边界条件设为无滑移壁面，流场来流 x 方向马赫数 M_a 为 0.0294。

3 计算结果及分析

3.1 前缘前设置与未设置微小圆柱时翼型的气动性能的比较

3.1.1 模型验证

为了验证数值模拟的可靠性，本文首先模拟了单个 NACA0012 翼型在雷诺数 R_e 为 6000000 的情况下，该翼型升阻力系数随来流攻角改变而变化的情况，并将计算结果与修正后的实验值[5]进行了比

较。图 5 为不同攻角下 ，翼型升阻力系数的计算值与实验值的对比图。

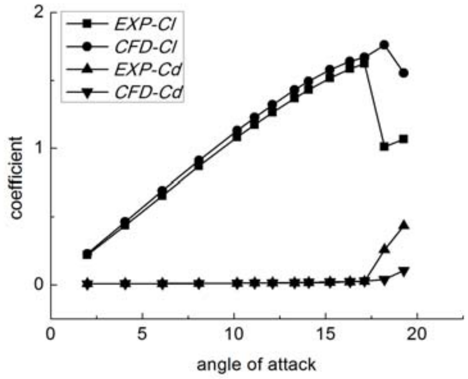

图 5 不同攻角下升阻力系数对比图

Fig.5 Comparison of the lift and drag coefficient between experiment and numerical simulation at various attack angle

从图 5 中可以看出，攻角在 17 °之前升阻力系数与实验值都拟合得较好，但在大攻角下出现了一定的偏差。这与数值模拟时采用二维非定常模拟，忽略了实际的三维效应有关，且在大攻角情况下，叶片上出现了流动分离，流动变得复杂。但从总体上来看，本文所采用的网格与计算程序用于该类翼型的模拟还是可靠的。

3.1.2 前缘前设置与未设置微小圆柱时翼型的气动性能的比较

影响采用微小圆柱抑制翼型上流动分离效果的主要因素有：微小圆柱的直径 d 和微小圆柱距离翼型前缘距离 L。因此，本文首先对微小圆柱的直径 d 和微小圆柱距离翼型前缘距离 L 进行了初步优化。当来流速度为 10 m/s，攻角 18 °时得到的数值模拟结果如图 6 所示。

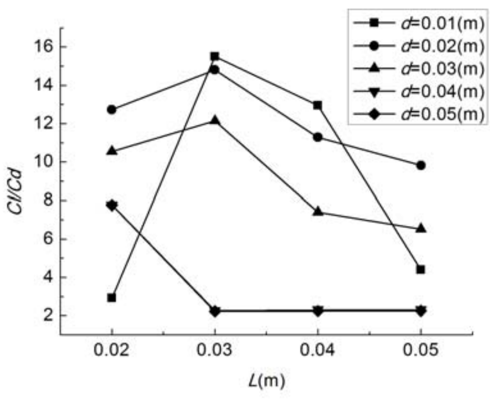

图 6 不同 d 和 L 的升阻比数值模拟结果

Fig.6 Lift-drag ratio at various L and d

从图 6 可以看出，在攻角为 18°的工况下，微小圆柱距离叶片前缘距离 L 为 0.03 m 和 0.04 m 时，微小圆柱直径的增大，可使翼型的升阻比降低，同时微小圆柱直径 d 为 0.02 m 和 0.03 m 时，距离翼型前缘太近或太远都可导致翼型的升阻比降低。适当的微小圆柱的 d 和 L 能使翼型的升阻比提高，不适当的微小圆柱的 d 和 L 使翼型的升阻比下降。表 1 给出了在来流风速为 10 m/s，攻角为 18 °情况下，前缘前未加微小圆柱时的 NACA0012 翼型的升阻力系数与升阻比，并与在该翼型前加直径为 0.01 m，距翼型前缘 0.03 m 的微小圆柱后翼型的升阻力系数和升阻比进行对比。

表 1 设置微小圆柱前后的升阻力系数和升阻比对比

Table 1 Comparison of C_l, C_d and C_l/C_d between NACA0012 and NACA0012 with micro-cylinder

	C_l	C_d	C_l/C_d
NACA0012	0.8928	0.1500	5.95
设置微小圆柱	1.4481	0.09338	15.51

从表 1 可以看出：前缘前加了微小圆柱后的翼型，其升力系数可提高 60%以上，且阻力系数有所降低，使得翼型的升阻比得到提高。图 7 和图 8 为在 18 °攻角下，在 NACA0012 翼型前缘前适当位置处未设置和设置了微小圆柱后翼型周围流线变化的比较。

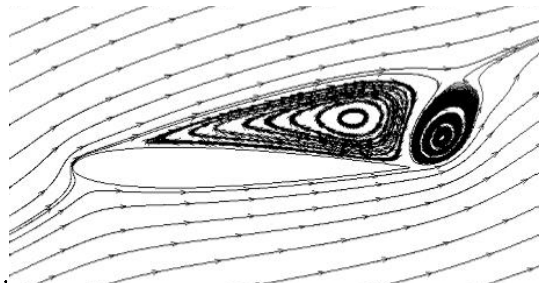

图 7 翼型前缘前未设置微小圆柱时的流线图

Fig.7 Streamlines of NACA0012 at 18 ° attack angle

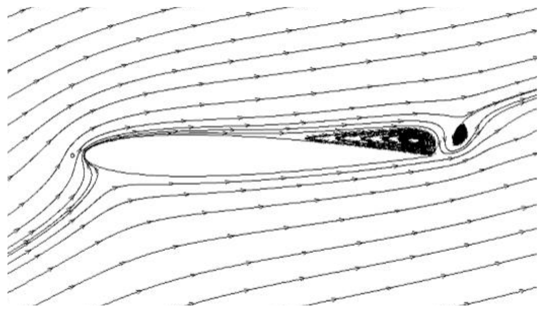

图 8 翼型前缘前设置微小圆柱时的流线图

Fig.8 Streamlines of NACA0012 with micro-cylinder at 18 ° attack angle

可以看出，在翼型前缘前设置微小圆柱后，翼型上原有的较大的流动分离泡（如图 7 所示）变成了靠近翼型尾缘处的很小的分离泡（如图 8 所示），翼型上的流动分离得到了显著抑制。

在以上数值模拟结果的基础上，试图将这种流动控制的方法进一步应用到升力型垂直轴风力机的叶片上，当风力机叶片处于大攻角工况运行时，采用这种方法可以有效推迟或抑制叶片上的流动分离，提高风力机叶片的气动性能。

3.2 风力机叶片前缘前设置微小圆柱后的气动性能分析及与传统风力机结果的比较

在模拟叶片前缘前设置微小圆柱的升力型垂直轴风力机之前，本文先对文献 4 中的升力型垂直轴风力机进行数值模拟。模拟结果与实验值相比，最佳风能利用率所对应的叶尖速比基本一致，但最佳风能利用率偏高。风能利用率偏高与数值模拟时采用二维非定常模拟，忽略了实际三维效应有关。综上，本文所采用的网格与计算程序是有效的。接着，本文对叶片前缘设置微小圆柱的风力机的气动性能进行数值模拟。

影响采用微小圆柱抑制风力机叶片上流动分离效果的主要因素有：微小圆柱的直径 d 和微小圆柱距离叶片前缘距离 L。因此，本文对微小圆柱的直径 d 和微小圆柱距离风力机叶片前缘距离 L 进行了初步优化。当来流速度为 10 m/s，叶尖速比为 1.1 时，采用不同 d 和 L 时的风力机风能利用率的模拟结果如图 9 所示。

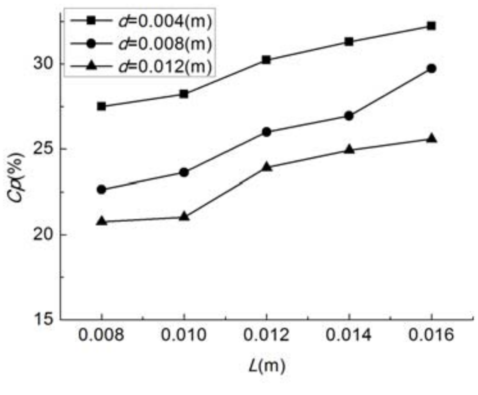

图 9 叶尖速比 1.1 时不同设置微小圆柱工况的 C_p 对比图

Fig.9 Wind energy utilization efficiency of various L and d at 1.1 tip speed ratio

从图 9 可以看出，随着微小圆柱直径 d 的增加，风力机的风能利用率有所下降，但随着距离 L 的增加，风能利用率则在不断增加。图 10 给出了距离 L 为 0.02 m，直径 d 为 0.001 m 的微小圆柱设置与未设置微小圆柱的风力机 C_p 在低叶尖速比下的变化曲线。

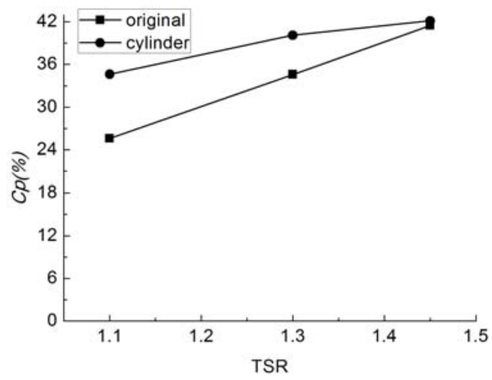

图 10 设置小圆柱前后 C_p 随叶尖速比变化图

Fig.10 Comparison of wind energy utilization efficiency between regular VAWT and VAWT with micro-cylinder at various tip speed ratio

从图 10 中可以看出，在低尖速比 1.1 的情况下，叶片前缘前设置微小圆柱后的风力机 C_p 比传统风力机提高了 9%。在低尖速比情况下，前缘前设置微小圆柱对风力机气动性能的提高是非常显著的。图 11 和图 12 分别给出了在叶尖速比 1.1 时风力机叶片前缘前适当位置处未设置和设置了微小圆柱的流线图。

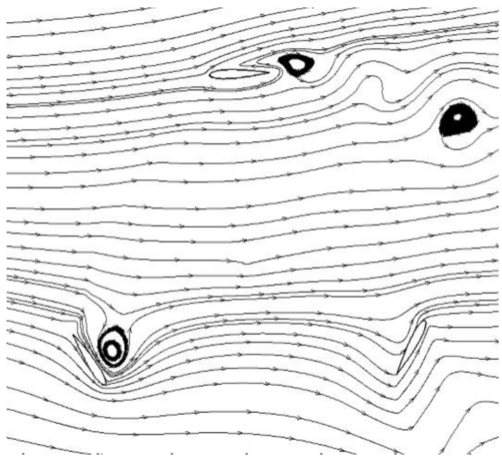

图 11 某时刻风力机叶片前缘前未设置微小圆柱流线图

Fig.11 Streamlines of regular VAWT

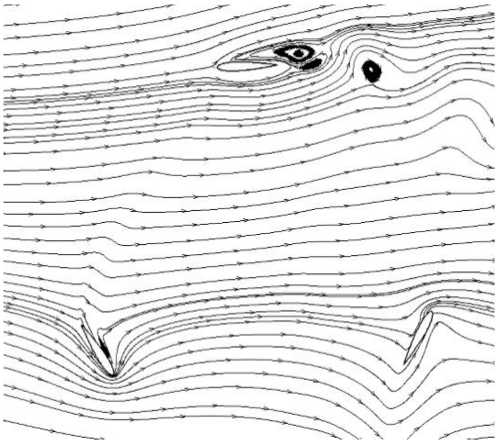

图 12 某时刻风力机叶片前缘前设置微小圆柱流线图

Fig.12 Streamlines of VAWT with micro-cylinder

从图 11、12 中可以看出，在左下角位置，通过在叶片前缘前设置微小圆柱，叶片上原有的大流动分离泡被抑制，从而改善了风力机叶片的气动性能，提高了升力型垂直轴风力机在低尖速比下的风能利用率。

4 结论

本文针对风力机叶片在大攻角下运行易产生流动分离的特征，提出了一种在风力机叶片前缘前设置微小圆柱来提高风力机叶片气动性能的流动控制方法，并采用课题组自主研发的计算软件 UCFD 对该流动控制方法的有效性进行了数值模拟研究，得到以下结论：

(1) 在大攻角情况下，在翼型前缘前设置微小圆柱可以有效的抑制翼型上的流动分离，起到增升减阻的作用；

(2) 与传统垂直轴升力型风力机相比，在低尖速比下，叶片前缘前设置微小圆柱后的升力型垂直轴风力机的风能利用率有明显提高，如在叶尖速比为 1.1 的工况下，在风力机叶片前加设优化后的微小圆柱，风力机的风能利用率可提高 9%。

参考文献

[1] 张志英. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010

ZHANG Zhiying. Wind Energy and Wind Power Technology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2010

[2] Sandar E, Hans B, Mats L. Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008(12): 1419--1434

[3] 黄典贵. 一个通用的流体力学计算软件及其考核[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10): 1703--1706

HUANG Diangui. A Common Unified Computational Fluid Dynamic Software and its Validation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10): 1703--1706

[4] Bravo R, Tullis S, Ziada S. Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine. 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, Toronto, Ontario, Canada 2007

[5] Ladson, C L. Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section. NASA TM 4074, 1988