

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312186

风电叶片涡流发生器的作用与参数设计

张照煌, 杨方超, 李魏魏

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 为抑制叶片表面流动分离, 提升叶片气动性能, 提出在叶片表面安装涡流发生器的设计方案。以 DU97-W-300 叶片段设置涡流发生器为研究对象, 采用正交实验设计方法, 探究该叶片段涡流发生器高度、长度、安装角、弦向安装位置、间距、节距对叶片气动性能的影响, 从而确定涡流发生器参数设计基本规律。研究结果表明: 影响叶片气动性能大小的涡流发生器参数依次为涡流发生器间距、节距、长度、高度、弦向安装位置、安装角; 最优涡流发生器参数组合规律为高度 0.75ξ (ξ 为叶片边界层厚度)、长度 1.60ξ 、安装角 20.0° 、弦向安装位置 10% 叶片弦长、间距 1.60ξ 、节距 0.80ξ , 可以使该叶片最大升力系数增大 40% , 最大失速攻角增大 9.5° 。

[关键词] 涡流发生器; 正交实验; 气动性能; 风电叶片

[引用本文格式] 张照煌, 杨方超, 李魏魏. 风电叶片涡流发生器的作用与参数设计[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 48-57.
ZHANG Zhaohuang, YANG Fangchao, LI Weiwei. The effect and parameter design of wind turbine blade vortex generator[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 48-57.

The effect and parameter design of wind turbine blade vortex generator

ZHANG Zhaohuang, YANG Fangchao, LI Weiwei

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to inhibit the flow separation on blade surface and improve the aerodynamic performance of the blade, the design scheme of installing vortex generator on the blade surface is proposed. Taking DU97-W-300 blade section with vortex generator as the research object, the orthogonal experimental design method is used to investigate the influences of height, length, installation angle, chord installation position, spacing and pitch of the vortex generator on the aerodynamic performance of the blade section, so as to determine the basic law of vortex generator parameter design. The results show that, the vortex generator parameters that affect the magnitude of aerodynamic performance of the blade are as follows: spacing, pitch, length, height, chord installation position, and installation angle of the vortex generator. The optimal vortex generator parameter combination law is: height of 0.75ξ (ξ is blade boundary layer thickness), length of 1.6ξ , installation angle of 20° , chord installation position is 10% blade chord length, spacing of 1.6ξ , pitch of 0.8ξ , which can increase the maximum lift coefficient of this blade by 40% and the maximum stall angle of attack by 9.5° .

Key words: vortex generator; orthogonal experiment; aerodynamic performance; wind turbine blade

随着化石燃料逐渐耗尽和“双碳”战略的驱动, 各国对可再生能源的发展都给予了高度重视^[1]。风能由于存储量大、分布广等特点^[2], 受到广泛关注, 风力发电是风能利用的主要方式, 捕捉风能的关键部件为风力机叶片^[3]。当前对风力机叶片的设计日臻成熟, 但在实际应用中叶片边界层普遍存在流动分离现象^[4]。这不仅严重制约叶片捕获风能的效率,

同时还会引起叶片载荷分布不均, 对叶片结构造成破坏^[5]。因此, 抑制叶片边界层流动分离、提升叶片动力性能成为众多学者的研究方向。

涡流发生器一般是沿叶片径向布置的 1 列小板, 并以给定的安装角垂直固定在叶片表面边界层内^[6]。因其展弦比小, 故能产生高强度的诱导涡, 将边界层外的高能量流体与边界层内流体混合, 增

收稿日期: 2023-12-18 网络首发日期: 2024-02-20

第一作者简介: 张照煌 (1963), 博士, 教授, 主要研究方向为先进施工装备及技术和可再生能源利用技术, zh_zhaohuang@163.com。

通信作者简介: 杨方超 (1996), 硕士, 主要研究方向为可再生能源利用技术, 884468936@qq.com。

强了边界层内流体的能量,从而控制叶片表面流体的流动分离^[7]。涡流发生器是在20世纪40年代由美国联合飞机公司的Taylor和Bmyes等人首次提出并安装在飞机机翼上,研究发现涡流发生器可以推迟机翼边界层流动分离,有效提升飞机升力^[6]。60年代Peake等人^[8]研究涡流发生器对平板边界层流动的影响,提出涡流发生器能够提升减阻在于它可以向边界层内注入新的能量。90年代以来,鉴于涡流发生器可以有效抑制边界层的流动分离现象^[9],逐渐研究涡流发生器在风力机叶片上的应用。Miller G E^[10]将涡流发生器安装在Mod-2型风力机叶片上,发现不仅能提升年发电量,还可以降低额定风速。Griffin D A^[11]将涡流发生器安装在AWT-26型风力机叶片上,发现不仅能提升发电量,还会降低叶片载荷,间接改善叶片的结构强度。Gyatt G W^[12]通过风洞实验发现,涡流发生器位置越靠近叶片尖部,风力机叶片转化风能效率会更高,并且会降低对前缘粗糙度的敏感度。Baldacchino等人^[13]研究发现:涡流发生器安装位置应在层流到湍流转捩点之前;而涡流发生器高度较小时,不能产生足够的流向涡量来抑制分离。Li等人^[14]通过风洞实验对安装不同高度的涡流发生器叶片进行研究,发现涡流强度与涡流发生器高度呈对数关系。MartínezFilgueira等人^[15]研究发现,涡流发生器高度为叶片边界层厚度的0.2~0.8倍时风力机叶片转化风能效率更高,涡流发生器的高度增加会增大叶片阻力,高度降低则会减小叶片升力。Gao等人^[16]研究涡流发生器对由DU97-W-300翼型构成的叶片气动性能影响时发现:涡流发生器效率与其高度、长度、间距有关,高度增加,相较于叶片升力的提升,叶片阻力增大更明显;叶片长度增加,在降低叶片升力的同时增大了叶片阻力;相邻涡流发生器间距适当增大,有利于抑制叶片表面的流动分离。李宝山等^[17]研究了涡流发生器高度和长度对叶片气动性能的影响,得出了涡流发生器高度与长度之间相关的选取规律。Wang等人^[18]研究涡流发生器对NACA 0018翼型叶片的影响,发现涡流发生器形状为矩形、安装角为 16° 、弦向安装位置为 $20\%c$ (c 为叶片弦长)时,将叶片失速攻角从 14° 延迟到 16° ,最大升力系数增大了37.5%。张惠等^[19]研究了涡流发生器形状以及弦向安装位置对叶片气动性能的影响,通过风洞实验发现相较于矩形、梯形,三角形涡流发生器提升效果最好,对于涡流发生器不同

弦向安装位置对流动分离的影响,发现在 $20\%c$ 处抑制流动分离效果最佳。

上述对于涡流发生器对风力机叶片气动性能的影响,均对部分参数进行了分析,但并没有对涡流发生器整体参数(长度、安装角、弦向安装位置、高度、间距、节距)进行研究。因此,为使涡流发生器在风力机叶片上发挥最优边界层控制效果,本文将对涡流发生器的整体参数包括长度、安装角、弦向安装位置、高度、间距、节距进行研究,为减少实验次数,通过正交实验方法对研究模型进行简化,分析适用于风力机叶片的涡流发生器的最优布置方式。

1 计算模型及其有效性验证

1.1 计算模型

涡流发生器形状种类繁多,大致可分为机翼形、楔形、叶栅形、三角形、梯形等,而目前三角形涡流发生器应用最为广泛^[20],具有一定代表性,故以安装三角形涡流发生器的DU97-W-300翼型构成的叶片为研究对象。叶片弦长为 c ,在叶片吸力面安装4对涡流发生器,形状为三角形,涡流发生器安装角为 β ,弦向安装位置为 S ,间距为 S_1 ,节距为 S_2 ,高度为 H ,长度为 L ,涡流发生器参数如图1所示。仿真计算域如图2所示,外形长度为 $40c$,宽度为 $20c$,高度与叶片段厚度相同为 W , $W=5S_2+4S_1$ 。

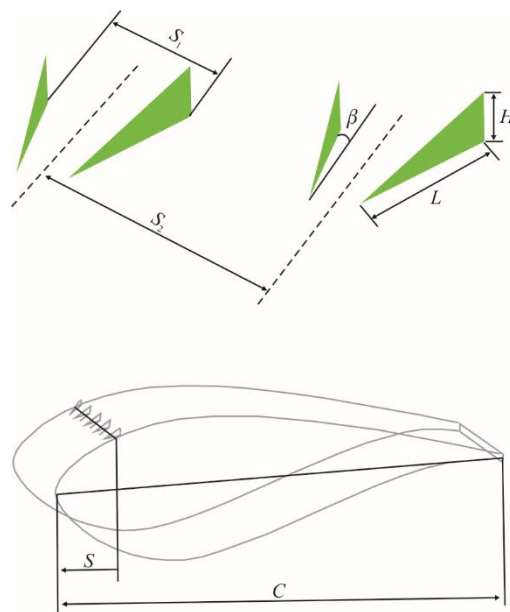
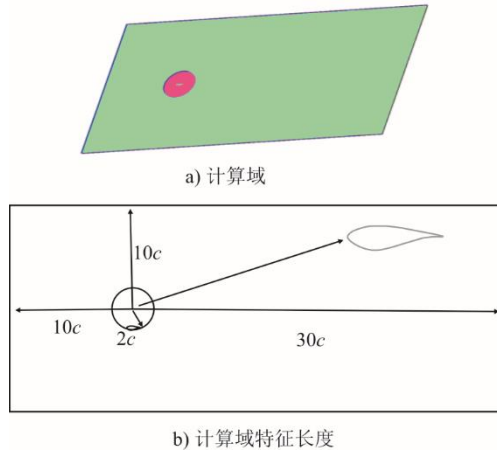


图1 涡流发生器参数示意

Fig.1 Schematic diagram of vortex generator parameters



b) 计算域特征长度

图 2 计算域模型
Fig.2 The computational domain model

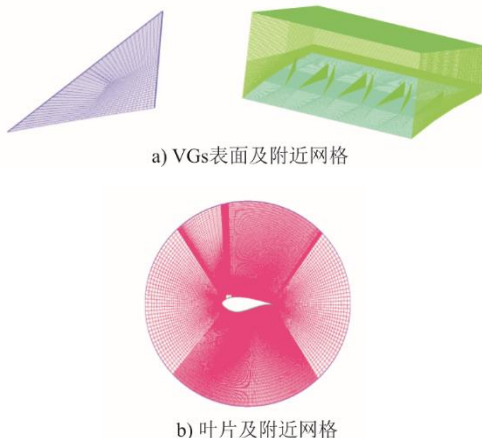
1.2 网格划分方法

采用 ICEM 对计算域进行结构化网格划分^[21], 由于涡流发生器的形状较为复杂、尺寸较小, 如果将其与叶片放到同一个域进行网格划分, 很难在网格数量和网格质量找到平衡。故对涡流发生器及其附近区域进行分块划分网格^[22], 生成网格如图 3 所示。叶片表面边界层流场变化复杂, 为精确模拟涡流发生器对叶片边界层流场影响情况, 本文叶片参数设置为: 弦长 c 为 0.6 m, 雷诺数 $Re=2 \times 10^6$, 叶片首层近壁面网格高度 0.08 mm, 满足 $y^+ \leq 1$ ^[23]。

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (1)$$

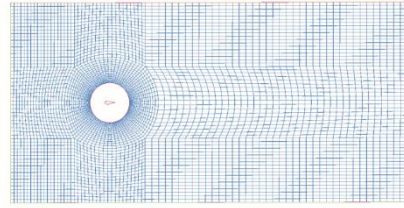
式中: y 为首层网格距离壁面的高度, m; u_τ 为流体的剪切速度, m/s; ν 为流体的运动黏度, m^2/s 。

为分析叶片不同攻角时的气动性能, 以叶片弦长中点为圆心, 半径为 $2c$ 所形成的圆形区域划分为旋转域^[24], 生成网格如图 3b) 所示, 其圆形区域的特征长度分布如图 2b) 所示, 其余区域流场参数变化不大, 生成网格如图 3c) 所示。



a) VGs表面及附近网格

b) 叶片及附近网格



c) 其余网格

图 3 网格划分示意
Fig.3 Schematic diagram of meshing

1.3 数值模拟方法

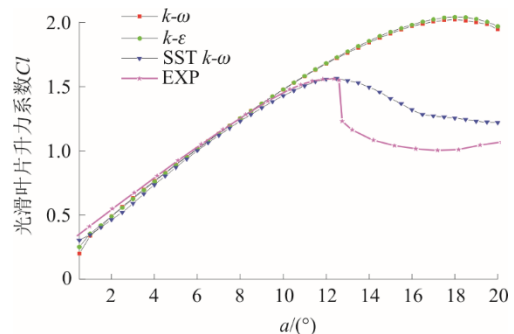
计算流体动力学 CFD 计算软件有许多类型, 比较常用的有 Fluent、CFX、OpenFORM 等^[25]。由于 CFX 软件可有效降低时间成本, 保证计算精度, 因此本文采用 CFX 作为仿真软件^[26]进行计算。湍流模型分别选用 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 、SST $k-\omega$, 对于求解精度的差分格式设为 High Resolution, 控制方程的差分格式采用 second order backward euler。计算域左侧为速度入口 (inlet), 右侧为压力出口 (pressure outlet), 上下两侧设为 Free Slip Wall, 翼型及涡流发生器表面设为 No Slip Wall, 流域交界面设置为 interface (图 2b))。流体选取 Air Ideal Gas, 雷诺数为 2×10^6 , 根据式(2)得到速度入口风速为 48.7 m/s。

$$Re = \frac{\rho U c}{\nu} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; U 为流体来流速度。

1.4 湍流模型选取及验证

为选取有效的湍流模型, 将模拟结果与荷兰 Delf 大学研究者^[27]在风洞试验中 DU97-W-300g 光滑叶片段的结果进行比较, 升力系数对比如图 4 所示。

图 4 不同湍流模型下光滑叶片升力系数与实验数据对比
Fig.4 Comparison of clean blade lift coefficients with experimental data under different turbulence models

由图 4 可见: DU97-W-300 叶片段在 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 、SST $k-\omega$ 3 种湍流模型下, 其失速攻角分别为 18.0° 、 18.0° 、 12.5° , 对应的最大升力系数分别为 2.043、2.023、1.564; 而风洞实验 (Delf) 中叶片失速攻角

为 12.5° ，对应的最大升力系数为 1.562。由此可见，这 3 种湍流模型中 SST $k-\omega$ 模型下的升力系数与风洞实验值比较符合，因此后续模拟中应采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。

1.5 网格和时间步长无关性验证

网格质量影响 CFD 计算精度，在结构化网格中，网格点布置越密集，计算精度越高，但时间成本也越高^[28]。当网格加密到一定程度时，CFD 仿真结果变化不大，故需对网格进行无关性验证。设置 3 套首层近壁面网格高度满足 $y^+ \leq 1$ 的网格方案，网格数量分别为 140 万、280 万以及 380 万，仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见，网格数量为 280 万与 380 万的升力系数基本保持一致，故本文选用网格数量为 280 万的网格划分方法。

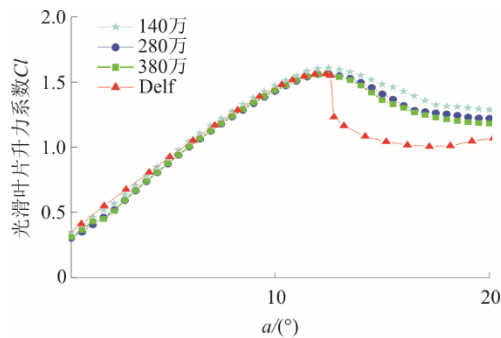


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Mesh-independence verification

时间步长过大会影响非定常流动模拟计算结果，过小会增加不必要的时间成本，因此需要对时间步长进行无关性分析，选取合适的时间步长^[28]。设置 3 套时间步长来进行无关性验证，分别为 0.050、0.025、0.010 s，每个时间间隔最大协同循环数 (maximum number of coefficient loops) 设为 30。时间步长无关性验证结果如图 6 所示。由图 6 可见，时间步长为 0.025 s 和 0.010 s 的仿真结果接近，考虑到时间成本，选用时间步长为 0.025 s。

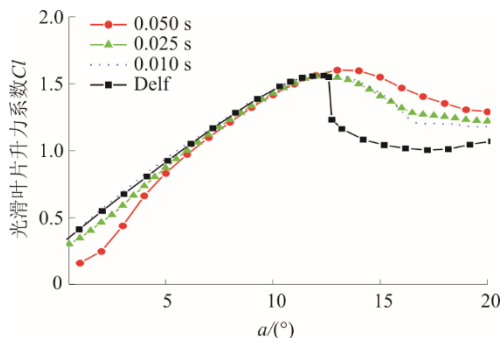


图 6 时间步长无关性验证

Fig.6 Time-step independence verification

1.6 模拟方法可靠性验证

为进一步验证 CFD 方法的可靠性，采用之前所述的模拟方法，依据荷兰 Delf 大学^[27]加装三角形涡流发生器叶片段建立仿真模型。模型叶片弦长 c 为 0.6 m，涡流发生器高度为 5.0 mm，长度为 17.0 mm，弦向安装位置为 $20\%c$ ，安装角为 16.4° ，间距为 10.0 mm，节距为 20.0 mm。将 CFD 计算结果与风洞实验数据对比，结果如图 7 所示。

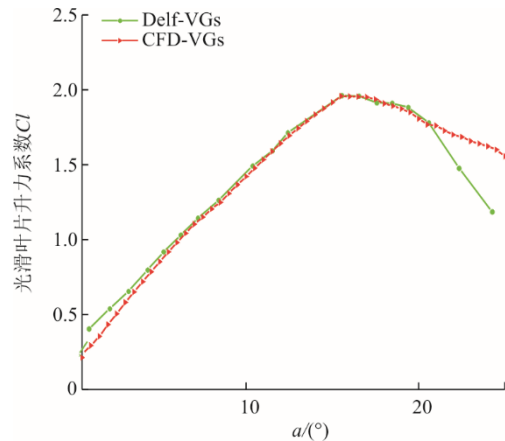


图 7 DU97-W-300 叶片段加装涡流发生器升力系数与实验数据对比

Fig.7 The lift coefficient of DU97-W-300 blade section with vortex generator and the experimental data

由图 7 可见：在攻角 20.0° 之前，加装涡流发生器 DU97-W-300 叶片段的 CFD 仿真结果与风洞实验中数值基本吻合；但在 20.0° 之后会出现较大的偏差，风洞实验中升力系数下降幅度明显高于 CFD。Zhang 等人^[26]认为产生偏差的原因是在大攻角下风洞实验会存在额外的动量损失。总体来看，本文所建立的模型能够有效反映叶片的气动性能变化趋势。

2 正交实验

2.1 正交实验设计

涡流发生器通过产生诱导涡对叶片边界层流动进行控制，诱导涡强度越高，抑制边界层流动分离现象越显著，提升叶片气动性能的能力越强^[26]。涡流发生器参数都会对诱导涡产生影响，并且各因素都具有关联性，研究涡流发生器高度 H 、长度 L 、安装角 β 、弦向安装位置 S 、间距 S_1 、节距 S_2 6 种因素进行正交实验^[29]，每个参数因素考虑 5 个水平，建立 6 因素 5 水平 $L_{25}(56)$ 的正交实验设计，正交实验因素水平见表 1。

表1 涡流发生器因素水平
Tab.1 The vortex generator factor levels

水平 (i)	因素					
	H/mm	L/mm	$\beta/(\circ)$	S	S_1/mm	S_2/mm
1	3	5	5	10% <i>c</i>	10	10
2	6	10	10	20% <i>c</i>	15	15
3	9	15	15	30% <i>c</i>	20	20
4	12	20	20	40% <i>c</i>	25	25
5	15	25	25	50% <i>c</i>	30	30

2.2 正交实验结果

鉴于涡流发生器对叶片失速以后发挥效果显著^[5], 故以 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$ (攻角 α 范围为 $12.5^\circ\sim 20.0^\circ$ 时加装涡流发生器后叶片段升阻比的均值) 作为涡流发生器边界层控制性能的评价指标。 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$ 越大表示此时涡流发生器能够更加有效抑制边界层流动分离。通过表1进行正交实验设计以及CFX仿真计算, 得到涡流发生器方案及评价指标, 结果见表2。

表2 涡流发生器方案及评价指标
Tab.2 The vortex generator schemes and evaluation indexes

方案	H/mm	L/mm	$\beta/(\circ)$	S	S_1/mm	S_2/mm	$\overline{\Delta(Cl/Cd)}$
11	3	5	5.0	10% <i>c</i>	10	10	19.160
12	3	10	15.0	40% <i>c</i>	30	15	11.513
13	3	15	25.0	20% <i>c</i>	25	20	15.771
14	3	20	10.0	50% <i>c</i>	20	25	17.452
15	3	25	20.0	30% <i>c</i>	15	30	11.983
21	6	5	25.0	40% <i>c</i>	20	30	12.101
22	6	10	10.0	20% <i>c</i>	15	10	24.000
23	6	15	20.0	50% <i>c</i>	10	15	19.447
24	6	20	5.0	30% <i>c</i>	30	20	13.707
25	6	25	15.0	10% <i>c</i>	25	25	21.042
31	9	5	20.0	20% <i>c</i>	30	25	9.5610
32	9	10	5.0	50% <i>c</i>	25	30	17.306
33	9	15	15.0	30% <i>c</i>	20	10	29.224
34	9	20	25.0	10% <i>c</i>	15	15	28.799
35	9	25	10.0	40% <i>c</i>	10	20	20.549
41	12	5	15.0	50% <i>c</i>	15	20	16.998
42	12	10	25.0	30% <i>c</i>	10	25	13.900
43	12	15	10.0	10% <i>c</i>	30	30	10.553
44	12	20	20.0	40% <i>c</i>	25	10	28.692
45	12	25	5.0	20% <i>c</i>	20	15	17.242
51	15	5	10.0	30% <i>c</i>	25	15	14.274
52	15	10	20.0	10% <i>c</i>	20	20	32.409
53	15	15	5.0	40% <i>c</i>	15	25	14.308
54	15	20	15.0	20% <i>c</i>	10	30	18.756
55	15	25	25.0	50% <i>c</i>	30	10	15.751

通过CFX仿真计算, 得出了正交实验的25组

涡流发生器方案的 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$, 为方便表示公式记为 σ_{ij} , i 与 j 组合表示实验方案的序列。为分析涡流发生器长度、高度、安装角、节距、间距、弦向安装位置对叶片气动性能的影响程度, 根据正交实验, 定义参数 k_i , 其中涡流发生器高度、长度、安装角、弦向安装位置、间距、节距分别记为 k_i^H 、 k_i^L 、 k_i^β 、 k_i^S 、 $k_i^{S_1}$ 、 $k_i^{S_2}$:

$$k_i^H = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^5 \sigma_{ij} \quad (3)$$

$$k_i^L = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^5 \sigma_{ij} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} k_1^\beta \\ k_2^\beta \\ k_3^\beta \\ k_4^\beta \\ k_5^\beta \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \left[\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{14} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{15} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{24} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{25} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{32} \\ \sigma_{35} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{34} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{45} \\ \sigma_{43} \\ \sigma_{41} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{42} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{53} \\ \sigma_{51} \\ \sigma_{54} \\ \sigma_{52} \\ \sigma_{55} \end{pmatrix} \right] \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} k_1^S \\ k_2^S \\ k_3^S \\ k_4^S \\ k_5^S \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \left[\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{15} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{14} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{25} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{24} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{34} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{35} \\ \sigma_{32} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{43} \\ \sigma_{45} \\ \sigma_{42} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{41} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{52} \\ \sigma_{54} \\ \sigma_{51} \\ \sigma_{53} \\ \sigma_{55} \end{pmatrix} \right] \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} k_1^{S_1} \\ k_2^{S_1} \\ k_3^{S_1} \\ k_4^{S_1} \\ k_5^{S_1} \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \left[\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{15} \\ \sigma_{14} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{23} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{25} \\ \sigma_{24} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{35} \\ \sigma_{34} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{42} \\ \sigma_{41} \\ \sigma_{45} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{43} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{54} \\ \sigma_{53} \\ \sigma_{52} \\ \sigma_{51} \\ \sigma_{55} \end{pmatrix} \right] \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} k_1^{S_2} \\ k_2^{S_2} \\ k_3^{S_2} \\ k_4^{S_2} \\ k_5^{S_2} \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \left[\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{14} \\ \sigma_{15} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{22} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{24} \\ \sigma_{25} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{33} \\ \sigma_{34} \\ \sigma_{35} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{32} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{44} \\ \sigma_{45} \\ \sigma_{41} \\ \sigma_{42} \\ \sigma_{43} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{55} \\ \sigma_{51} \\ \sigma_{52} \\ \sigma_{53} \\ \sigma_{54} \end{pmatrix} \right] \quad (8)$$

式中: i, j 取值均为1—5, $n=5$; k_i 为涡流发生器某参数保持不变, 其余参数变化时 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$ 之和的均值。

定义指标参数极差 Δk , Δk 反应涡流发生器某因素水平变动时 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$ 的变动幅度, 且 Δk 越大, 说明该因素对 $\overline{\Delta(Cl/Cd)}$ 的影响越大, 也就越重要。

$$\Delta k = \max_i k_i - \min_i k_i \quad (9)$$

将表2数据代入式(3)—式(8)中计算, 并将结果代入式(9), 结果见表3。

表 3 各评价指标平均值和极差
Tab.3 Average and range of evaluation indicators

因素	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	Δk
H	15.17	18.06	21.08	17.47	19.09	5.91
L	14.42	19.82	17.85	21.47	17.31	7.06
β	16.34	17.36	19.50	20.41	17.26	4.07
S	22.39	17.06	16.62	17.43	17.39	5.77
S_1	18.36	19.21	21.68	19.42	12.22	9.46
S_2	23.36	18.25	19.88	15.25	14.13	9.22

由表 3 可以看出, $k_3^H = \max_i k_i^H$ 、 $k_4^L = \max_i k_i^L$ 、 $k_4^\beta = \max_i k_i^\beta$ 、 $k_1^S = \max_i k_i^S$ 、 $k_3^{S_1} = \max_i k_i^{S_1}$ 、 $k_1^{S_2} = \max_i k_i^{S_2}$, 其所对应的涡流发生器参数分别为高度 9 mm、长度 20 mm、安装角 20.0°、弦向安装位置 10% c 、间距 20 mm、节距 10 mm。对此方案进行仿真分析, 其叶片的平均升阻比为 33.85, 因此, 实际涡流发生器最优参数组合为高度 9 mm、长度 20 mm、安装角 20.0°、弦向安装位置 10% c 、间距 20 mm、节距 10 mm。根据式(10)可得, 叶片边界层厚度 ξ 为 12 mm, 因此, 涡流发生器最优参数为高度 0.75 ξ , 长度 1.60 ξ , 安装角 20.0°, 弦向安装位置 10% c , 间距 1.60 ξ , 节距 0.80 ξ 。从表 3 可见, $\Delta k^{S_1} > \Delta k^{S_2} > \Delta k^L > \Delta k^H > \Delta k^S > \Delta k^\beta$ 。因此, 涡流发生器间距和节距是影响叶片气动性能的主要因素; 涡流发生器参数对叶片气动性能的影响从小到大的顺序是安装角、弦向安装位置、高度、长度、节距、间距。

$$\xi = \frac{0.37gc}{\sqrt[3]{Re}} \quad (10)$$

3 结果与讨论

本文主要探讨通过正交实验确立的涡流发生器模型对叶片气动性能的影响, 并将其荷兰 Delf^[27] 大学设计的涡流发生器模型进行比较。

3.1 对升力系数的影响

图 8 为光滑叶片 (clean)、荷兰 Delf 大学研究者提出的涡流发生器叶片 (Delf) 以及本文提出的涡流发生器叶片 (Op) 的升力系数对比。由图 8 可见, 当光滑叶片边界层流动分离之前, 升力系数随攻角呈现线性增长趋势, 但当攻角大于失速攻角之后, 由于叶片边界层流动分离现象加剧, 升力系数呈现下降趋势。而涡流发生器可以抑制叶片边界层的流动分离现象, 增大叶片升力以及失速攻角。由图 8 可见: Delf 大学设计的涡流发生器可以使叶片

的升力系数从 1.56 增大到 1.95, 失速攻角从 12.5° 增大到 15.0°, 本文提出的涡流发生器可以使叶片升力系数增大到 2.16, 提升了 40%; 失速攻角增大到 22.0°, 增大了 9.5°。与荷兰 Delf 大学涡流发生器相比, 本文设计出的涡流发生器可使最大升力系数提升 0.21, 失速攻角提升 7.0°, 并且失速之后升力系数变化更加平稳。

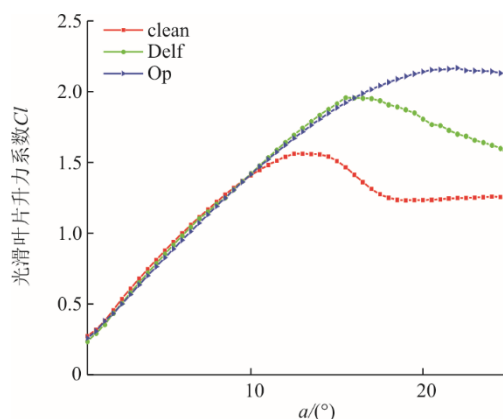
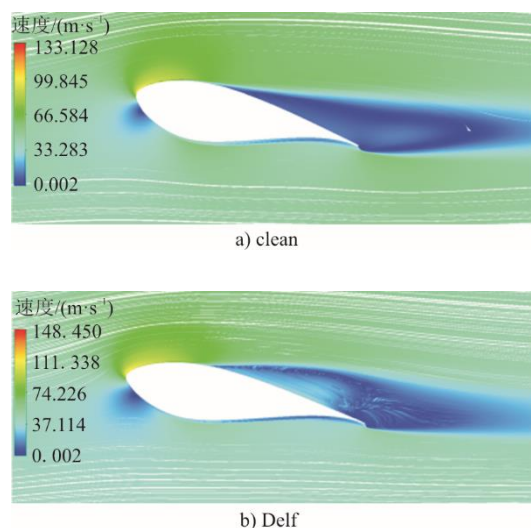


图 8 升力系数对比
Fig.8 Comparison of lift coefficients

图 9 为 α 为 18.0° 时, clean、Delf 以及 Op 的叶片展向中心剖面流场。由图 9 可见: 光滑叶片边界层已经出现严重的流动分离现象; 安装 Delf 大学设计的涡流发生器叶片流动分离现象虽有所减弱, 但也十分明显; 而安装本文设计的涡流发生器叶片并未出现流动分离现象。而这也与图 8 中 α 为 18.0° 时, clean、Delf 处于失速状态, 而 Op 仍处于升速状态的情况一致。表明本文提出的涡流发生器产生的诱导涡能更加有效地增强边界层流体能量, 从而更好地控制逆压梯度流动分离。



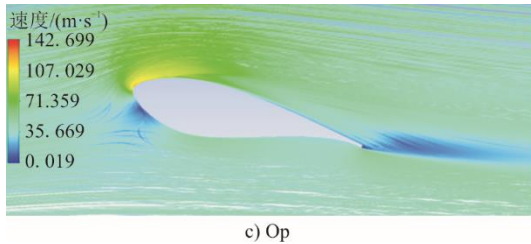
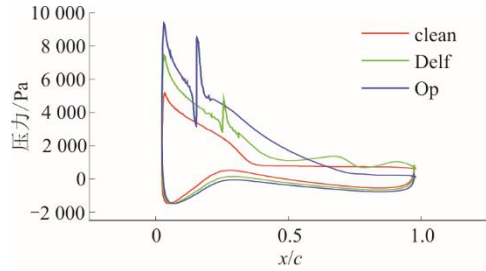


图9 叶片展向中心剖面流场
Fig.9 Flow field on the blade spreading center section

3.2 对叶片表面压力分布的影响

图 10 为不同攻角下涡流发生器对叶片压力分布的影响。叶片升力是由于叶片吸力面与压力面之间的压力差产生的，因此改善叶片的气动性能与改善叶片的压力分布影响效果一致^[17]。从图 10 可见，安装涡流发生器的位置处都会形成负压峰值与负压谷值。这是由于气流经过时，其两侧变成了压力面与吸力面，造成两侧压力的不平衡形成高能量的涡流，增强近壁面流体的能量，从而改善压力分布。与 Delf 相比，本文涡流发生器处的负压峰值与负压谷值均较大，这表明形成了强度更大的诱导涡。图 10 还显示，随着攻角增大，与 Delf 相比本文提出的涡流发生器影响叶片压力分布更显著，表明本文提出的涡流发生器性能更优。



c) α 为18.0°时叶片压力分布

图 10 叶片压力分布
Fig.10 Pressure distribution on the blade

3.3 对边界层下游流场的影响

图 11 为当气流经过三角形涡流发生器时，会在两侧从下表面翻越到上表面，卷而形成涡流，在尾缘脱落形成诱导涡（图 11）^[20]。比较各涡流发生器方案诱导涡的强度，可以更加全面反映本文方案的优劣。

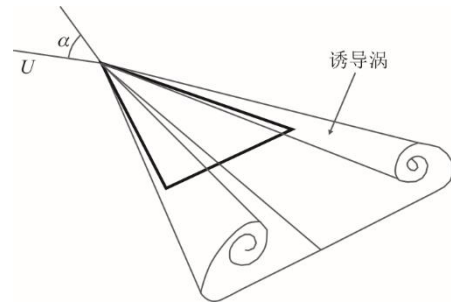


图 11 诱导涡形成示意

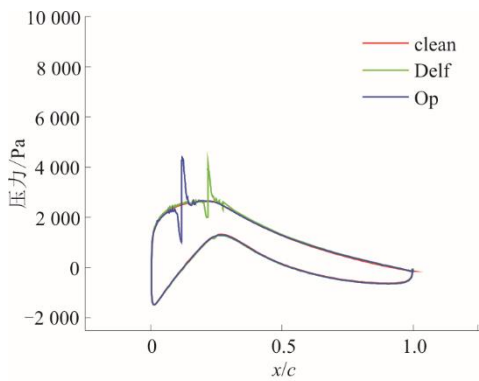
Fig.11 Schematic diagram of induced vortex formation

诱导涡产生环量公式^[20]为：

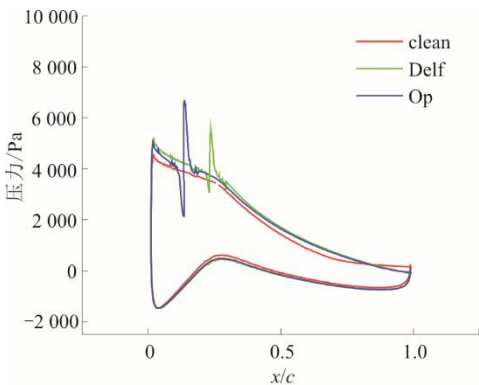
$$\Gamma = \frac{Uc\sin\alpha}{\pi} \times (\lambda_p \cos^2\alpha \sin\alpha + \lambda_v \sin^2\alpha \cos\alpha) \quad (11)$$

式中： λ_p 为涡致升力常数； λ_v 为势流升力常数。 λ_p 、 λ_v 具体计算方法见文献^[20]。

图 12、图 13 分别为荷兰 Delft 大学提出涡流发生器下游 4H 以及 8H 的速度，图 14、15 分别为本文提出涡流发生器下游 4H 以及 8H 的速度，此时攻角均为 18.0°。



a) α 为6.0°时叶片压力分布



b) α 为12.0°时叶片压力分布

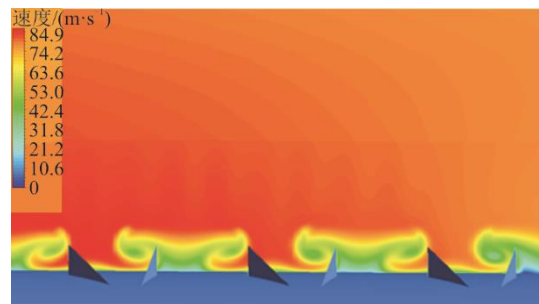


图 12 Delft 大学提出涡流发生器下游 4H 处的速度分布
Fig.12 Velocity cloud at 4H downstream of the proposed vortex generator at Delft University

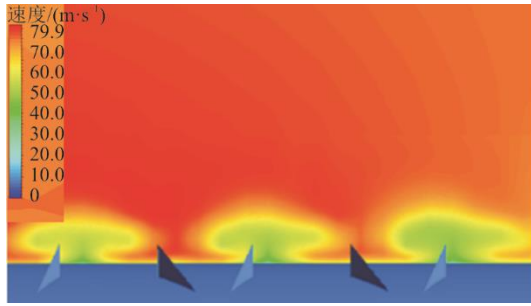


图 13 Delft 大学提出涡流发生器下游 8H 处的速度分布
Fig.13 Velocity cloud at 8H downstream of the proposed vortex generator at Delft University

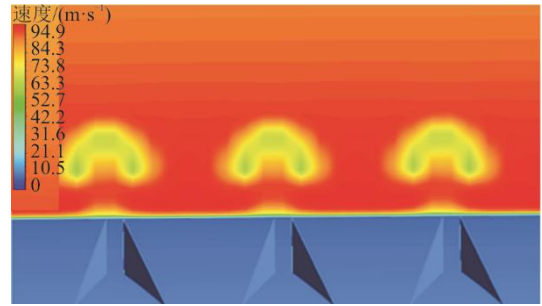


图 15 本文提出涡流发生器下游 8H 处的速度分布
Fig.15 Velocity cloud at 8H downstream of the proposed vortex generator in this paper

由图 12、图 13 可见：在 Delft 大学提出的涡流发生器下游 4H 处，涡流中心的绝对高度为 0.003 8 m，涡流旋转区域的速度区间为(51.3 m/s, 64.2 m/s)；在涡流发生器下游 8H 处，涡流中心的相对高度（与叶片表面之间的垂直距离）为 0.004 5 m，涡流旋转区域的速度区间为(33.4 m/s, 56.7 m/s)，这表明随着距离增加，涡流发生器作用逐渐减弱。

由图 14、图 15 可见，在本文提出的涡流发生器下游 4H 处，涡流中心的相对高度为 0.007 0 m，涡流旋转区域的速度区间为(73.6 m/s, 97.9 m/s)；在涡流发生器下游 8H 处，涡流中心的相对高度为 0.009 1 m，涡流旋转区域的速度区间为(64.3 m/s, 87.5 m/s)，跟 Delft 大学相比，本文提出涡流发生器产生的涡流旋转中心更高，旋转速度更快。

为进一步比较方案的优劣，仿真得到 α 为 18.0° 时叶片的涡量分布，结果如图 16 所示。由图 16 可见，安装 Delft 涡流发生器方案的叶片在后缘位置已经形成了十分明显的流动分离现象，而安装本文的涡流发生器方案的叶片涡量依然依附叶片近壁面而不致分离。这表明本文提出的涡流发生器产生的涡流强度越高，注入叶片近壁面流体的能量也越多，这也是本文提出涡流发生器方案对叶片气动性能更好的原因。

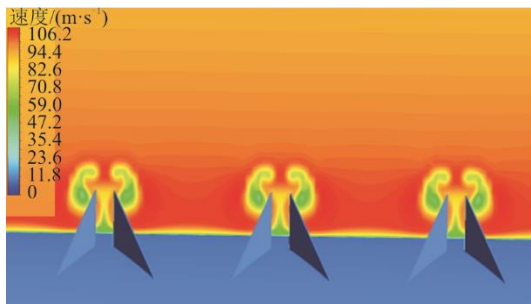


图 14 本文提出涡流发生器下游 4H 处的速度分布
Fig.14 Velocity cloud at 4H downstream of the proposed vortex generator in this paper

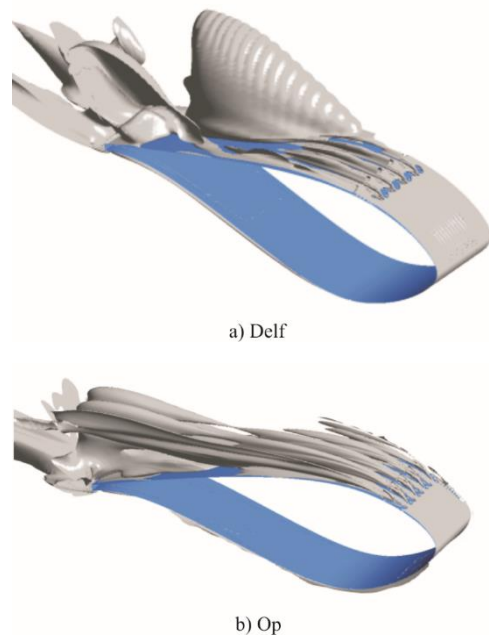


图 16 叶片涡量分布
Fig.16 Vortex distribution on the blade

4 结 论

本文通过正交实验对涡流发生器整体参数进行研究，以 $\overline{\Delta(C_l/C_d)}$ 作为评价指标，得到以下结论。

1) 涡流发生器参数对叶片气动性能的影响从小到大的顺序是安装角、弦向安装位置、高度、长度、节距、间距。

2) 在本论文工况条件下，涡流发生器参数最优组合为高度 9 mm、长度 20 mm、安装角 20.0° 、弦向安装位置 $10\%c$ 、间距 20 mm、节距 10 mm。结合边界层厚度 ζ ，涡流发生器最优参数组合规律为高度为 0.75ζ ，长度为 1.60ζ ，安装角 20.0° ，弦向安装位置为 $10\%c$ (c 为叶片弦长)，间距为 1.60ζ ，节距为 0.80ζ 。

3) 随着攻角增大，涡流发生器发挥作用越显著。

4) 与荷兰 Delft 大学相比，本文提出的涡流发

生器产生的诱导涡强度更大,抑制叶片边界层流动分离现象越显著,能使叶片升力系数提升 40%,最大失速攻角增大 9.5°。本文提出的方案具备一定的优势,可为涡流发生器实际应用提供参考。

[参考文献]

- [1] 姬锋军, 宋举星, 刘权, 等. 耦合风光储及热泵的 CCHP 系统集成优化与运行特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 103-112.
JI Fengjun, SONG Juxing, LIU Quan, et al. Research on integrated optimization and operation characteristics of CCHP system with wind-solar-storage and heat pump[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 103-112.
- [2] 孙佳. 风力机翼型双圆弧缝隙及对气流控制效果的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023: 1.
SUN Jia. Research on double circular gap of wind turbine airfoil and its effect on airflow control[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023: 1.
- [3] 刘启栋. 基于卷积神经网络的风机叶片损伤检测[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 88-93.
LIU Qidong. Wind turbine blade damage detection based on convolutional neural network[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 88-93.
- [4] 夏云松, 谭剑锋, 韩水, 等. 基于反向传播神经网络的风力机涡流发生器优化[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(11): 1492-1500.
XIA Yunsong, TAN Jianfeng, HAN Shui, et al. Optimization of wind turbine vortex generator based on back propagation neural network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(11): 1492-1500.
- [5] 杨英健. 大型风电叶片涡流发生器流动控制数值模拟研究[D]. 呼和浩特: 蒙古工业大学, 2023: 1.
YANG Yingjian. Numerical simulation study on flow control of vortex generator for large wind turbine blades[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2023: 1.
- [6] ZHAO Z, JIANG R, FENG J, et al. Researches on vortex generators applied to wind turbines: a review[J]. Ocean Engineering, 2022, 253: 111266.
- [7] 易礼毅, 凡盛, 胡杰桦, 等. 安装涡流发生器的风电机组气动性能的仿真分析[J]. 太阳能, 2022(10): 53-58.
YI Liyi, FAN Sheng, HU Jiehua, et al. Simulation analysis of aerodynamic performance of wind turbine installed with vortex generator[J]. Solar Energy, 2022(10): 53-58.
- [8] PEAKE D, HENRY F, PEARCEY H. Viscous flow control with air-jet vortex generators[C]//17th Applied Aerodynamics Conference. 1999: 3175.
- [9] 徐文峰, 邹世龙, 孙丹, 等. 吸力面前缘涡流发生器对压气机叶栅性能影响[J/OL]. 航空动力学报: 1-10 [2023-12-11]. <http://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp:20230485>.
XU Wenfeng, ZOU Shilong, SUN Dan, et al. Effect of suction leading edge vortex generator on characteristics of compressor cascade[J/OL]. Journal of Aerospace Power: 1-10 [2023-12-11]. <http://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp:20230485>.
- [10] MILLER G E. Comparative performance tests on the Mod-2, 2.5 MW wind turbine with and without vortex generators[C]//DASCON Engineering, Collected Papers on Wind Turbine Technology. 1995: 67-77.
- [11] GRIFFIN D A. Investigation of vortex generators for augmentation of wind turbine power performance[R]. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); Lynette (R.) and Associates, Seattle, WA (United States), 1996:313-317.
- [12] GYATT G W. Development and testing of vortex generators for small horizontal axis wind turbines[R]. AeroVironment, Inc., Monrovia, CA (USA), 1986: 1.
- [13] BALDACCHINO D, FERREIRA C, TAVERNIER D D, et al. Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil[J]. Wind Energy, 2018, 21(9): 745-765.
- [14] LI X, YANG K, WANG X. Experimental and numerical analysis of the effect of vortex generator height on vortex characteristics and airfoil aerodynamic performance[J]. Energies, 2019, 12(5): 959.
- [15] MARTÍNEZFILGUEIRA P, FERNANDEZGAMIZ U, ZULUETA E, et al. Parametric study of low-profile vortex generators[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(28): 17700-17712.
- [16] GAO L, ZHANG H, LIU Y, et al. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 76: 303-311.
- [17] 李宝山, 龚玉祥, 张建军, 等. 涡流发生器高度和长度对风力机翼型的影响研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 148-150.
LI Baoshan, GONG Yuxiang, ZHANG Jianjun, et al. Research on the influence of height and length of vortex generators on wind turbine airfoil[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(11): 148-150.
- [18] WANG H, ZHANG B, QIU Q, et al. Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex generators[J]. Energy, 2017, 118: 1210-1221.
- [19] 张惠, 赵宗德, 周广鑫, 等. 涡发生器参数对风力机翼型性能影响实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3399-3405.
ZHANG Hui, ZHAO Zongde, ZHOU Guangxin, et al. Experimental investigation of effect of vortex generator's parameter on performance of wind turbine aerofoil[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(12): 3399-3405.
- [20] 赵振宙, 严畅, 王同光, 等. 考虑叶片相互影响风力机涡流发生器参数化建模[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 201-208.
ZHAO Zhenzhou, YAN Chang, WANG Tongguang, et al. Parametric model of vortex generators of wind turbine considering inter-effect of winglets[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 201-208.
- [21] 汪泉, 杨书益, 胡梦杰, 等. 气动翼型涡流发生器与风力机翼型同步优化设计[J]. 机械设计与制造机械设计与制造, 2024(1): 95-99.
WANG Quan, YANG Shuyi, HU Mengjie, et al. Aerodynamic shape integrated design of wind turbine airfoils and vortex generators[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 95-99.
- [22] 焦建东. 加装涡流发生器风力机叶片的气动性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 1.
JIAO Jiandong. The aerodynamic properties investigation of wind turbine blade with vortex generators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 1.
- [23] 江瑞芳, 赵振宙, 冯俊鑫, 等. 涡流发生器对风力机叶片流动控制的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(12): 3170-3177.

- JIANG Ruifang, ZHAO Zhenzhou, FENG Junxin, et al. Numerical study on flow control of wind turbine blade by vortex generators[J]. *Journal of Engineering Therm-ophysics*, 2021, 42(12): 3170-3177.
- [24] 朱呈勇. 水平轴风力机叶片三维旋转动态失速特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023: 1.
ZHU Chengyong. Three-dimensional rotational and dynamic stall of horizontal axis wind turbine blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 1.
- [25] 谢龙汉, 赵新宇, 张炯明. ANSYS CFX 流场分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 1-3.
XIE Longhan, ZHAO Xinyu, ZHANG Jiongming. ANSYS CFX flow analysis and simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronic's Industry, 2012: 1-3.
- [26] ZHANG Z, LI W, JIA X. CFD investigation of a mobula birostris-based bionic vortex generator on mitigating the influence of surface roughness sensitivity of a wind turbine airfoil[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 223889-223896.
- [27] TIMMER W A, VAN ROOIJ R. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125(4): 488-496.
- [28] 冯俊鑫, 赵振宙, 江瑞芳, 等. 振荡参数对涡流发生器抑制风力机翼型动态失速影响研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(2): 251-258.
FENG Junxin, ZHAO Zhenzhou, JIANG Ruifang, et al. Research on effect of vortex generator on dynamic stall of wind turbine blade at different oscillation parameters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(2): 251-258.
- [29] 张立军, 朱怀宝, 顾嘉伟, 等. 涡流发生器对垂直轴风力机翼型气动性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(2): 540-550.
ZHANG Lijun, ZHU Huaibao, GU Jiawei, et al. Influence of vortex generator on aerodynamic performance of airfoil of the vertical axis wind turbine[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(2): 540-550.

(责任编辑 杨嘉蕾)