

后缘小翼对垂直轴风力机风轮振动频率的影响

陈 涛¹, 陈永艳^{1,2}, 高志鹰^{1,2}, 郭少真¹, 汪建文^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘 要: 探索添加不同后缘小翼对垂直轴风力机风轮振动频率的影响规律,采用可编程直流负载箱施加固定负载及运用数字变频技术调节风洞不同来流风速的方式对风力机进行动态测试,通过PULSE 21.0振动测试系统对风轮动频信号进行间接采集。对实验数据进行分析处理发现,随着风轮转速的增大,添加相同类型小翼的叶片一阶、二阶振动频率增幅会随小翼尺寸的增大而增加;添加扇型小翼的叶片振型频率的增幅比流线型小翼(相同尺寸)的叶片振型频率的增幅大;添加尺寸较大小翼的叶片二阶振型频率更易超过尺寸较小小翼的叶片振型频率。

关键词: 风力机; 模态分析; 振动频率; 垂直轴风轮; 小翼; 风洞

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

随着中国能源供给侧结构性改革的持续推进,分布式新能源体制机制得以注入新的活力,风力机作为可再生能源装备的重要组成部分,引起了研究人员的持续关注。垂直轴风力机作为风力机的一种,具有噪声小、结构简单、易于安装等优点,然而现有技术研制的垂直轴风力机工作效率并不高。并且,从结构动力学角度出发,垂直轴风力机是动力机械,旋转过程中,由振动引起的疲劳破坏会极大地缩短垂直轴风力机风轮的使用寿命^[1]。目前,科研工作者通过给垂直轴风力机添加小翼的方式增大其输出功率,取得了一定成果^[2-3],但添加小翼势必会改变叶片结构并对其振动特性产生一定的影响。笔者所在课题组针对叶尖涡结构特征及扩散规律对后缘小翼进行设计制造,针对添加不同类型叶尖后缘小翼的风轮振动规律进行探索,相关研究成果有助于对添加后缘小翼后的风轮振动特性进行更深层的理解。

早先针对垂直轴风力机的研究进展相对缓慢,近年来随着越来越多的研究人员认识到垂直轴风力机的优越性,各国逐步加大了对垂直轴风力机小翼气动及机构设计优化和分析的投入^[4]。Ahmed等^[5]对安装不同小翼的垂直轴风力机进行启动性能试验,发现添加小翼能有效改善垂直轴风力机启动性能。Sobhani等^[6]

利用仿真技术对安装不同小翼翼型的垂直轴风力机进行研究,发现小翼能很好地改善垂直轴风力机性能。邓飞等^[7]采用数值模拟的方法分析了叶尖小翼对H型垂直轴风力机气动性能的影响规律,并探究小翼前后叶尖涡流和叶片升力大小的变化。

目前,国内外科研工作者针对添加小翼后垂直轴风力机流场方面的研究较多,对添加小翼后风轮振动特性的研究较少。而风力机固有振动特性研究是风力机开发中的基础性研究课题,对风力机风轮振动进行研究具有重要意义。Verkinderen等^[8]发现垂直轴风力机塔架与风轮之间的共振会干扰发电,引发塔架结构潜在的疲劳问题,而通过有限元法分析和现场测量发现系统的估计固有频率的相关性在10%以内,可以此为参考优化塔架设计,并提出以非平衡涡轮为代表的谐波力和循环气动力,用来预测共振时的峰值加速度。Asgar等^[9]针对垂直轴风力机叶片流动诱导振动进行数值分析,发现流动诱导振动可能对风力机系统的运行和响应产生负面影响,得出叶片失效最关键的模态是弯曲模态。Kusnick等^[10]在考虑风载荷情况下对垂直轴风力机进行模态分析,得出风轮与塔架响应耦合的共振频率随塔高的增加而降低,以及非均匀剪切风条件下风轮的工作模态响应会发生显著变化等结论。张婷婷等^[11]利用有限元方法对垂直轴风力机的振动特性进行研究,分析了旋转运行下无小翼垂直轴风力机存在的动力刚化问

收稿日期: 2018-10-15

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2018MS05048)

通信作者: 高志鹰(1976—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事可再生能源技术方面的研究。hawkwarm@163.com

题。崔凯等^[12]以垂直轴风力机 NACA0015 型号叶片模型为研究对象,分析风轮的振动特性,得出叶片长度越长自然频率越小等结论。李建业^[13]在静力学分析基础上对垂直轴风力机结构进行模态分析,计算结构的低阶固有频率和振型,相关结果表明叶片、主轴和塔架的固有频率均小于其一阶固有频率,不会发生共振现象。陈涛等^[14-15]对小型风力机风轮及机舱、塔架的动态响应进行特征分析,发现风轮动态响应能通过频谱的方式在机舱、塔架上有所反映。

综合以上文献所述,国内外学者对垂直轴风力机叶片安装小翼的研究较多,在提高风力机输出功率方面取得了一定成果。但是,相关研究侧重于流场等方面,多为数值模拟;对无小翼垂直轴风力机结构动态特性的研究较多,但基本未对添加叶片小翼后的垂直轴风力机结构动态特性做进一步探讨。添加小翼后风轮振动特性方面的研究相对空白,相关机理尚不明确。

1 实验设备

本实验在风能太阳能利用技术教育部重点实验室

内的 B1/K2 低速直流式风洞开口端进行,该风洞长 24.59 m,开口端长 2.04 m,最高稳定风速 20 m/s。实验对象为 H 型垂直轴风力机,叶片翼型采用 NACA0012 型,叶片数量为 3 个且设计参数一致,叶片长度 0.9 m,翼型弦长 0.21 m,安装角为 4°。采用功率分析仪和可编程直流负载箱监测功率、调节风轮转速。采用数字变频技术调节风洞风速,通过智能型热式风速仪标定风速。采用 PULSE 21.0 振动测试设备(丹麦 BK 公司生产)采集分析振动信号。小翼尾部形状设计为扇型尾翼和流线型尾翼,为课题组针对叶尖涡而进行设计的小翼(由于叶尖涡主要存在叶片端部位置的 5% 附近,为全面影响叶尖涡,课题组设计小翼高度为整叶片的 6%~7%,小翼厚度为 5 mm,小翼与叶片相对长度比值分别为 0.2、0.4、0.6。

为了方便描述,对小翼类别进行简写,例如,与叶片相对长度比值为 0.2 的流线型小翼简写为 0.2 流线型,以此类推。实验设备如图 1 所示,小翼参数设置见图 2 和表 1,其中流线型小翼翼型弧度 \widehat{AB} 为 70°, \widehat{BC} 为 36°。

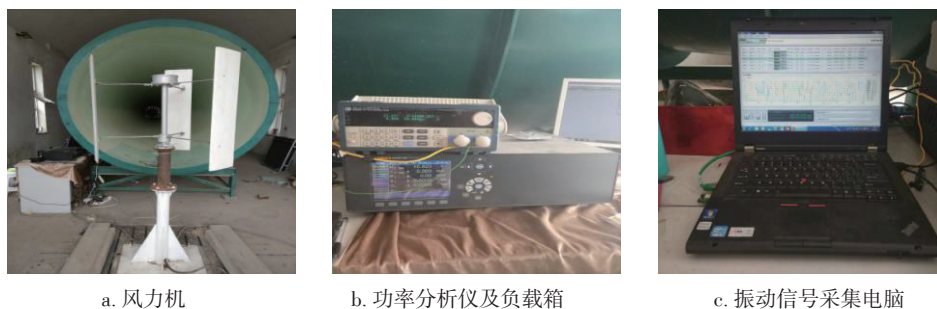


图 1 实验设备

Fig. 1 Laboratory equipment

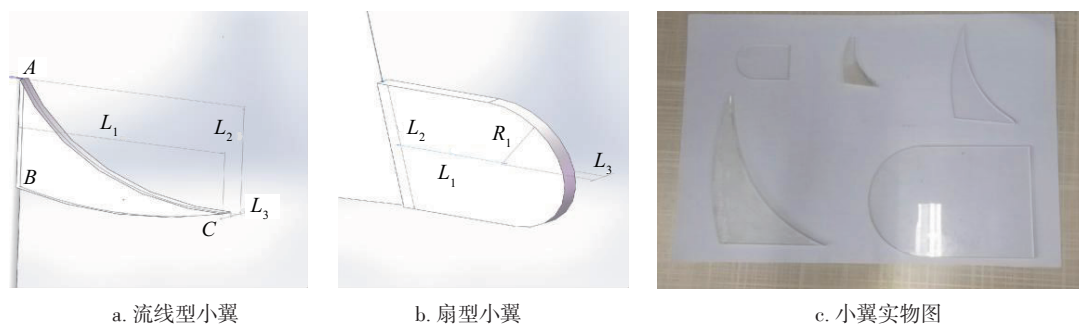


图 2 小翼参数设置

Fig. 2 Winglet parameter settings

2 实验方案

实验方案分为模态试验和动态测试,主要针对无小

翼测试和添加不同类型小翼测试 2 个环节展开,通过实验数据的对比分析,探索有无后缘小翼对垂直轴风力机风轮振动频率的影响以及不同类型小翼对风轮振动频

率影响的差异。

表1 小翼参数表
Table 1 Winglet parameter table

小翼类别	外形尺寸/mm			
	L_1	L_2	L_3	R_1
0.2扇型	27	30	5	15
0.2流线型	42	26.67	5	—
0.4流线型	84	53.33	5	—
0.6流线型	126	80	5	—
0.6扇型	81	90	5	45

2.1 模态测试

对无小翼垂直轴风力机叶片进行模态实验,如图3所示,在叶片前缘和后缘两侧等距、同向各布置4个振动加速度传感器,通过PULSE 21.0振动测试系统对叶片进行敲击试验(单点激励多点响应)得到其模态参数;同理,依次对添加不同类型小翼后的叶片进行模态试验,为后期动态测试进行参考对比。

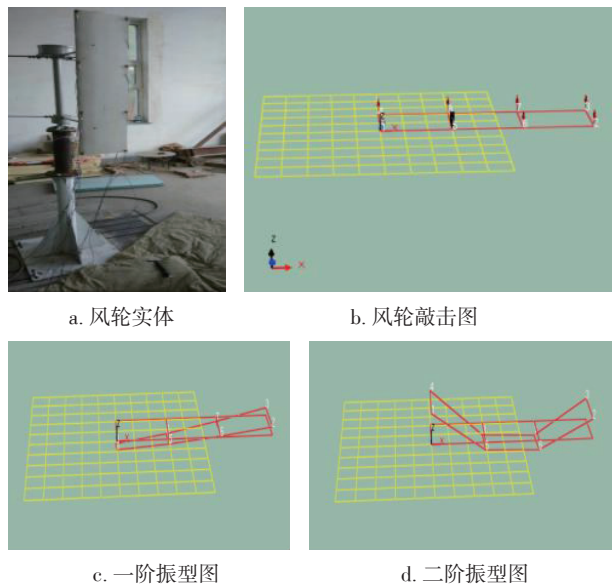


图3 风轮模型及静频测试测点布置
Fig. 3 Wind wheel model and arrangement of measure points in static frequency test

2.2 动态测试

利用数字变频技术调节风洞来流风速,选取6、8、10、12 m/s来流风速对垂直轴风力机进行有无小翼振动响应测试。对运行情况下的无小翼风力机进行动态测试,通过调节可编程直流负载箱施加负载的方式,改变风轮转速(也可给风力机施加相同负载,通过提高来流

风速的方式提高风轮转速)。如图4b,将振动加速度传感器安装在塔架中上部靠近风轮处位置捕获振动频谱,再通过风轮静频和谱分析法识别风轮动频(同一来流风速所引起的激励信号,无论是风轮、机舱或塔架频率相关波峰频率在理论上都是相互对应的,相关实验验证可参考相关文献^[14-15])。最后,通过在垂直轴风力机风轮叶尖后缘添加不同类型小翼(如图4,因小翼安装方式系统,考虑篇幅有限,只列举0.2扇型安装实验图),按照无小翼动态测试的负载施加的方式同样对其施加负载,利用PULSE 21.0振动测试设备对风轮振动信号进行监测。

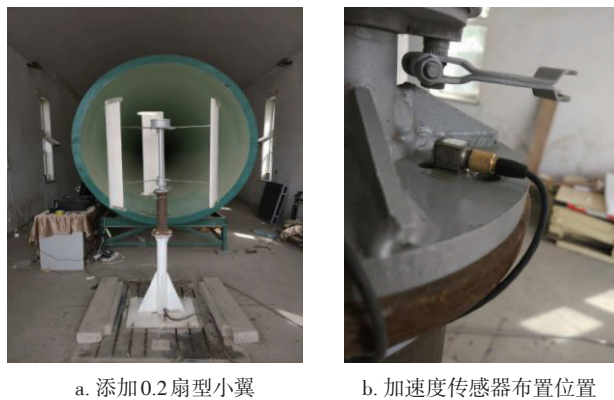


图4 添加小翼的垂直轴风力机
Fig. 4 VAWT of add winglets

3 测试结果及分析

3.1 添加小翼对叶片静频的影响

通过瞬态激励法对无小翼叶片和添加不同类型小翼叶片进行模态试验,得到叶片振型所对应的模态参数(静频数据),叶片模态参数如表2,其中图3所示的一阶振型对应的一阶振动固有频率用 f_1 表示,二阶振型对应的二阶振动固有频率用 f_2 表示。为了更好地分析添加不同类型小翼对风轮叶片静频参数的影响,定义表2中衰减率 $t=[(无小翼叶片振动频率-添加小翼后叶片振动频率)/无小翼叶片振动频率] \times 100\%$ 。

表2 叶片模态参数
Table 2 Blade modal parameters

影响参数	无小翼	0.2扇型	0.2流线型	0.4流线型	0.6流线型	0.6扇型
f_1/Hz	48.5	48	45.5	45	42	43
$t_1/\%$	0	1.0	6.2	7.2	13.4	11.3
f_2/Hz	115	115	113	112	108.5	107
$t_2/\%$	0	0	1.7	2.6	5.7	7

从模态测试结果可看出,静态情况下添加小翼后的叶片一阶、二阶振动频率都比无小翼叶片的小。从添加不同尺寸流线型后缘小翼的叶片一阶、二阶振动频率可发现,添加 0.2 流线型、0.4 流线型、0.6 流线型小翼的叶片一阶、二阶振动频率有所下降,添加同一类型小翼的尺寸越大,叶片一阶、二阶振动频率的降幅越大。通过固有频率计算公式 $A = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2}$ 对模态测试数据结果进行可靠性验证, k 为弹性模量, m 为物体质量,添加小翼会增加叶片质量(增加小翼也会对叶片弹性模量产生一定影响),叶片固有频率降低,相关模态测试结果可靠。

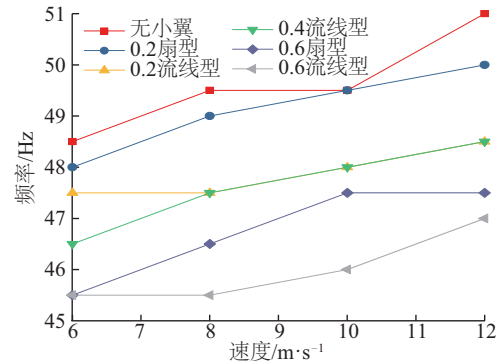
从添加小翼后叶片振动频率衰减率 t 的角度进行分析,添加同一型号同一尺寸的小翼,叶片一阶振动频率的衰减率 t_1 比二阶振动频率的衰减率 t_2 大。经分析,叶片发生振动时体现为低阶弯曲振动,主要体现为一阶振动,即对叶片施加激励时,叶片二阶振动抵抗变形的能力比一阶振动强,添加小翼后,叶片一阶振动频率的衰减率 t_1 比二阶振动频率的衰减率 t_2 大。

3.2 添加小翼对叶片动频的影响

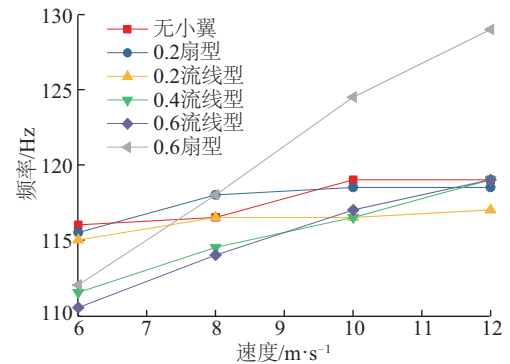
通过静频数据结合谱分析法识别风轮动频,选取施加负载为 400 Ω 时(因考虑垂直轴风力机叶尖速比较小等因素,同一风速下施加不同负载对风轮转速影响较小,拟对风力机施加固定负载并通过调节不同来流风速的方式改变风轮转速),来流风速 6、8、10、12 m/s 情况下对无小翼及添加不同小翼的风轮叶片典型振型频率进行分析。对动态测试数据结果进行分析(如图 5),发现运行工况下施加同样负载,无论是否添加小翼,叶片典型振型频率都会随来流风速的增大而增大。添加 0.2 流线型、0.4 流线型、0.6 流线型小翼的叶片一阶、二阶振型频率的增幅依次增大。经分析,受小翼离心力及流场改变的影响,叶片内部应力及刚化效应增加,风轮振型频率也会随风轮转速的增大而增大;同一型号的小翼,随添加尺寸的增大,叶片内部应力及刚化效应增加的程度也更大,相对应尺寸小翼叶片一阶、二阶振型频率的增幅依次增大。随着来流风速的增大,添加扇型小翼的叶片振型频率的增幅比流线型小翼(相同尺寸)的叶片大,说明添加扇型小翼更易对叶片内部应力及刚化效应产生影响。

如图 5b,对添加小翼后叶片二阶振型频率进行分析,发现在低风速情况下,施加相同负载小翼叶片二阶振型频率值大小依次为 0.2 流线型>0.4 流线型>0.6 流线型。但随着风速的增大风轮转速增大,这一情况发生逆转,在高风速情况下小翼叶片二阶振型频率值大小依

次为 0.6 流线型>0.4 流线型>0.2 流线型。经分析,由于叶片振动形式的原因,添加小翼后产生的离心力等因素对二阶振型频率的影响较大;随着小翼尺寸的增大离心力增大,叶片内部应力及刚化效应增大;尺寸越大的小翼叶片随风轮转速的增大,二阶振型频率变化更大。



a. 小翼对叶片一阶振型频率的影响



b. 小翼对叶片二阶振型频率的影响

图5 小翼对叶片典型振型频率的影响

Fig. 5 Influence of small wing on frequency of typical blade vibration

3.3 试验结果分析

本文对添加不同类型后缘小翼的叶片进行静频、动频测试实验。经过分析对比,发现添加小翼后,叶片一阶振动频率的衰减率 t_1 比二阶振动频率的衰减率 t_2 大。添加同一型号不同尺寸的小翼,在一定小翼尺寸范围内,随着风轮转速的增大,添加的小翼尺寸越大,叶片动频的增幅越大。可根据工程实践的需要,通过合理选择小翼尺寸调节风轮进入和脱离风轮共振区的转速,这有利于垂直轴风力机的安全运行,并为风轮叶片的优化设计提供一种新的借鉴方法,在工程实践中具有较为重要的意义。

随着来流风速的增大,风轮转速增大,添加扇型小翼的叶片振型频率的增幅比流线型小翼(相同尺寸)的增幅大。在风力机健康运行的情况下,如果要通过添加

小翼的方式增大其输出功率,可优先考虑添加流线型小翼;在发现风力机风轮存在潜在的疲劳问题或可能与塔架发生共振情况时,可优先考虑添加扇型小翼,并通过调节负载的方式控制转速,从而更好地维持风力机的安全运行。

4 结 论

为了增大垂直轴风力机输出功率而添加小翼势必会改变叶片结构并对其振动特性产生一定影响。本文通过对课题组最新设计制造的后缘小翼叶片进行模态测试及动态测试实验,初步探讨添加不同后缘小翼对垂直轴风力机风轮振动频率的影响,以及添加不同后缘小翼的风轮一阶、二阶振型动频随风轮转速改变的变化趋势。相关研究可为垂直轴风力机后缘小翼设计改良及工程实践中规避共振提供实验借鉴,在工程实践中具有较为重要的意义,有利于垂直轴风力机健康的运行发展。本文得到以下结论:

1)静态情况下,为垂直轴风力机叶片添加不同尺寸的同类型后缘小翼,叶片一阶、二阶振动频率呈下降趋势,添加小翼尺寸越大,叶片一阶、二阶振动频率下降越大,且叶片一阶振动频率的衰减率比二阶振动频率大。

2)添加同一型号的小翼,随着添加尺寸的增大,相对应尺寸小翼叶片一阶、二阶振型频率的增幅依次增大。随着风轮转速的增大,添加扇型小翼的叶片振型频率的增幅比流线型小翼(相同尺寸)的叶片振型频率的大,说明添加扇型小翼更易对叶片内部应力及刚化效应产生影响。

3)由于叶片振动形式的原因,添加小翼后产生的离心力等因素对二阶振型频率的影响较大;随着小翼尺寸的增大,离心力增大,叶片内部应力及刚化效应增大;随风轮转速的增大,尺寸较大的小翼叶片二阶振型频率更易超过尺寸较小的小翼叶片振型频率。

相关研究成果有可能为添加后缘小翼的垂直轴风力机的机构优化及安全性设计方案提供借鉴参考,有利于通过添加叶片小翼提高风力机输出功率的同时,避免风轮振动引起的一些潜在疲劳问题。

[参考文献]

- [1] LOBITZ D W. Forced vibration analysis of rotating structures with application to vertical axis wind turbines [C]//5th Biennial Wind Energy Conference and Workshop, washington DC, USA 1981: 101-111.
- [2] 杨从新,李寿图,王秀勇.不同小翼对H型垂直轴风力机叶片压力分布的影响[J].太阳能学报,2015,36(11):2810-2815.
- [3] YANG C X, LI S T, WANG X Y. Influence of blade pressure disture distribution for installed different tip vanes H type VAWT [J]. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36(11): 2810-2815.
- [4] 郭少真,陈永艳,田瑞,等.加装后缘小翼的垂直轴风力机输出特性研究[J].可再生能源,2020,38(2):193-198.
- [5] GUO S Z, CHEN Y Y, TIAN R, et al. Research on the output characteristics of vertical axis wind turbine with small wing of trailing edge [J]. Renewable energy resources, 2020, 38(2): 193-198.
- [6] 李飏,陈永艳,蔚蕾,等.基于滑移网格的H型风力机叶片设计与气动性能研究[J].能源与环境,2015(5):88-90.
- [7] LI Y, CHEN Y Y, WEI L, et al. Design and aerodynamic performance of H-type wind turbine blade based on sliding grid[J]. Energy and environment, 2015(5): 88-90.
- [8] AHMED N A, Netto K J. Computer aided design and manufacture of a novel vertical axis wind turbine rotor with winglet[J]. Applied mechanics & materials, 2014, 607: 581-587.
- [9] SOBHANI E, GHAFARI M, MAGHREBI M J. Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine[J]. Energy, 2017, 133: 231-241.
- [10] 邓飞,王佳,冯潇涛,等.翼尖小翼对H型垂直轴风机气动性能的影响研究[J].机械设计与制造,2013(9):70-72.
- [11] DENG F, WANG J, FENG X T, et al. The influence of winglet on H-type VAWT's aerodynamic performance [J]. Machinery design & manufacture, 2013(9): 70-72.
- [12] VERKINDEREN E, IMAM B. A simplified dynamic model for mast design of H-Darrieus vertical axis wind turbines (VAWTs) [J]. Engineering structures, 2015, 100: 564-576.
- [13] ASGHAR U, AZIZ I, SHER F. Modelling and simulation of flow induced vibrations in vertical axis wind turbine blade [C]//International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, IEEE, 2017.
- [14] KUSNICK J F, ADAMS D E. Vertical axis wind turbine operational modal analysis in sheared wind flow [M]. Topics in Experimental Dynamics Substructuring and

- Wind Turbine Dynamics, Volume 2. New York: Springer, 2012.
- [11] 张婷婷, 王红霞, 代泽兵. 垂直轴风力机结构振动特性研究[J]. 华东电力, 2009, 37(3): 452-455.
- ZHANG T T, WANG H X, DAI Z B. Research on vertical-axis wind turbines' structure vibration characteristics[J]. East China electric power, 2009, 37(3): 452-455.
- [12] 崔凯, 张建成, 张家欧. 基于哈密顿定理的垂直轴风机叶片振动分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1606-1615.
- CUI K, ZHANG J C, ZHANG J O. Vibration analysis of vertical axis wind turbines based on hamilton's principle[J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2017, 42(4): 1606-1615.
- [13] 李建业. 3 kW 升阻复合型垂直轴风力机结构设计及静动力学分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- LI J Y. Structural design and statics-dynamics analysis of 3 kW lift-drag hybrid vertical axis wind turbine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [14] 陈涛, 高志鹰, 蒋祥增, 等. 基于传感器对风力机塔架轴向及横向振动特征分析[J]. 仪表技术与传感器, 2018(8): 76-80.
- CHEN T, GAO Z Y, JIANG X Z, et al. Based on sensor for the axial and transverse vibration characteristics analysis of wind turbine tower[J]. Instrument technique and sensor, 2018(8): 76-80.
- [15] 陈涛, 陈永艳, 高志鹰, 等. 小型风力机风轮及机舱动态响应特征分析[J]. 可再生能源, 2018, 36(7): 1080-1085.
- CHEN T, CHEN Y Y, GAO Z Y, et al. Dynamic response characteristics analysis of small wind turbine's rotor and nacelle[J]. Renewable energy, 2018, 36(7): 1080-1085.

INFLUENCE OF TRAILING EDGE SMALL WINGLET ON VIBRATION FREQUENCY OF VAWT ROTOR

Chen Tao¹, Chen Yongyan^{1,2}, Gao Zhiying^{1,2}, Guo Shaozhen¹, Wang Jianwen^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Technology, Ministry of Education, Hohhot 010051, China)

Abstract: The purpose of this paper is to explore the influence rule of adding different trailing edge small winglet on the vibration frequency of vertical-axis wind turbine rotor. To test the wind turbine dynamically, digital frequency conversion technology was used to adjust the incoming wind speed, and fixed load was applied by adjustable programmable DC load box. Moreover, the rotor dynamic frequency signal of was indirectly collected through PULSE 21.0 vibration test system. By analyzing the experimental data, It is found that with the increase of wind speed, the first and second order vibration frequencies of blades adding same type of small winglet increase with the increase of small winglet size, and the increase of blade mode frequencies adding fan-shaped small winglet is larger than that of the blade adding streamlined small winglet (with the same size). In addition, with the increase of wind speed, the second-order mode frequency of blades with larger winglet size is more easily bigger than that the second-order mode frequency of blades with smaller winglet size.

Keywords: wind turbines; modal analysis; vibrational frequencies; WAWT; small winglet; wind tunnels