

长方体建筑屋顶风能利用效能研究

袁行飞, 张 玉

(浙江大学 空间结构研究中心, 杭州 310058)

摘要:屋顶安装小型风力发电机是近几年来新发展的一种风能利用形式。以年平均风速为对象, 研究建筑屋顶风能利用的效能, 提出衡量建筑风能利用效能的6个性能指标。利用CFD数值模拟方法分析了长方体建筑平屋顶对风能的利用效果, 考察了不同迎风角下控制点的性能指标, 探讨屋顶风力机安装的最佳位置和排列形式。对长方体建筑屋顶形式进行分析, 对比了4种不同屋顶形式的风能利用效能。

关键词:风能; 建筑环境; 建筑屋顶; 利用效能

中图分类号: TU023; TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)03-0117-07

Wind Power Utilization Efficiency on Roof of Rectangular Buildings

YUAN Xingfei, ZHANG Yu

(Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: Installing small wind turbines on the roof of buildings is a new way of wind power utilization in recently years. Based on the annual mean wind speed, the efficiency of wind power utilization on roofs of buildings was studied and the evaluation indexes for the utilization efficiency were proposed. With the help of CFD numerical analysis, the analysis on wind power utilization efficiency on flat roofs of rectangular buildings was carried out. The performance indexes of reference points under different windward angles were investigated. The best position and arrangement of wind turbines on the roof were also discussed. Furthermore, the utilization efficiency of four roofs with different shapes were analyzed and compared with that of flat roof.

Key words: wind power; building environment; building roofs; utilization efficiency

大力开发风能是解决中国能源短缺、实现可持续发展战略的重要途径之一^[1]。建筑环境中的风能利用具有免于输送的优点, 所产生的电能可直接用于建筑本身, 为绿色建筑的发展提供了一种新的思路, 对实现建筑可持续发展、缓解能源与环境矛盾具有重要而深远的意义。

近年来一些学者对建筑环境中的风能利用技术进行了探索。研究主要着眼于可行性分析^[2-4]、建筑风环境模拟^[5-7]、建筑风力集中器设计^[8-9]以及适宜建筑环境的风力发电机开发^[10-11]等方面。与沙漠、旷野、近海相比, 建筑环境中的风场相对复杂、紊流

加剧、风速降低, 但局部区域也存在较大风速, 如高层建筑顶部的小急流、建筑物开洞部位的穿堂风、相邻建筑通道的夹道效应等。为提高风能利用效率, 风力机通常安装在上述部位。根据建筑中风力机的放置位置, 风能利用建筑大致可分为: 顶部安装型、空洞安装型和通道安装型。其中顶部安装型应用较为广泛。本文采用CFD数值模拟方法分析了长方体平屋顶建筑的风能利用效能, 研究了不同迎风角对建筑风能集结效果的影响, 探讨了风力机的最佳安装位置, 并对屋顶形式进行了优化分析, 提出了有利于风能集结效果的屋顶形式, 为实际工程应用提

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 浙江省杰出青年团队项目(R1080363)

作者简介: 袁行飞(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨空间结构研究, (E-mail) yuanxf@zju.edu.cn.

供理论基础和技术支撑。

1 建筑风能利用效能评价指标

风力机的功率与风速三次方成正比,因此风力机的安装位置应选取风速相对较大的位置,同时避免高湍流。为降低成本,还应尽量降低风力机的安装高度。由此提出以下评价屋顶风能利用效能的指标:

1) 风速增大系数 $C_v = V/V_0 - 1$, 衡量建筑风能集结效果最主要的参数,其中 V 为高度 z 处的实际风速, V_0 为高度 z 处未受建筑扰动时的风速。 C_v 越大,表明建筑对风能的集结效果越好, N 个位置的总风速增大系数为 $C_{v\text{总}} = \sum_{i=1}^N C_{vi}$ 。

2) 湍流强度 I , 衡量建筑风场的湍流程度。风场的湍流会减少风机输出功率,引起极端荷载,最终削弱破坏风力机,因此风力机的安装位置应避免高湍流。

3) 屋顶紊流厚度 δ , 是屋顶风速变化梯度较大区域和高湍流区域两者高度的最大值,用来评估风力机的安装高度。

4) 实际风速 V , 衡量具体位置的风能情况,评价其风能利用的可行性,同时为适宜风力机的选择提供依据。

5) 风速倾斜角 γ , 水平轴风力机尚不能利用垂直方向的风速进行发电;对于垂直轴风力机,风速倾斜角在一定程度上可提高风力机的功率^[12]。

6) 行人高度处风速 $V_{2,\text{max}}$, 衡量建筑风环境的舒适度。为满足建筑风环境舒适度,要求 $V_{2,\text{max}} \leq 5 \text{ m/s}$ 。

2 建筑风环境数值模拟假定和方法

2.1 数值模拟基本假定

1) 流体不可压缩;2) 流体为 Newton 流体,忽略粘性耗散;3) 流体在固壁上无滑移;4) 流体各向同性;5) 流动为稳态。

2.2 计算模型和方法

1) 几何建模及网格划分

几何建模和网格划分在 FLUENT 6.3 前处理软件 Gambit 中完成。计算流域如图 1, H 为建筑物的高度。采用四面体单元进行非结构化网格离散,网格尺寸由内往外逐步增大。

2) 湍流模型

考虑到在钝体绕流中的精度,采用可实现的 $k-\epsilon$ 湍流模型 (Realizable $k-\epsilon$)。采用非平衡的壁面函数法处理近壁面的湍流状态。该法能考虑压力梯度和偏离平衡假设带来的影响,对具有像环绕、分离、

再附、撞击等复杂流动的计算具有较高的精度。

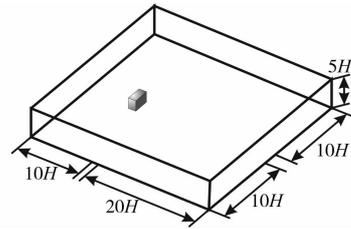


图 1 计算流域示意图

3) 边界条件

进流面采用速度入口边界,出口采用压力出口边界,计算区域上壁面及两侧壁面采用对称边界,相当于设置光滑壁面,其剪切应力为 0;建筑物表面和地面采用无滑移的壁面条件 (wall),沿壁面切向流体速度为 0。

入口边界采用 UDF 接口输入,风速采用满足指数律的风剖面函数:高度 Z 处的风速 $\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \left(\frac{Z}{10}\right)^\alpha$;湍动能 $k = \frac{3}{2} (\bar{U}(z) \times I)^2$;耗散率 $\epsilon = 0.09^{0.75} \times k^{3/2} / l$,湍流强度 $I_u(z) = I_0 \left(\frac{Z}{H_T}\right)^{-\alpha-0.05}$, $Z=30 \text{ m}$ 时的湍流强度 $I_u(30)$ 可由地貌系数 α 得出:A 类地貌的 $I_0 = 0.081$, B 类地貌的 $I_0 = 0.095$, C 类地貌的 $I_0 = 0.109$, D 类地貌的 $I_0 = 0.116$;湍流积分长度 $l = 100 \times (Z/30)^{0.5}$ 。取 C 类地貌, $\bar{U}_{10} = 3 \text{ m/s}$, $\alpha = 0.22$ 。

4) 计算方法

计算采用 3D 单精度,分离式求解器,空气模型选用不可压缩的常密度空气模型,对流项的离散采用精度较高的二阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法。计算中使用自适应网格技术 (Adapted Grid),每步迭代均对压力梯度大的区域进行网格加密,以便更准确地预测复杂的流动。

3 长方体平屋顶建筑风能利用效果及风力机最佳位置

3.1 迎风角 $\varphi=0^\circ$ 时屋顶风能利用效果

长方体平屋顶建筑基本模型:长 $L=50 \text{ m}$,宽 $W=20 \text{ m}$,高 $H=30 \text{ m}$,如图 2, h 为屋顶以上高度,由于模型的对称性,取屋顶前沿中间和后沿各 2 个参考位置,分别为 $A(-W/2, 0, H+h)$ 、 $D(W/2, -L/2, H+h)$ 、 $B(0, 0, H+h)$ 、 $E(0, -L/2, H+h)$ 、 $C(W/2, 0, H+h)$ 、 $F(W/2, -L/2, H+h)$,分析屋顶的风能集结效果。

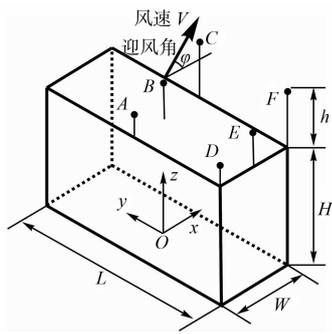


图2 长方体平屋顶建筑模型

通过CFD数值模拟,可得出各指标参数的变化情况。图3为建筑物中间竖向剖面($y=0\text{ m}$)和边线竖向剖面($y=-25\text{ m}$)的风速 V 等值线图。图4为屋顶风速增大系数 C_v 随屋顶以上高度 h 的变化情况。

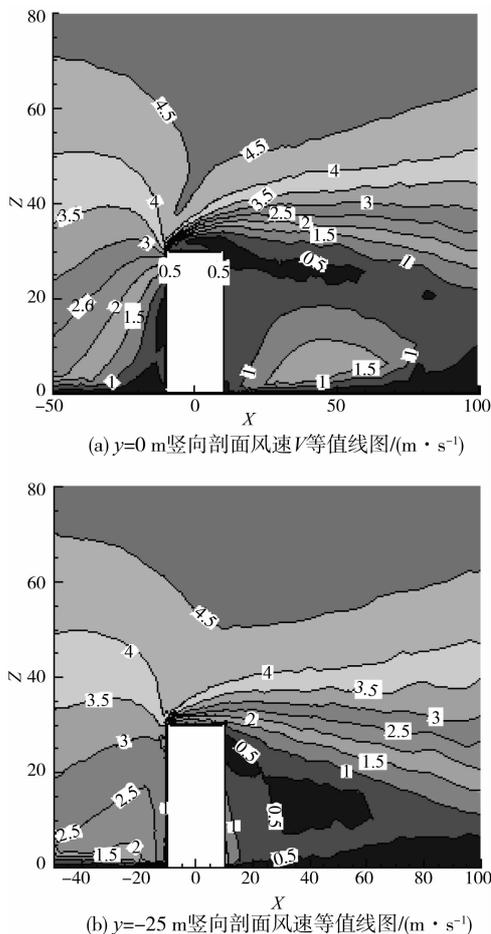
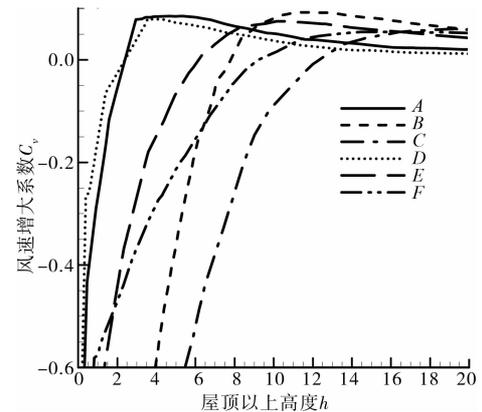


图3 建筑竖向剖面风速等值线图

由图3可见:风速 V 在屋顶附近的变化梯度较大,且随 h 的增加而增大,并趋于稳定。当 $h>3\text{ m}$ 时,前沿点的风速增大梯度趋于稳定;当 $h>8\text{ m}$ 时,中线点的风速增大梯度趋于稳定;当 $h>12\text{ m}$ 时,后沿点的风速增大梯度趋于稳定。屋顶湍流厚度 δ 沿来流方向呈增厚趋势。屋顶湍流强度随 h 的增大先增大后减小,在 $h=5\text{ m}$ 内较大,高湍流区出现在建

筑屋顶的中前方。

图4 $\phi=0$ 时风速增大系数 C_v

由图4可见,前沿A点的风速增大系数在 $h=5\text{ m}$ 处达到最大值0.085,对应的实际风速为4.29 m/s,湍流强度为0.22;D点在 $h=3.5\text{ m}$ 处达到最大值0.079,对应的实际风速为4.24 m/s,湍流强度为0.23。A点的风速倾斜角最大值可达 70° ,D点的风速倾斜角最大值可达 46° ;在 $h=5\text{ m}$ 处,A点的风速倾斜角仍有 28° ,D点为 17° 。中线B点的风速增大系数在 $h=11\text{ m}$ 处达到最大值0.093,对应的实际风速为4.47 m/s,湍流强度为0.18;E点在 $h=10\text{ m}$ 处达到最大值0.075,对应的实际风速为4.37 m/s,湍流强度0.16。后沿C点的风速增大系数在 $h=19.5\text{ m}$ 处达到最大值0.060,对应的实际风速为4.51 m/s,湍流强度为0.13;F点在 $h=14.5\text{ m}$ 处达到最大值0.055,对应的实际风速为4.39 m/s,湍流强度为0.14。中线点和后沿点的风速倾斜角均在 0° 附近波动。

综上所述,沿来流风方向,屋顶紊流厚度逐渐增厚;风速增大系数、湍流强度和实际风速随 h 的变化均是前沿点先达到最大值,接着是中线点,之后是后沿点;各参考位置风速增大系数最值所对应的风速均大于 3 m/s ,处于有效风速范围内;前沿点的风向变化比较大,中线点和后沿点的风向变化不大。

3.2 不同迎风角下屋顶风能利用效果

考虑建筑对称性,分别在建筑屋顶的前沿、中线和后沿增加一个参考位置: D_0 、 E_0 、 F_0 与位置D、E、F对称。由分析知,为提高风力机的发电效能,风力机应在年主风向垂直的方向上尽量多的排放。假定风力机沿建筑长度方向排布,分别分析 $h=5\text{ m}$ 处前沿点(A、D、 D_0), $h=10\text{ m}$ 处中线点(B、E、 E_0)和 $h=15\text{ m}$ 处后沿点(C、F、 F_0)在不同来流风向(0.0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 、 90.0°)的风能利用效果。分析结果见表1。

表 1 不同迎风角下各个参考点的性能参数

迎风角	前沿 ($h=5\text{ m}$)			中线 ($h=10\text{ m}$)			后沿 ($h=15\text{ m}$)			$V_{2,\max}/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	A	D	D_0	B	E	E_0	C	F	F_0		
0.0°	C_v	0.085	0.072	0.072	0.086	0.074	0.074	0.048	0.054	0.054	3.6
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.290	4.240	4.240	4.420	4.370	4.370	4.380	4.400	4.400	
	I	0.220	0.200	0.200	0.190	0.160	0.160	0.150	0.130	0.130	
	$\cos\gamma$	0.877	0.953	0.953	0.984	0.994	0.994	0.996	0.998	0.996	
	ΣC_v		0.229			0.234			0.156		
22.5°	C_v	0.051	0.038	-0.013	0.065	0.061	-0.008	0.047	0.053	0.013	3.3
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.150	4.100	3.900	4.340	4.320	4.040	4.370	4.410	4.230	
	I	0.220	0.160	0.190	0.180	0.130	0.180	0.150	0.120	0.150	
	$\cos\gamma$	0.923	0.971	0.921	0.990	0.997	0.973	0.998	0.999	0.992	
	ΣC_v		0.076			0.118			0.113		
45°	C_v	0.064	0.018	-0.004	0.046	0.061	-0.001	0.054	0.054	0.041	3.8
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.200	4.020	3.940	4.260	4.310	4.070	4.400	4.400	4.350	
	I	0.24	0.170	0.170	0.190	0.160	0.200	0.160	0.150	0.160	
	$\cos\gamma$	0.959	0.976	1.000	0.999	0.993	0.994	1.000	0.997	0.998	
	ΣC_v		0.078			0.106			0.149		
67.5°	C_v	0.001	-0.005	-0.065	0.029	0.012	-0.032	0.039	0.013	0.008	3.5
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.960	3.930	3.700	4.190	4.120	3.940	4.340	4.230	4.210	
	I	0.150	0.140	0.140	0.140	0.130	0.130	0.130	0.120	0.120	
	$\cos\gamma$	0.984	0.978	0.982	1.000	0.986	1.000	1.000	0.994	0.999	
	ΣC_v		-0.069			0.010			0.060		
90°	C_v	-0.150	0.053	-0.229	-0.083	0.028	-0.175	-0.002	0.013	-0.045	3.5
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.360	4.160	3.050	3.730	4.180	3.360	4.170	4.230	3.990	
	I	0.180	0.210	0.160	0.180	0.180	0.180	0.160	0.150	0.150	
	$\cos\gamma$	1.000	0.983	0.999	1.000	0.987	1.000	1.000	0.996	1.000	
	ΣC_v		-0.326			-0.230			-0.034		

通过分析可见,在 $(0.0^\circ, 45^\circ)$ 之间,前沿,中线和后沿的风速增大系数合值均随着 φ 的增大先减小后增大,最大值出现迎风角 $\varphi=0.0^\circ$ 时;在 $(45.0^\circ, 90.0^\circ)$ 之间,风速增大系数合值急剧减小;当 $\varphi=90^\circ$ 时,达到最小值。

3.3 屋顶风力机安装位置

屋顶风力机的安装位置应选取风速相对较大,且变化较平稳的位置,以减小风力机叶轮的脉动,同时避免高湍流。屋顶安装风力机的高度宜满足 $h \geq \delta + D/2$, D 为水平轴风力机的直径,对于垂直轴风力机的安装高度宜满足 $h \geq \delta$ 。

由前述分析知,对于平屋顶不同位置来说,前沿点的风能集结效果最好——风速比达到最值时的高度最低,且风速变化梯度趋于平稳时的高度也最低,同时避开了高湍流;由于建筑屋面对风速的阻碍作用,建筑物屋顶上的风速在同一高度下,由前沿到后

沿呈下降趋势,随着高度的增加,同一高度处,屋面的风速趋于一致。

建筑物屋顶安装风力机的紊流,除了来自建筑物的影响之外,还有一个重要的因素:风力机尾流的相互影响。为了尽量减少风力机尾流的相互影响,风力机的排列间距应满足一定的要求^[12]。因此风力机应在年主风向垂直的方向上尽量多的排放,对于安装风力机的建筑来说,应尽可能使建筑的长度方向垂直于年主风向方向,即来流风向控制在 $(-45^\circ, 45^\circ)$,以提高风力机的发电效能。

假设年主风向垂直于建筑长度方向,当风机尺寸 $D > W/8$ 时,风力机沿前沿单排布置的风能利用效率最佳,考虑到风速倾斜角的问题,应优先选择升力型垂直轴风力机^[12],当安装水平轴风力机时,可倾斜一定角度,安装高度大于5 m;亦可沿中线单排布置,安装高度大于10 m,其利用效能较好,还可减

少结构不均匀受力;当风机尺寸 $D < W/8$, 风力机沿宽度方向可多排布置, 其中前后排有高差排列的风能利用效能较前沿单排布置和中线单排布置方式好, 既可以有效地利用风能, 降低安装高度, 又可以减小风力机之间的尾流影响。

4 长方体建筑不同屋顶形式分析

4.1 不同屋顶形式的几何模型

目前, 在将风力机引入建筑物的技术中, 平屋顶上直接安装风力机是一种最直接最易实现的方式, 因此本文在分析其对风能集结效果的基础上, 将其作为分析其他屋顶形式风能集结效果的参考依据, 如图7为4种不同的屋顶形式, 建筑物的长度 L 、宽度 W 和总高 H 均不变。其中图7(a)为前高单坡型屋顶; 图7(b)为后高单坡型屋顶; 图7(c)为圆弧双坡型屋顶; 图7(d)为梯形双坡型屋顶, 屋顶面的宽度 $l=5\text{ m}$ 。各屋顶形式的屋顶倾斜高度分别用 M_a 、 M_b 、 M_c 、 M_d 表示。取各屋顶形式的屋顶倾斜高度分别为 2.5 、 5.0 、 7.5 、 10.0 m 与平屋顶 ($M=0$) 进行比较分析。

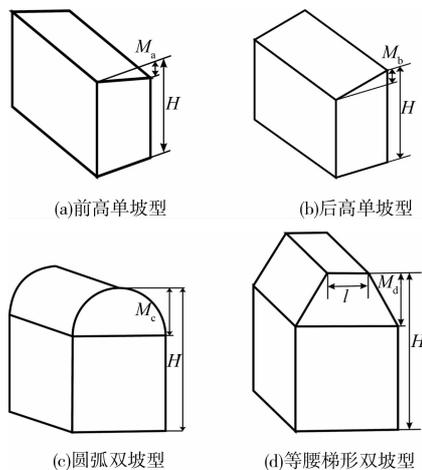
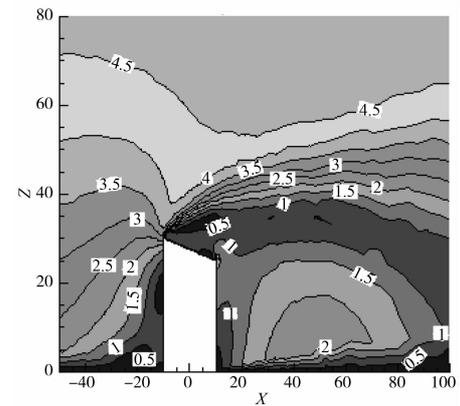


图7 屋顶不同形式

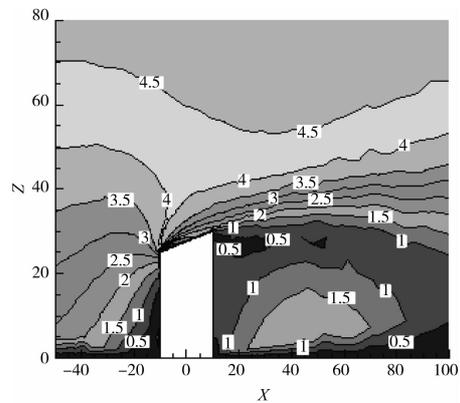
4.2 不同形式屋顶的风能利用效能

分析迎风角 $\varphi=0$ 时, 各屋顶形式的风能利用效能。图8为各屋顶形式屋顶倾斜高度等于 5 m 时, 建筑中间竖直剖面的风速 V 等值线图和湍流强度 I 等值线图。由图8可见, 前高单坡型屋顶前沿点的紊流厚度与平屋顶的基本相同, 中线点和后沿点的紊流厚度有所增大, 同一屋顶高度处, 风速有所减小; 后高单坡型屋顶前沿点的紊流厚度较平屋顶的高, 中线点尤其是后沿点的紊流厚度有所减小; 双坡型屋顶中线点的紊流厚度较平屋顶有所减小, 屋顶以上同一 h 下, 圆弧双坡型屋顶中线点的风速较平

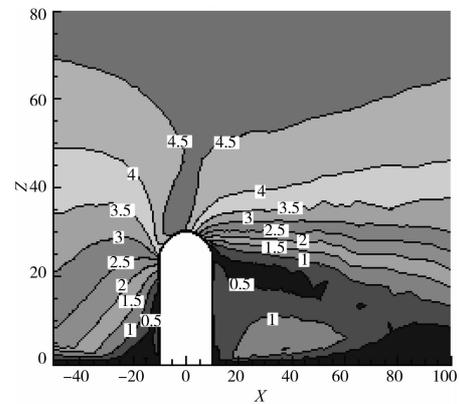
屋顶的大。



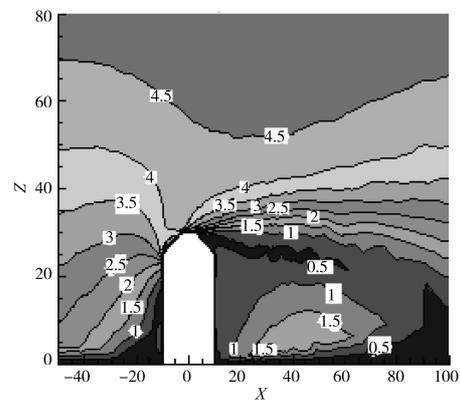
(a) 前高单坡型 $y=0\text{ m}$ 竖向剖面风速等值线



(b) 后高单坡型 $y=0\text{ m}$ 竖向剖面风速等值线



(c) 圆满弧双坡型 $y=0\text{ m}$ 竖向剖面风速等值线

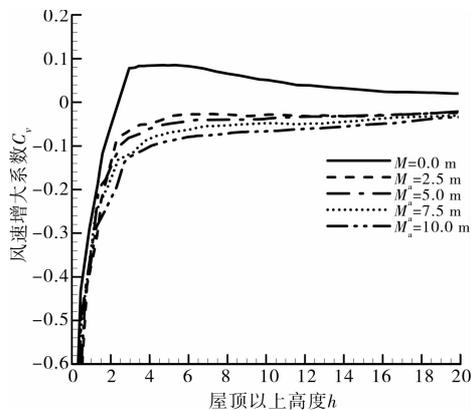


(d) 梯形双坡型 $y=0\text{ m}$ 竖向剖面风速等值线

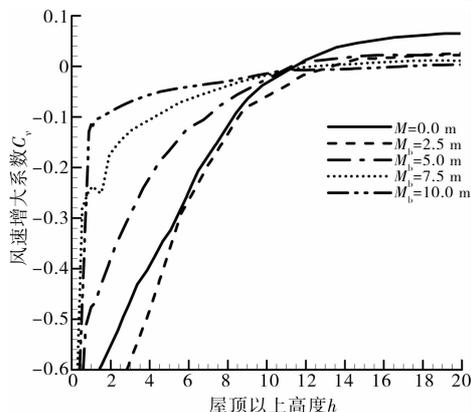
图8 各屋顶形式建筑 $y=0\text{ m}$ 竖直面风速等值线图 (m/s)

图 9 为不同屋顶倾斜高度下,各形式屋顶的风速增大系数 C_v 随屋顶以上高度 h 的变化情况。相比平屋顶形式,以上 4 种屋顶形式,只有圆弧双坡型屋顶和梯形双坡型屋顶的风速增大系数最值有所提高,其中圆弧屋顶提高的幅度最大。随着屋顶倾斜高度的增加,圆弧屋顶的风速增大系数最值越来越大,且达到最值时所对应的高度 h 也越来越小;其他形式屋顶的风速增大系数最值越来越小,但最值所对应的高度 h 越来越小。

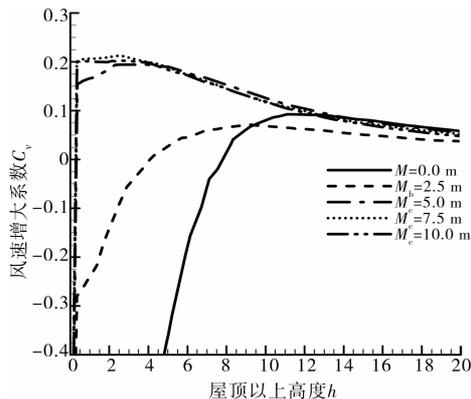
综上,当迎风角 $\varphi=0$ 时,前单坡屋顶适宜沿前沿单排安放风力机,中线和后沿的紊流厚度较大,不宜安放风力机;虽然后单坡屋顶的风速增大系数较平屋顶有所减小,但中线和后沿的紊流厚度明显减



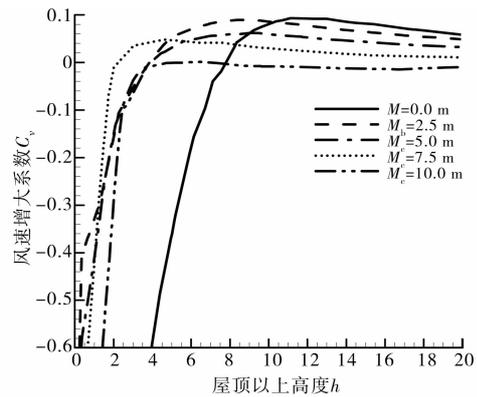
(a) 前单坡型前沿点A的风速增大系数



(b) 后单坡型后沿点C的风速增大系数



(c) 圆弧双坡型中心点B的风速增大系数



(d) 梯形双坡型中心点B的风速增大系数

图 9 不同屋顶高度下各屋顶形式特征位置风速增大系数 C_v 变化情况

小,风力机沿前沿、中线和后沿安放的利用效能相当,当建筑宽度允许的情况下,可以利用建筑本身前后的高差实现风力机的多排布置;圆弧双屋顶和梯形双屋顶沿中线安放风力机的风能利用效能较平屋顶有所提高,由于只可单排安放风力机,适宜建筑宽度较小的建筑。

5 结 论

通过 CFD 数值模拟分析了长方体建筑屋顶风能利用效果,比较了不同迎风角、不同屋顶形式对风能集结效果的影响,得出以下结论:

1) 长方体平屋顶建筑的屋顶对风能有一定的集结效果,其集结效果受来流风向影响较大。

2) 长方体平屋顶建筑沿屋顶前沿点安装风力机的风能利用效果最佳——相同风速下,其安装高度最低,同时应将来流风向角控制在 $(-45^\circ, 45^\circ)$ 的范围内。当建筑宽度较大时,长方体平屋顶建筑屋顶可前后有高差地多排安放风力机,既减小风力机尾流的影响,同时也可增加屋顶风力机的安装数目,提高建筑屋顶的总发电量。

3) 几种不同屋顶形式下,后单坡屋顶宜发展前后有高差多排布置风力机;当屋顶单排布置风力机时,梯形双坡屋顶和圆弧双坡屋顶沿中线单排布置风力机的效能最佳。

4) 通过分析得知建筑屋顶对风能具有一定的集结效果,但建筑屋顶风场比较复杂,紊流很大,对风力机性能的影响不容忽视,风力机能否在建筑中得到广泛应用,还需进一步的研究。

参考文献:

[1] 石定环. 可再生能源与可持续发展[J]. 中国科技产业,

- 2008(1):15-18.
- SHI Dinghua. Renewable energy and sustainable development [J]. Science & Technology Industry of China, 2008(1): 15-18.
- [2] Taylor D. Using buildings to harvest wind energy [J]. Building Research & Information, 1998, 26(3): 199-202.
- [3] Mertens S. Wind energy in urban areas: concentrator effects for wind turbines close to buildings [J]. Refocus, 2002, 3(2): 22-24.
- [4] 李秋胜, 李永贵, 陈伏彬, 等. 风能发电在超高层建筑中的应用研究[C]//第十四届全国风工程学术会议论文集, 2009:801-805.
- LI Qiusheng, LI Yonggui, CHEN Fubin, et al. Application research of energy generation by wind on high-rise buildings [C]//The 14th proceeding of national wind engineering, 2009, 801-805.
- [5] Lin L U, Yan K I P. Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2):450-461.
- [6] 姜瑜君, 桑建国, 张伯寅. 高层建筑的风环境评估[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2006, 42(1):68-73.
- JIANG Yujun, SANG Jianguo, ZHANG Boyin. An evaluation on wind environment around skyscrapers [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(1):68-73.
- [7] 苏国, 陈水福. 复杂体型高层建筑表面风压周围风环境数值模拟[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 152-157.
- SU Guo, CHEN Shuifu. Numerical simulation of wind pressures and wind environment around a complex shaped highrise building [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 144-149.
- [8] Mertens S. The energy yield of roof mounted wind turbines [J]. Wind Engineering, 2003, 27(6):507-517.
- [9] 潘雷, 陈宝明. 建筑环境中风能利用的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2006.
- [10] Holdsworth B. Options for micro-wind generation: part1 [J]. Renewable Energy Focus, 2009, 10(2): 60-63.
- [11] 王乃粒. 城市风力发电[J]. 世界科学, 2005(1):39-40.
- WANG Naili. Urban wind power generation [J]. World Science, 2005(1):39-40.
- [12] 陈坤, 贺德馨. 风力机尾流数学模型及尾流对风力机性能的影响研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1): 84-87.
- CHEN Kun, HE Dexin. The study for the wake model of wind turbine and the wake effects on the performance of wind turbine [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(1):84-87.

(编辑 王秀玲)