DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201802003

建筑增强型垂直轴风力机气动特性数值研究

朱海天[1],郝文星[1],李 春[1,2],丁勤卫[1],余 万[1]

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院,上海,200093;
2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室(上海理工大学),上海 200093)

摘 要:为捕获建筑环境中蕴藏丰富的高品质风能,结合高耸建筑的高度优势与建筑扩散体强化风速效应,将垂直轴风力机放置于不同建筑扩散体之间,通过数值模拟的方法研究建筑增强型垂直轴风力机在具有不同实度与不同翼型时的气动特性.结果表明:建筑扩散体可大幅提升风力机获能效率,建筑增强型垂直轴风力机较原始垂直轴风力机最大风能利用系数提升 4.47 倍,其最佳尖速比位置向右偏移,但其载荷波动较剧烈,且对建筑外廓敏感,其中圆弧形截面建筑可有效减小建筑分离涡造成的影响.随着实度的增加,建筑增强型垂直轴风力机风能利用系数先增大后因叶片间干扰而减小,其载荷波动和自启动性在多叶片时得到明显改善.对于不同系列的翼型,FXLV152 翼型有助于减小疲劳累积损伤,最大厚度较大的 NACA0021 翼型有利于提高风力机的获能效率,S809 非对称翼型则不适用于建筑增强型垂直轴风力机.数值结果为建筑增强型垂直轴风力机的工程应用提供部分参考依据.

关键词:风力机械与设备;建筑环境;垂直轴风力机;数值模拟;建筑外廓;实度;翼型
中图分类号:TK83 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2019)01-0087-07

Numerical investigation on aerodynamic characteristic of building augmented vertical axis wind turbine

ZHU Haitian[1], HAO Wenxing[1], LI Chun[1,2], DING Qinwei[1], YU Wan[1]

(1.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering (University of Shanghai for Science and Technology), Shanghai 200093, China)

Abstract: To capture the high-quality wind energy in built environment, combined with height advantage of skyscraper and canyon wind effect of building diffuser, the vertical axis wind turbines were mounted between the building diffusers. By the means of numerical simulation, the aerodynamic characteristics of building augmented vertical axis wind turbine with different solidity and different airfoil configuration had been investigated. The results show that the building diffusers can sharply increase the power coefficient of wind turbine. The optimal power coefficient of building augmented wind turbine is 4.47 times higher than the clean one and the optimal tip-speed ratio shifts to the right. But it has intense load fluctuation and it is sensitive to building configuration. The circular configuration can decrease the influence of shedding vortex of buildings. With increasing solidity, the power coefficient of building augmented vertical axis wind turbine increases first and then decreases due to the interference between blades, and the load fluctuation and self-starting have been improved obviously. The FXLV152 airfoil contributes to decrease the fatigue cumulative damage and the NACA0021 airfoil contributes to increase efficiency of wind turbine. However, the S809 airfoil is not appreciated for building augmented vertical axis wind turbines. The numerical results provide a reference for practical application of building augmented vertical axis wind turbines.

Keywords: wind machinery and device; built environment; vertical axis wind turbine; numerical simulation; building configuration; solidity; airfoil

随着世界各国城市化进程加快,城市人口密度急剧增加,为适应大量住宅与商业需求,大量高耸建筑建造于城市中[1].但建筑从施工至运行的过程中消耗大量能源,占全球能源使用量的一半左右[2].因此,绿色建筑已成为研究热点之一[3],建筑与可再生能源结合是不二之选.因此,建筑结合型风力机(Building integrated wind turbines, BIWTs)得到相关学者的广泛关注[4-5].

Dayan[6]和 Muller 等[7]划分了 3 种不同类别的 BIWT:1)建筑结合型水平轴风力机(Building integrated horizontal axis wind turbines, BIHAWTs);

收稿日期:2018-02-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176129,51676131);
上海市科学技术委员会项目资助(13DZ2260900)
作者简介:朱海天(1993—),男,硕士研究生;
李 春(1954—),男,博士生导师
通信作者:李 春, lichun_usst@163.com

2)建筑结合型垂直轴风力机(Building integrated vertical axis wind turbines,BIVAWTs);3)建筑增强型风力机(Building augmented wind turbines,BAWTs).

19世纪30年代初德国工程师Honnef率先提出了建筑增强型风力机概念设计,目的在于利用建筑的高度优势以及局部大风区域,从而开创了风力机在城市高楼设计中的应用[8]. 例如:巴林世界贸易中心是由Atkins设计的世界上第一座具有建筑增强型水平轴风力机的高楼建筑,在其2个建筑扩散体(Building diffuser)间放置3个直径为29 m的建筑增强型水平轴风力机(Building augmented horizontal axis wind turbines,BA-HAWTs),为其提供11%~15%的电能[9]. 再如:英国伦敦Strata大厦是由BFLS团队设计的绿色建筑,其楼顶安装3个BA-HAWTs,为建筑提供8%的电能[10]. 广州珠江大厦,作为耗能超低的绿色建筑之一,Li等[11]对其开洞中安装流线型达里厄风力机的效益进行评估,考虑周围17座建筑对流场结构的影响并结合长期气象统计数据对经比例缩放后的建筑群风场模型进行风洞试验. 结果表明:喇叭口型开洞将来流风速最大增大至1.9倍,而周围建筑群的聚风效应可在特定风向下提升开洞增强风速的效果. 这佐证了建筑扩散体利用其聚风效应可增强风速的效果,且增强风速的效果与建筑扩散体形状有着密切的联系[12-13]. 英国皇家工学院与德国斯图加特大学联合建造了一个双塔建筑扩散体模型并通过实验得出:建筑扩散体可使风力机发电效率提升一倍,而圆弧形截面建筑可进一步增强聚风效应[14]. Heo等[15]对110kW建筑增强型HAWTs进行了数值计算,结果表明:两栋建筑之间流道具有集聚效应,可大幅提升风力机输出功率,但该种BAWTs受风多向性差,只有当偏航角小于30°时才具有较高的电能输出.

可见,建筑增强型风力机可为建筑节能技术提供一条新思路. 然而鲜见建筑增强型垂直轴风力机的相关实例与研究. 直线翼垂直轴风力机(Straight-bladed vertical axis wind turbines,SB-VAWTs)是最具代表性的垂直轴风力机(Vertical axis wind turbines, VAWTs)之一[16],因其噪声小、受风多向性好等优势在建筑环境中应用较为合理,故本文首次提出一种SB-VAWTs在建筑扩散体间的安装方式:在两个建筑之间的横梁下端铅直安装SB-VAWTs,以期捕获建筑间流道内的高品质风能. 提出并建立建筑增强型直线翼垂直轴风力机(Building augmented straight-bladed vertical axis wind turbines,BASB-VAWTs)模型,其减少了电能传输中的损失同时利用现有建筑可减少成本.

实度作为垂直轴风力机最重要的无因次设计参数,其对垂直轴风力机的影响是相关领域研究热点之一[17-21]. 风能利用系数和实度密切相关,而风能利用系数是衡量VAWTs气动性能的重要指标之一[22],另外诸多相关的研究并未涉及在建筑扩散体间的VAWT. 因此,研究实度对在不同建筑扩散体间BASB-VAWTs气动特性的影响也十分必要. 此外,风力机叶片翼型设计参数对垂直轴风力机气动性能也有明显影响[23-24].

本文采用计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)对原始SB-VAWTs进行数值研究,并通过与实验值对比和网格无关性验证,证明本文计算模型的合理性与可靠性. 进一步研究不同实度以及不同翼型对BASB-VAWTs气动性能与流场结构的影响,分析在不同尖速比与不同建筑扩散体中,实度与翼型对BASB-VAWTs气动性能的影响,为BASB-VAWTs的实际应用提供部分最佳设计参数与最佳运行参数.

1　空气动力学模型

1.1　垂直轴风力机气动理论

实度:垂直轴风力机重要无因次设计参数,其为叶片数量和弦长的乘积与风力机直径的比值[25]:

$$\sigma = Nc/(2R)$$

式中:N为叶片数量,个;c为翼型弦长,m;R为旋转半径,m.

尖速比λ反映垂直轴风力机运行工况,即叶片相对来流速度的比值:

$$\lambda = R\omega/V_\infty$$

式中:ω为角速度,rad/s;V_∞为来流速度,m/s.

力矩系数C_m与风能利用率C_P均是衡量VAWTs气动性能的重要参数[26]:

$$C_m(\theta) = 2T(\theta)/(\rho A R V_\infty{}^2),$$

$$C_P = 2P/(\rho A V_\infty{}^3).$$

式中:$T(\theta)$为风力机在方位角θ时所受的转矩,N/m;P为输出功率,W;ρ为空气密度,kg/m^3;A为扫风面积,m^2.

1.2　控制方程

考虑垂直轴风力机旋转与由建筑与风力机叶片引发的分离涡是一种动态的过程,采用URANS方程模拟风力机周围流场:

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\int W\mathrm{d}\Omega + \frac{\partial}{\partial t}\int W\mathrm{d}\Omega - \oint(F_c - F_v)\mathrm{d}S = 0.$$

式中:W为守恒变量;F_c和F_v分别为修正对流通量与黏性通量;τ和t分别为虚拟时间与物理时间;Ω

为单元体的体积；S 为网格单元边界.

1.3　建筑扩散体聚风原理

由于建筑迎风面与背风面的压差，提升了建筑间流道速度，提高了风能密度，其原理为实际流体的伯努利方程[27]：

$$z_1 + p_1/\rho g + u_1^{\ 2}/2g = z_2 + p_2/\rho g + u_2^{\ 2}/2g + h_w.$$

式中：z_1 与 z_2 为建筑迎风面位能与背风面位能，m；p_1 与 p_2 为建筑迎风面静压与背风面静压，Pa；u_1 与 u_2 为建筑迎风面流速与背风面流速，m/s；g 为重力加速度，m/s^2；h_w 为流经建筑扩散体机械能损失，m.

1.4　垂直轴风力机设计参数

为验证计算模型可靠性，原始 SB-VAWTs 模型参考文献[28]中的原始 SB-VAWTs 设计参数.

表 1　原始 SB-VAWTs 几何参数

Tab.1　Geometric parameters of clean SB-VAWTs

直径 D/mm	叶片高度 H/mm	叶片数 N	叶片翼型	弦长 c/mm	支撑杆位置	实度 σ
1 030	1 456.4	3	NACA0021	85.8	0.5	0.25

本文 BASB-VAWTs 中风力机的设计参数中 D、H 及支撑杆位置均不变，其余参数如表 2 所示. BASB-VAWTs 几何模型如图 1 所示. 实际应用中将以实际建筑外廓尺寸决定实际风力机尺寸.

表 2　BASB-VAWTs 几何参数

Tab.2　Geometric parameters of BASB-VAWTs

参数	实度值	N	c/mm	翼型
实度 σ	0.1	3	42.9	NACA0021 S1046 FXLV152 S809
	0.175	3	60.06	
	0.25	3	85.8	
	0.325	3	111.54	
	0.333	4	85.8	
	0.416	5	85.8	
	0.5	6	85.8	

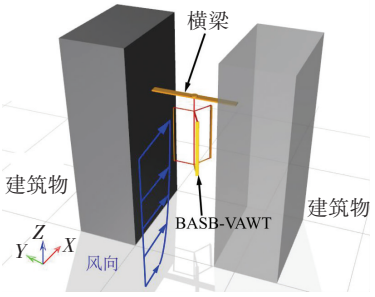


图 1　BASB-VAWTs 几何模型

Fig.1　BASB-VAWTs geometric model

BASB-VAWTs 翼型参数如图 2 所示. NACA0021、S1046、FXLV152 翼型为对称翼型，在文献[23]中，对于同一系列翼型，选取上述 3 种翼型的垂直轴风力机均可获得较高的风能利用系数. 而 S809 为研究较广泛的非对称翼型，应用于 BASB-VAWTs 的相关研究中也具有一定参考价值.

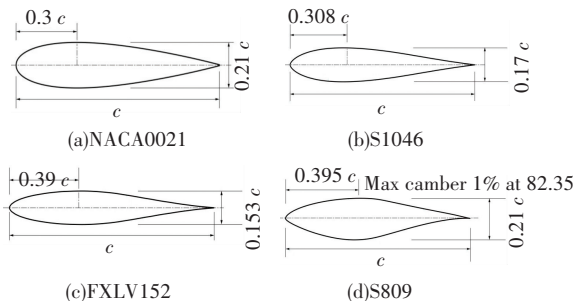


图 2　4 种不同翼型几何参数

Fig.2　Geometric parameters of four kinds of airfoils

1.5　建筑外廓形式

为提升数值计算效率，将三维模型进行二维简化，建筑外廓形式描述如图 3 所示. 主要有 4 种建筑截面形式，包括正圆形、椭圆形、矩形及菱形. 其中，两建筑最短间距均为 4R，风向为西风.

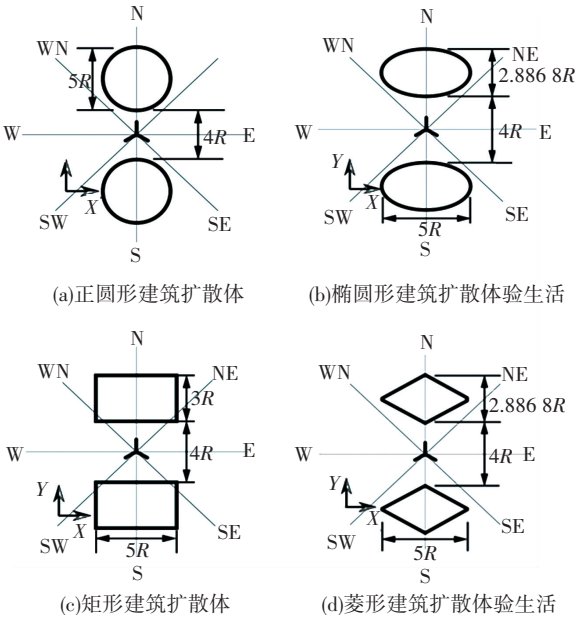


图 3　4 种不同建筑扩散体外廓

Fig.3　Four different configurations of building diffusers

1.6　CFD 模型

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型及非平衡壁面函数进行二维数值计算，该湍流模型较之于 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型能够较优地模拟旋转流动，也能较精确地捕捉到流动分离点[29-30]. 本文网格模型选取的 y^+ 在 30~50 范围内，满足湍流模型及壁面函数要求.

考虑风剪切效应（选用 D 类地表粗糙度类别）与某城市市中心风玫瑰图，设高空来流风速为 9 m/s，压力出口表压为 0 Pa. 采用 Simplec 算法对二阶迎风格式对流项、二阶隐式时间项及二阶中心差分格式扩散项并采用亚松弛因子进行数值计算.

采用滑移网格技术模拟旋转流动，因研究对象

包含不同叶片数,故滑移网格数量为 30 至 40 万左右,总网格数量为 38 至 50 万. 通过数值计算获得的风能利用系数与力矩系数均采取一个稳定旋转周期内的平均值. 菱形 BASB-VAWTs 周围局部流场网格分布如图 4 所示. 其余 3 种 BASB-VAWTs 网格分布不再图示. 另外,原始 SB-VAWTs 的网格分布已在相关文献中多次图示,本文也不再图示.

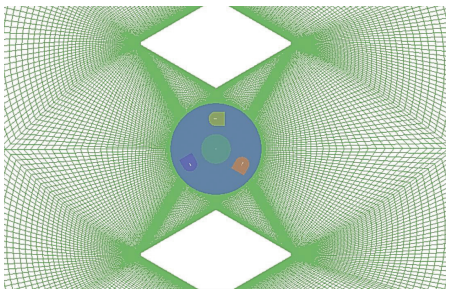


图 4 菱形 BASB-VAWTs 局部网格分布

Fig.4 Mesh distribution of diamond BASB-VAWTs

2 实验验证与网格无关性验证

原始 SB-VAWT 二维 C_P 的计算值与实验值[28]进行比较,如图 5 所示. 可见,数值模拟可捕捉到最佳尖速比 λ_{opt} 位置并较为准确地计算出其对应的最大风能利用系数 $C_{P_{max}}$. 但尤其是在低尖速比时,由于垂直轴风力机叶片常处于大攻角状态,流动分离较为严重,故模拟精度不高.

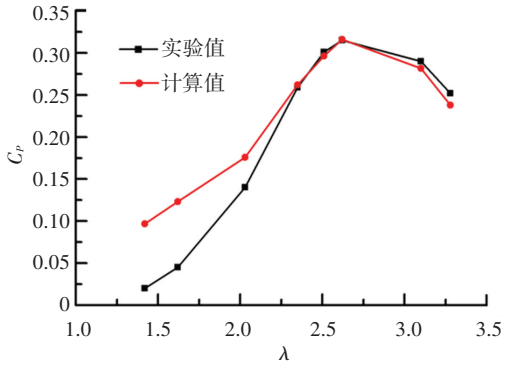


图 5 计算值与实验值对比

Fig.5 Comparison of computation values and experiment values

BASB-VAWTs 网格无关性验证如表 3 所示. 以大网格数计算结果为准(表中大网格计算结果偏差为 0),结果表明:在约 42 万总网格数量时的计算值与约 66 万总网格数量时的计算值相近,故本网格模型是可信的. 因此,本文选取约为 42 万左右网格数量模型作为最终计算模型.

表 3 网格无关性验证

Tab.3 Validation of mesh independence

网格数	λ = 1.62 时的 C_P	偏差/%	λ = 2.62 时的 C_P	偏差/%	λ = 3.28 时的 C_P	偏差/%	λ = 4.62 时的 C_P	偏差/%
196 923	0.165 34	29.184	0.585 60	13.977	0.967 83	8.616 8	1.165	18.203
421 092	0.232 15	0.569 64	0.716 16	5.201 6	0.943 56	5.893 0	1.007	2.171 2
661 710	0.233 48	0	0.680 75	0	0.891 05	0	0.985 6	0

3 结果与分析

表 4 为工作汇总表.

表 4 工况汇总表

Tab.4 Summary of operation condition

建筑扩散体外形	实度	尖速比	翼型
正圆形、椭圆形、矩形、菱形.	0.1、0.175、0.25、0.325、0.333、0.416、0.5.	1.62、2.02、2.35、2.62、2.94、3.12、3.28、3.68、4.12、4.62、5.12、5.62.	NACA0021、S1046、FXLV152、S809.

3.1 建筑扩散体聚风效应

图 6 为建筑扩散体周围的速度云图. 由图 6 可知,来流风速为 9 m/s,因截面的收缩及建筑扩散体迎风面与背风面的压差,根据实际流体的伯努利方程原理与聚风效应,建筑间流道内流速提升 1 倍左右,风向更稳定且风能密度增大,形成高品质风能区域,因此在流道内的风力机获能效率可大幅提升.

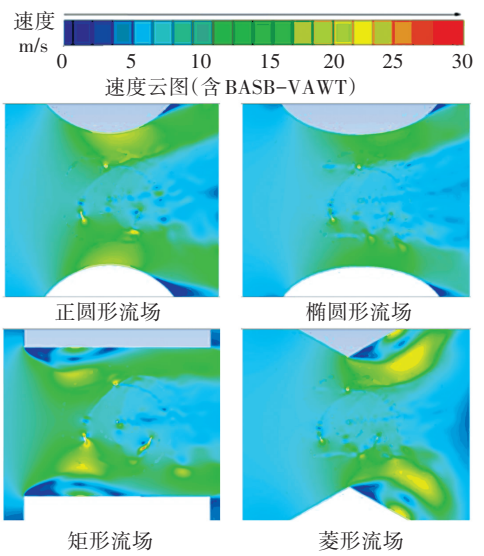


图 6 建筑扩散体聚风效应

Fig.6 Wind collection effects of building diffusers

3.2 实度对 BASB-VAWTs 气动性能的影响

实度对 BASB-VAWTs 气动性能的影响如图 7 所示. 由图 7 可知:正圆形截面 BASB-VAWTs 性能由于其纵向长度较大,因此在各实度下均较优秀;椭圆形在 σ < 0.250 时,性能较菱形优秀,椭圆形在 $\sigma \geqslant$ 0.250 时,性能较菱形拙劣;矩形由于其棱角处产生的分离涡尺度较大,对风力机产生较大的影响,因此在各实

度下较正圆形均拙劣. 结合图 6 可见，具有棱角的建筑扩散体分离涡较大，加剧了流场结构的复杂性，对 BASB-VAWTs 气动性能影响较大，而圆弧形建筑扩散体可有效降低气体流动损失，具有较好的聚风效应.

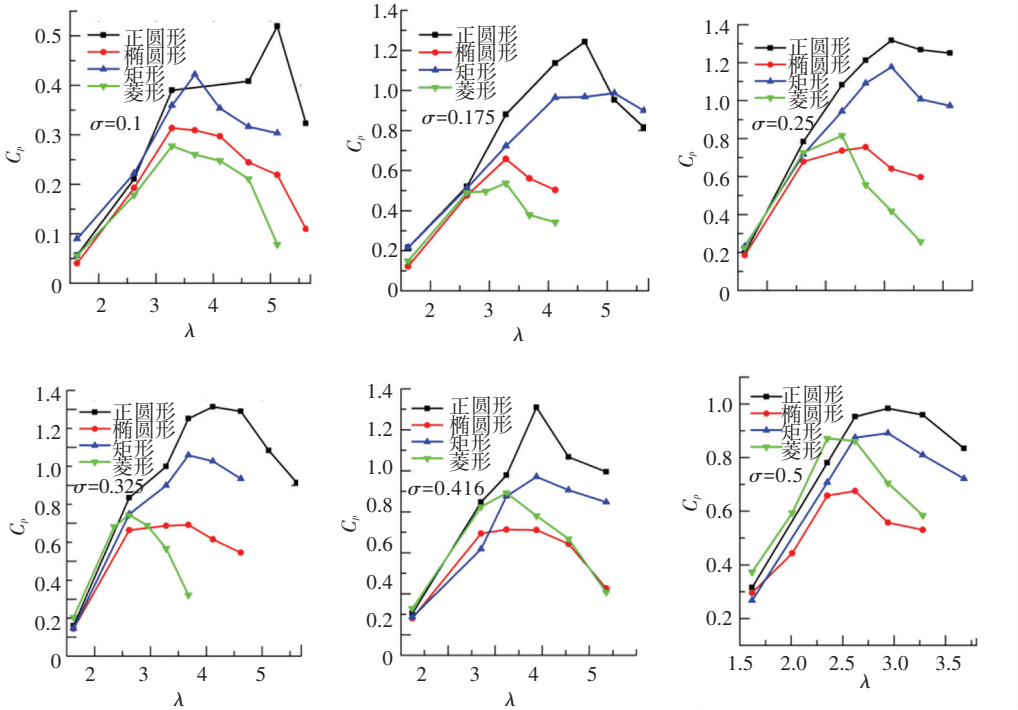


图 7　不同实度下建筑形式与风能利用率的关系

Fig.7　Relationship between types of buildings and power coefficient at different solidities

由图 7 可知，实度为 0.1 时，则无法很好地捕获高品质风能，风能利用系数提升并不明显甚至有部分降低，当实度大于 0.175 时，因叶片越多或叶片越长可提升叶片捕获风能的能力，建筑扩散体见高品质风能得到充分利用，故风能利用系数得到大幅提升. 随着实度增加，最佳尖速比位置向左偏移，但风能利用系数的增幅降低，这是由于实度过大，叶片间干扰增加，气动损失增大.

图 8 为矩形 BASB-VAWTs 多叶片速度云图. 由图 8 可知，叶片数量越多，导致下游区叶片迎风速度越低，瞬时力矩也越低. 因此，叶片数量太多，虽能够降低载荷波动，但会导致气动性能增幅降低.

图 9 为各实度下矩形 BASB-VAWTs 力矩系数分布. 其中 σ = 0.325 平均 C_m = 0.304 4；σ = 0.333，平均 C_m = 0.303 5；σ = 0.416，平均 C_m = 0.275 0；σ = 0.500，平均 C_m = 0.246 9.

由图 9 可知，σ = 0.333 与 σ = 0.325 的 BASB-VAWTs 平均 C_m 与 C_P 近乎相等，而 σ = 0.325 的风力机载荷波动明显较 σ = 0.333 的风力机更为剧烈，σ = 0.325 在一个旋转周期内 C_m 波动峰谷值为 0.440 3，而 σ = 0.333C_m 波动峰谷值为0.111 5. 可知实度相近时，叶片数量越多，在每个叶片上作用的力矩就越小，则整机力矩波动越小.

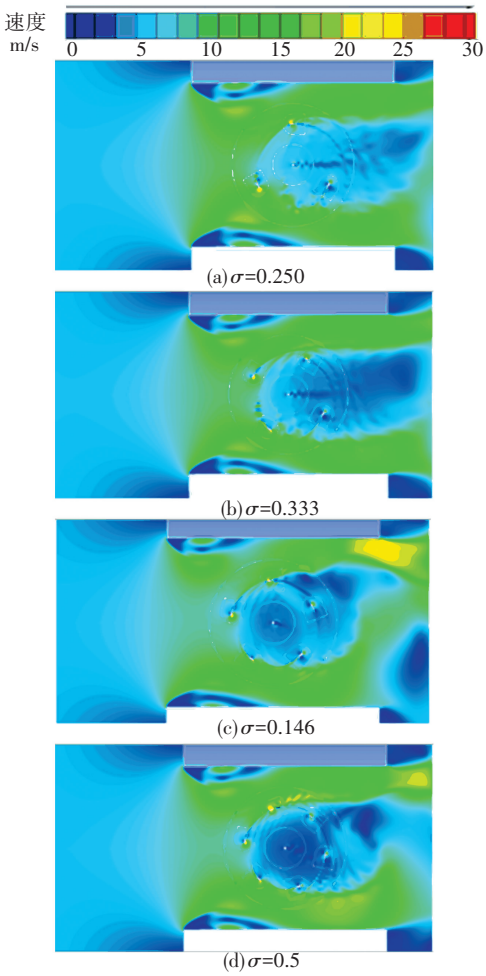


图 8　BASB-VAWTs 多叶片速度云图

Fig.8　Mult-blade velocity contour map of BASB-VAWTs

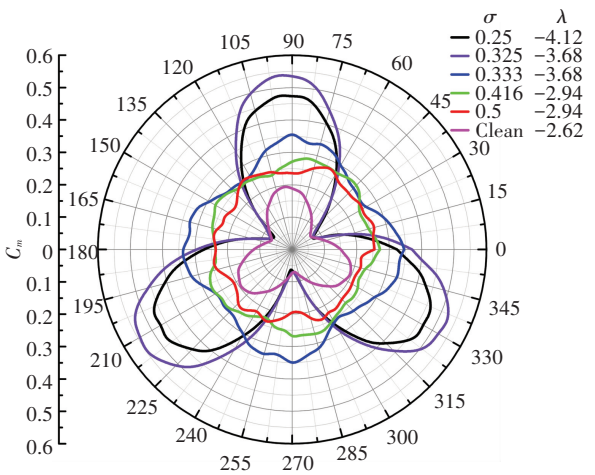


图 9 矩形 BASB−VAWTs 的载荷波动

Fig.9 Load fluctuation of rectangle BASB−VAWTs

σ = 0.250 的 BASB−VAWTs 相比原始 SB−VAWTs,虽具有相同实度,由于建筑扩散体的存在,风载增大,其平均 C_m 大幅提升,但载荷波动变得非常剧烈,在一个旋转周期内 C_m 波动峰谷值为 0.395 9,而原始 SB−VAWTs 的 C_m 波动峰谷值为 0.105 9.

3.3 翼型对 BASB−VAWTs 气动性能的影响

基于以上研究,得到一定实度下最大风能利用系数所对应的尖速比,在此最佳设计参数与最佳运行参数下,研究翼型对 BASB−VAWTs 气动性能的影响,如表 5 所示.

结果表明:NACA0021 最大厚度较大,捕获风能的能力较优,具有大厚度 NACA0021 对称翼型的 BASB−VAWTs 在各个建筑扩散体之间均具有最大的风能利用系数,其在圆形扩散体之间最大风能利用系数为 1.413,较原始风力机提升 4.47 倍,但其瞬时力矩系数在一个旋转周期内方差较大,故其载荷波动较为剧烈. FXLV152 对称翼型则能提供较为稳定的载荷同时也具有较大的风能利用系数,其在圆形扩散体之间最大风能利用系数为 1.269,较原始风力机提升 4.02 倍. S809 非对称翼型则使 BASB−VAWTs 气动性能的增幅大幅降低,这也印证了文献[23]中非对称翼型不适用于直线翼垂直轴风力机的结论.

表 5 翼型对 BASB−VAWTs 气动性能的影响

Tab.5 Aerodynamic performance of BASB−VAWTs with different airfoils

设计参数	翼型	$C_{P_{\max}}$	$\bar{C}_m$	力矩峰谷值	力矩方差
正圆形 (σ = 0.333, λ_{opt} = 4.12)	NACA 0 021	1.413	0.343 0	0.174 5	0.002 388
	S 1 046	1.220	0.296 1	0.121 1	0.000 933 9
	FXLV152	1.269	0.308 0	0.106 9	0.000 684 0
	S809	1.264	0.306 9	0.136 8	0.001 120
椭圆形 (σ = 0.333, λ_{opt} = 3.68)	NACA 0 021	0.790 9	0.214 9	0.072 27	0.000 458 6
	S 1 046	0.726 9	0.197 5	0.048 99	0.000 140 0
	FXLV152	0.745 7	0.202 6	0.044 38	0.000 110 8
	S809	0.540 8	0.147 0	0.048 14	0.010 18
矩形 (σ = 0.25, λ_{opt} = 4.12)	NACA0021	1.176	0.285 6	0.421 5	0.020 89
	S1046	0.873 2	0.211 9	0.314 6	0.010 54
	FXLV152	1.114	0.270 5	0.287 4	0.008 369
	S809	0.784 8	0.190 5	0.386 5	0.016 40
菱形 (σ = 0.416, λ_{opt} = 2.62)	NACA0021	0.891 4	0.340 2	0.112 6	0.000 506 0
	S1046	0.869 0	0.331 6	0.093 08	0.000 277 5
	FXLV152	0.616 5	0.235 3	0.092 30	0.000 580 4
	S809	0.457 8	0.174 8	0.151 0	0.001 006
原始 (σ = 0.25, λ_{opt} = 2.62)	NACA0021	0.316 0	0.120 6	0.111 9	0.001 348

4 结 论

1)建筑扩散体聚风效应及建筑迎风面与背风面的较大压差可大幅提升其流道间风品质,且聚风效果与建筑纵向长度呈正相关.

2)实度过小,则无法很好地捕获高品质风能,而实度过大,则使叶片之间的气动损失较大. 故在具有相同实度时,应首选叶片数量较多的 BASB−VAWTs.

3)选用较厚的 NACA 系列对称翼型可最大幅度提升风能利用系数,选用 S 系列对称翼型与 FX 系列对称翼型可降低载荷波动,而非对称翼型不适用于 BASB−VAWT.

4)具有棱角建筑产生的分离涡强度及尺度较大,增强了建筑间流场结构复杂性,圆弧形截面建筑则使来流损失降低,故应首选圆弧形截面建筑.

参考文献

[1] LI Q S, SHU Z R, CHEN F B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation[J]. Applied Energy, 2016, 165(1): 777

[2] DIXIT M K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: a review of literature to investigate embodied energy parameters [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 390

[3] 邓江, 乔琼. 建设生态环保型节能建筑的思考[J]. 生态经济, 2009(7): 121
Deng Jiang, Qiao Qiong. Speculation on constructing ecological environmental protection energy-conserving architecture[J]. Ecological Economy, 2009(7): 121

[4] KEIRSTEAD J, JENNINGS M, SIVAKUMAR A. A review of urban energy system models: approaches, challenges and opportunities [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3847

[5] BAHAJ A S, MYERS L, JAMES P A B. Urban energy generation: influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(2): 154

[6] DAYAN E. Wind energy in buildings[J]. Refocus, 2006, 7(2): 33

[7] MULLER G, JENTSCH M F, STODDART E. Vertical axis resistance type wind turbines for use in building[J]. Renewable Energy, 2009, 34(5): 1407

[8] HEYMANN M. Signs of hubris: the shaping of wind technology styles in Germany, Denmark, and the United States, 1940-1990 [J]. Technology and Culture, 1998, 39(4): 641

[9] 袁行飞, 张玉. 建筑环境中的风能利用研究进展[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 891
YUAN X F, ZHANG Y. Progress in the study of wind energy utilization in the bulit environment [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 891

[10] KUMBERNUSS J. Investigation on an axial passive magnetic bearing system (APMBS) and its application in building integrated vertical axis wind turbines [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2012

[11] LI Q S, CHEN F B, LI Y G, et al. Implementing wind turbines in a tall building for power generation: a study of wind loads and wind speed amplifications[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 116(116): 70

[12] ABOHELA I, HAMZA N, DUDEK S. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 1106

[13] BAYOUMI M, FINK D, HAUSLADEN G. Extending the feasibility of high-rise façade augmented wind turbines[J]. Energy and Buildings, 2013, 60: 12

[14] MERTENS S. Wind energy in urban areas: concentrator effects for wind turbines close to buildings [J]. Refocus, 2002, 3(2): 22

[15] HEO Y G, CHOI N J, CHOI K H, et al. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine[J]. Energy and Buildings, 2016, 129(1): 162

[16] LI Q A, MAEDA T. Study on flow around straight-bladed vertical axis wind turbine under low tip speed ratio[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2013, 9(3): 51

[17] MOHAMED M H. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance[J]. Energy, 2013, 57(1): 495

[18] QING A L, MAEDA T, KAMADA Y, et al. Effect of rotor aspect ratio and solidity on a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis by the panel method[J]. Energy, 2017, 121: 1

[19] QING A L, MAEDA T, KAMADA Y, et al. Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Energy, 2015, 90: 784

[20] EBOIBI O, DANAO L A M, HOWELL R J. Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers [J]. Renewable Energy, 2016, 92: 474

[21] CHENG Z S, MADSEN H A, GAO Z, et al. Effect of number of blades on the dynamics of floating straight-bladed vertival axis wind turbines[J]. Renewable Energy, 2017, 101: 1285

[22] 张立勋, 梁迎彬, 李二肖, 等. 实度对直叶片垂直轴风力机风轮气动性能的影响分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 169
ZHANG Lixun, LIANG Yingbin, LI Erxiao, et al. Effects analysis of solidity on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 169

[23] MOHAMED M H. Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes[J]. Energy, 2012, 47(1): 522

[24] 高伟, 李春, 叶舟, 等. 垂直轴风力机动态特性及气动性能[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2): 146
GAO Wei, LI Chun, YE Zhou, et al. Dynamic characteristics and aerodynamic performance of vertical axis wind turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2): 146

[25] KHAN M J, IQBAL M T, QUAICOC J E. Design considerations of a straight bladed Darrieus rotor for river current turbines[C]// 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal: IEEE, 2006: 1750

[26] 徐璋, 王茜, 皇甫凯林, 等. 襟翼对垂直轴风力机性能影响的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2011, 31(9): 715
XU Zhang, WANG Qian, HUANGFU Kailin, et al. Influence of various flaps on performance of vertical axis wind turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(9): 715

[27] 张东方. 建筑环境中的有效风能利用研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2010
Zhang Dongfang. Wind energy effective utilization in the built environment[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010

[28] CASTELLI M R, ARDIZZON G, BATTISTI L, et al. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine [C]// Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and exposition. Vancouver: ASME, 2010

[29] WONG S Y, LAM K M. Effect of recessed cavities on wind-induced loading and dynamic responses of a tall building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 114(2): 72

[30] QING A L, MAEDA T, KAMADA Y. Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine in three-dimensional analysis(Part Ⅱ: For predicting flow field and performance)[J]. Energy, 2016, 104(1): 395

(编辑　王小唯)