DOI: 10.3901/JME.2018.02.191

建筑物群内屋顶形状对屋顶风力机微观选址的影响^{*}

侯亚丽^{1,2} 汪建文^{1,2} 王强³ 王鑫厅¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术教育部重点实验室 呼和浩特 010051;

3. 浙江大学能源清洁应用国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 以符合城市粗糙大气边界层的速度剖面为入口边界条件, 采用 *Realizable k-ε* 湍流模型对北方地区常见的、顺列布置的斜屋顶、金字塔屋顶、三角形屋顶及平屋顶建筑物群顶面上方的流动形式、风速及湍流强度分布特征进行了模拟计算, 结果表明: 平屋顶最利于屋顶风力机的安装, 其次为金字塔屋顶, 最差为斜屋顶和三角形屋顶; 对于金字塔屋顶、斜屋顶和三角形屋顶这些非平屋顶建筑物, 不合适安装低于屋顶最高位置的屋顶风力机, 且可优先考虑将屋顶风力机安装于屋檐; 为了避开强湍流区域, 以上四种屋顶形状顶面屋顶风力机的安装高度不得低于 $1.1H$; 在建筑物群内, 当安装高度高于 $1.2H$ 后, 屋顶风力机安装于第一排建筑物顶面任何位置时都可避开屋顶的强湍流区域, 而此排建筑物顶面风速达到来流风速的高度随着屋顶形状的不同而不同; 当安装高度高于 $1.5H$ 后, 可忽略屋顶形状的不同, 将屋顶风力机安装于群内所有建筑物顶面任何位置。

关键词: 屋顶形状; 屋顶风力机; 湍流强度; 风加速因子; 微观选址

中图分类号: TK513

Influence of Roof Shape on Micrositing of Rooftop Wind Turbine in the Building Group

HOU Yali^{1,2} WANG Jianwen^{1,2} WANG Qiang³ WANG Xinting¹

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

2. Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Technology of Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051;

3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The purpose is to explore the flow pattern, wind velocity and turbulence intensity over the aligned arrays buildings with flat roof, gabled roof, pyramidal roof, and pitch roof, respectively. The suitable wind profile based on urban rough atmospheric boundary layer is applied in the inflow condition and *Realizable k-ε* turbulence model is utilized in the simulations. Results from this investigation shown that the flat roof is the best for installation of the wind turbine, then the pyramidal roof is the secondary, and the pitch and gabled roof are the worst. Meanwhile, the installation height must be higher than 1.1 times of these four rooftop. For the non-flap buildings, it is not suitable to install the wind turbine at the height lower than the top of the building, while the eaves of the rooftop are the best installation locations. Moreover, for the height is higher than $1.2H$, the wind turbine should be installed at the front row of the building group, where the wind turbine exposes to the wind flow without high turbulence intensity, and the capability of wind flow recovery varies with the different roof shape. For the height is higher than $1.5H$, the influence of the roof shape can be ignored, and the wind turbine can be installed at the arbitrary locations at the rooftop in the building group.

Key words: roof shape; rooftop wind turbine; turbulence intensity; wind acceleration factor; micrositing

0 前言

随着全球城市化能源危机的急剧加快, 将小型

或微型风力发电系统(功率小于 2.5 kW 或风轮直径小于 1.25 m ^[1])直接安装于建筑物顶面, 即所谓的屋顶风力机, 已成为了最具潜力的城市可持续能源发展措施之一^[2-3]。但由于城市环境内建筑物顶面风场具有低风速、强湍流的特征^[4-5], 若屋顶风力机的安装位置和高度不恰当, 在来流风速很大的情况下,

^{*} 内蒙古自然科学基金(2015MS0540)和内蒙古自然科学基金重大(2016ZD04)资助项目。20161010 收到初稿, 20170509 收到修改稿

也会出现零输出功或损坏的情况^[6-8]。因此,在城市环境内对屋顶风力机恰当安装位置和高度的确定,即屋顶风力机的微观选址,是屋顶风力机得到推广使用的必要前提之一。2009 年,国际能源署已将建立适用于城市强扰动环境下筑物顶面风力机安装指导作为主要研究目标之一。

研究表明,城市大气边界层内风场特征受绿化带、建筑物屋顶形状、布局方式、建筑密度等地表特征的影响严重。因此,屋顶风力机的合理安装位置和高度也必将受到这些因素的影响。当前已有一些研究者对此进行了研究,如 LEDO 等^[3]利用数值模拟方法研究了 3 个风向下斜屋顶、金字塔屋顶和平屋顶上方的风资源特性,指出平屋顶上方的风能密度最大,最利于屋顶风力机的安装;ABOHELA 等^[9]采用 CFD 软件对平屋顶、半球形屋顶、三角形屋顶、拱形屋顶等六种屋顶在不同风向下、不同安装高度上风力机的输出功率进行了分析研究,结果表明在实际生活中应用较少的拱形和半球形屋顶上的湍流强度最小;PARK 等^[10]对超高层建筑安装风力发电系统的可行性进行了研究,结果表明正方形或长方形超高层建筑顶面和周边都将产生强湍流,在建筑物侧面会产生高风速,而圆柱形或三角形超高层建筑的顶面及周边的湍流强度较小,适合于安装小型风力机;YOSHIHID 等^[11]通过风洞试验和数值模拟两种方法研究了倾斜角度分别为 16.7° 、 26.6° 及 36.9° 的三种三角形屋顶周边的风场特征,结果表明,随着倾斜角度的增大,屋脊上流体分离和建筑物后方回流现象越严重,越不利于屋顶风力机的安装;侯亚丽等^[12]通过数值模拟对长方形平顶建筑物顶面风力机的合理安装位置和高度进行了分析,结果表明,安装高度至少要达到 $1.3H$ (H 为建筑物高度),以避免强湍流区域;在高度高于 $1.5H$ 后,建筑物顶面的风速出现一定的增大现象。

可见,国内外学者针对城市环境内屋顶风力机微观选址的研究已开展了一部分,但多数研究都是针对单体建筑物进行的,且当前也并未形成不同屋顶形状的建筑物顶面屋顶风力机的有效安装指导。

针对该问题,本文以实际生活中常见的 9 栋等高建筑物构成的建筑物群为研究对象,采用 CFD 方法,探寻了建筑物群内屋顶形状对屋顶风力机安装位置和高度影响的方式,初步形成了适用于城市环境内等高的斜屋顶、金字塔屋顶、三角形屋顶及平屋顶建筑物群顶面上方的屋顶风力机的有效安装指导。需要注意的是,这里所指屋顶风力机的安装高度是指风轮最低点的安装高度。

1 计算模型及边界设置

1.1 计算模型的建立

以实际生活常见的斜屋顶、金字塔屋顶、三角形屋顶及平屋顶等高建筑物群为研究对象,具体计算模型如图 1 所示。建筑物的具体尺寸为 $15\text{ m} \times 12\text{ m} \times 15\text{ m}$ (长 $L \times$ 宽 $W \times$ 高 H),建筑物之间的间距为 12 m 。其中斜屋顶、金字塔屋顶和三角形屋顶建筑物的屋顶最高位置距离地面的高度为 15 m ,屋檐距离地面的高度为 11.5 m 。

图 1 计算模型示意图

1.2 计算域及网格的建立

计算中采用长方体计算域,参考相关文献^[13],具体尺寸确定如下:前排建筑物的迎风面距离进流面的距离为 $10H$;两边建筑物侧面距离计算域两侧面的距离均为 $5H$;建筑物顶面距离计算域顶面的距离为 $5H$;出流面置于最后排建筑物后 $20H$ 的距离。此计算域的阻塞率小于 3% ,满足数值模拟计算的要求。

为了方便网格划分,在长方体计算域内切割出一个圆柱体内域。要求圆柱形内域能将所有建筑物完全包裹,其直径为 90 m ,高度为 25 m 。

计算中采用非结构化四面体网格,如图 2 所示。在建筑物四周壁面和地面设置了首层网格高度为 0.025 m 、增长率为 1.2 、共 6 层的边界层网格。经计算监测, $y^+ = 50 \sim 300$,满足计算中壁面函数对 y^+ 值的要求。经过网格无关性验证,网格总量 500 万。

图 2 网格示意图

1.3 边界条件的设置

计算域的进流面采用速度入口边界条件,利用

UDF 功能定义垂直速度剖面, 湍流强度设置为 10%; 计算域的出流面采用压力出口边界条件, 出口压力梯度为零; 计算域的顶面及两侧面采用对称边界条件; 建筑物四周壁面和地面设置为无滑移壁面边界, 沿壁面切向流体速度为零。

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 并利用非平衡壁面函数对模型的近壁面流动进行处理。同时为了入口速度剖面能准确持续到建筑物前, 在地面设置了壁面粗糙高度 k_s 和粗糙常数 C_s , 本研究中, $k_s=0.012$ m, $C_s=0.5$ 。

采用 SIMPLEC 算法对不可压缩 N-S 进行稳态求解; 采用精度较高的二阶迎风格式对对流项中的动能、湍动能及扩散率方程进行空间离散; 扩散项采用 Least square cell-based gradient 离散格式。根据 COST 所给建议^[13], 残差精度低于 10^{-4} 即认为计算全部收敛。

2 入口风速剖面

为了准确模拟建筑物周围风场湍流特征, 入口风速剖面必须精确给出。入口风速特征与地面粗糙度相关。很多研究中都使用指数为 0.28 的指数分布函数作为模拟计算的入流风剖面, 该分布函数高估了建筑物平均高度以下的风速、而低估了建筑物平均高度以上的风速。本文根据相关文献[4, 14], 采用能够精确描述三维立方体群内风速特征的半对数风速剖面作为入口风速剖面。

所谓半对数风剖面即在建筑物平均高度以上使用对数风剖面, 详见式(1); 在建筑物平均高度以下使用指数风剖面, 详见式(2)。

$$U(Z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z - Z_d}{Z_0} \right) \quad (1)$$

式中, κ 为卡门常数, $\kappa \approx 0.41$; U^* 为摩擦速度; Z 为距离地面的高度; Z_d 为置换高度; Z_0 为气动粗糙长度。

本研究中, 依据文献[4]提出的基于建筑密度的等高建筑物群内气动参数确定方法, $Z_d=12.28$ m, $Z_0=0.26$ m; 依据呼和浩特城区气象局 2013 年统计数据, 高度为 70 m 时, 城区年平均风速为 7.2 m/s。将以上数值代入式(1), 计算得到摩擦速度 $U^*=0.55$ m/s。

$$U(Z) = U_{\text{ref}} \exp \left(\alpha \left(\frac{Z}{H_{\text{ref}}} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

式中, α 为衰减系数, 其值与建筑物的形态有关, 依据文献[13], $\alpha=9.6\lambda_f$, 本研究中 $\lambda_f=0.28$; U_{ref} 为高度为 H_{ref} 的参考风速, $H_{\text{ref}}=70$ m 时, $U_{\text{ref}}=7.2$ m/s。

因此, 计算域的进流面上的速度剖面满足

$$\begin{cases} U(Z) = 6.7 \exp \left[2.688 \left(\frac{Z}{30} - 1 \right) \right] & Z \leq 15 \text{ m} \\ U(Z) = \frac{0.55}{\kappa} \ln \left(\frac{Z - 12.28}{0.26} \right) & Z > 15 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

由此得到的计算域入流面上的速度剖面如图 3 所示。

图 3 入口速度剖面

由于城市环境内风向是随机变化的, 计算中应依据气象学规定考虑 360° 范围内 16 个风向情况。但考虑到实际计算难度及建筑物群的对称性, 模拟计算中仅考虑了 3 个风向, 分别命名为 0° 、 45° 及 90° , 其中 0° 入流方向垂直于建筑物轴线(平行于建筑物顶面), 如图 4 所示。

图 4 计算风向示意图

3 结果分析

3.1 流动形式分析

本小节针对建筑物群顶面上方的流线形式进行分析。图 5 是各屋顶形状的建筑物顶面 0° 入流时 $X=0$ 平面上和 90° 入流时 $Y=0$ 平面上的流线分布图。可以看到, 对于斜屋顶, 0° 和 90° 入流时, 建筑物间的夹道内均存在很强的漩涡运动, 这是由于风流体在建筑物背风面形成尾流造成的。 0° 入流时建筑物顶面的流线分布均匀, 风流体在屋脊未出现明显的分离和回流现象; 而 90° 入流时, 屋脊部分可以看到流体出现明显的分离和回流, 尤其是后排建筑物。这是因为 90° 入流时, 风流体沿倾斜屋檐向上流动时将产生小的分离涡, 而当风流体到达屋顶最高位置时, 由

于背风面屋脊的突然下降导致风流体出现大的分离涡,并对下游风流体产生一定的影响。可见,斜屋顶建筑物顶面,特别是建筑物群内后排建筑物顶面不适合安装屋顶风力机。如必须安装也仅考虑将屋顶风力机安装于分离涡较小的屋檐拐角处。

图 5 建筑物顶面上方的流线示意图

对于金字塔屋顶,无论是 0°入流还是 90°入流,在所有建筑物的背风屋脊上都出现了显著回流现象,尤其后排建筑物。而且在屋顶最高位置,流线也极其紊乱。这是由于风流体由任何方向流经金字塔屋顶时,都将沿着倾斜屋脊向上爬行,在迎风屋脊上风流体基本都是附着流;当流体到达屋顶最高位置后,屋脊陡然下降致使流动出现分离,产生大的分离涡甚至回流现象,致使背风面流线紊乱。可见,金字塔屋顶的背风屋脊及中心位置不合适安装屋顶风力机,但可以考虑将屋顶风力机安装于迎风的屋檐边。

对于三角形屋顶,风流体遇到其顶面后将沿迎风屋脊向上爬行,产生小的分离现象。但由于 0°和 90°入流时屋脊的倾斜度及迎风面积不同,90°入流时迎风屋脊上的分离更明显;而在背风屋脊上,由于屋脊的突然下降,流体将出现显著分离和回流现象。受前排建筑物的影响,后排建筑物屋脊上的流线更紊乱。可见,三角形屋顶不适合在屋脊和中心位置安装屋顶风力机。同样,如必须安装时可考虑将屋顶风力机安装于屋檐的拐角处。

相比于上面三种屋顶形状,平屋顶顶面没有出现明显回流和分离现象,且后排建筑物也仅在迎风屋檐边上存在很小的回流现象。可见,平屋顶最适合安装屋顶风力机,而且可将风力机安装于屋顶的任何位置。

综上所述,从流线形式来看,平屋顶建筑物群顶面上方最适合安装屋顶风力机,而其他屋顶形状

的建筑物群顶面不适合安装屋顶风力机,尤其是建筑物群内后排建筑物顶面。

3.2 湍流强度分析

建筑物顶面的湍流强度将影响屋顶风力机能否正常运转及其使用寿命。根据 IE 61400 标准,风力机所处风场的湍流强度不得超过 16%~18%,否则将缩短风力机使用寿命^[15]。因此,对建筑物顶面风场湍流强度进行分析是屋顶风力机安装时必须考虑的因素之一。湍流强度 TI 定义为

$$TI = \frac{\sigma}{U(Z)} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (5)$$

式中, k 为湍动能; $U(Z)$ 为参考风速, 本研究中, 取建筑物最高位置上(距离地面高度 15 m)的风速为参考风速, $U(Z)=3.12$ m/s。

文中提取了各屋顶形状的建筑物群顶面上方在 0°、45°及 90°三种入流条件下高于屋檐 2 m 高度处(距离地面高度 13.5 m)、屋顶最高位置处(距离地面高度 15 m)及距离屋顶最高位置 0.1H 处(距离地面高度 16.5 m=1.1H)和 0.2H 处(距离地面高度 18 m=1.2H)的湍流强度云图。其中,斜屋顶建筑物群顶面上方各高度上的湍流云图如图 6 所示。

从图 6 中可以看到,0°入流时,在高于屋檐 2 m 高度上,首列建筑物的迎风面上,由于流体受到阻碍而产生了强扰动,此处的湍流强度达到了 20%以上,且向两侧的屋脊蔓延;后排建筑物由于受到前排建筑物的阻碍作用,迎风面上的湍流强度相对较小,且强湍流区域也仅集中在迎风面。在所有建筑物的背风屋脊上无强湍流出现;随着高度的增加,

图 6 斜屋顶建筑物群上方的湍流强度云图

湍流强度大于 20% 的区域逐渐缩小; 当高度达到 $1.1H$ 高度时, 所有建筑物顶面的湍流强度降低到了 16% 以下。

45°入流时, 由于风流体遇上建筑物后即改变流动方向沿建筑物两侧壁面流动, 风流体将产生极大的扰动, 并在绕过建筑物后产生强烈的尾流效应, 致使后排建筑物顶面流体的流动扰动进一步加强。所以从图上可以看到, 在高于屋檐 2 m 高度上, 建筑物顶面的湍流强度明显高于 0°入流时的, 且湍流强度达到 20% 的区域扩大到所有建筑物的顶面; 随着高度的增加, 湍流强度降低的速度缓慢, 在屋顶最高位置处, 所有建筑物顶面的湍流强度仍都大于 20%; 当高度达到 $1.2H$ 时, 建筑物群内第一排和第一列建筑物顶面的湍流强度都低于了 16%。

90°入流时, 由于风流体受到建筑物阻滞后即改变流向沿着屋脊向上爬行, 在迎风屋脊上产生大的扰动, 并且风流体绕过建筑物后产生一定的尾流进一步影响后排建筑物。所以在高于屋檐 2 m 高度上, 所有建筑物迎风面上的湍流强度值都大于 20%; 随着高度的增加, 风流体在沿屋脊爬行过程中出现分离现象, 当高度达到屋顶最高位置时, 背风屋脊的突然下降使得风流体的流动出现大的分离涡和回流, 因此所有建筑物屋顶最高位置上的湍流强度都达到 20% 以上; 随着高度的继续增加, 前排建筑物对风流体的扰动作用逐渐降低, 但前排建筑物的尾流效应仍较强, 可以看到, 随着高度增加湍流强下降的极其缓慢, 在高度达到 $1.2H$ 时, 仅迎风第一排建筑物顶面的湍流强度降低到了 20% 以下。

可见, 对于斜屋顶而言, 由于结构的不对称性, 其顶面上方的湍流强度受风向的影响严重。综合来说, 斜屋顶不适合安装高度低于屋顶最高点的屋顶风力机, 且屋顶风力机的安装高度不得低于 $1.1H$; 当安装高度高于 $1.1H$ 后, 可考虑将屋顶风力机安装于第一排建筑物顶面的四周屋檐; 当安装高度高于 $1.2H$ 后, 建筑物群内第一排建筑物顶面任何位置都可确保屋顶风力机的安全运行; 而当安装高度高于 $1.5H$ 后, 可将屋顶风力机安装于所有建筑物顶面的任何位置。

图 7 为金字塔屋顶建筑物群顶面上方不同高度上的湍流强度云图。由于金字塔屋顶的四面都存在倾斜的屋脊, 风流体在流经该类屋顶时将改变流向进行爬坡而产生大的分离和扰动。因此, 从图上可以看到, 在 0°入流条件下, 金字塔屋顶上方湍流强度达到 20% 以上的区域明显大于斜屋顶上方的区域。且风流体在绕过迎风屋脊后, 由于惯性作用, 使其在屋顶侧面的屋脊上无法附着流而出现大的分

离流动, 导致建筑物后的尾流效应加强, 因此后排建筑物顶面的湍流强度明显强于前排建筑物的。

图 7 金字塔屋顶建筑物群上方的湍流强度云图

同样, 45°入流时, 风流体遇上建筑物后即改变流向沿建筑物两侧壁面流动, 而两侧面为倾斜的屋脊, 风流体不能完全附着于壁面产生大的分离和回流, 因此金字塔屋顶上方的强湍流区域大于斜屋顶的区域。可以看到, 在高于屋檐 2 m 高度上, 所有建筑物迎风 and 背风屋脊的湍流强度值都远大于 20%; 随着高度的增加, 屋脊对风场的影响逐渐减小, 当高度高于屋顶最高位置后, 金字塔屋顶上方的湍流强度分布特征与斜屋顶上方的相类似。

而 90°入流时建筑物顶面的湍流强度明显大于 0°入流时的强度。这是因为, 90°入流时建筑物顶面迎风屋脊的迎风面积大于 0°入流时的面积, 风流体受到的阻滞作用更大, 流体的扰动强度和尾流效应都相应增强。但随着高度的增加, 屋顶形状的影响逐渐降低, 在高度达到屋顶最高位置后, 金字塔屋顶上方的湍流强度分布特征变得与斜屋顶上方的相类似。

可见, 对于金字塔屋顶而言, 其顶面上方湍流强度受风向的影响也较严重。综合来说, 金字塔屋顶同样不适合安装高度低于屋顶最高点的屋顶风力机, 且屋顶风力机的安装高度不得低于 $1.1H$; 而当安装高度高于 $1.1H$ 后, 建筑物群内第一排建筑物顶面屋檐可以考虑安装屋顶风力机; 当安装高度高于 $1.2H$ 后, 第一排建筑物顶面所有位置均可确保屋顶风力机的安全运行; 当安装高度高于 $1.4H$ 后, 屋顶风力机可安装于所有建筑物顶面任何位置。

三角形屋顶上方湍流强度分布特征与斜屋顶

上方的相类似,只是在 0° 入流时,三角形屋顶的迎风面为倾斜屋脊,风流体在爬行过程中产生大的扰动,使得三角形屋顶上方湍流强度大于20%的区域略大于斜屋顶的区域。随着高度的增加,两者间的差别逐渐减小;当高度达到 $1.2H$ 后,两者间的差别基本消失。

对于平屋顶建筑物群,计算中提取了建筑物群顶面上方高于屋顶 1.5 m (距离地面高度 $16.5\text{ m}=1.1H$)、高于屋顶 3 m (距离地面高度 $18\text{ m}=1.2H$)、高于屋顶 4.5 m (距离地面高度 $19.5\text{ m}=1.3H$)高度上的湍流强度云图,如图8所示。从图8可以看到,由于风流体流经平屋顶时不发生爬坡运动,因此在三种入流风向下,平屋顶上方的湍流强度明显低于其他三种屋顶形状,且湍流强度大于16%的区域也大幅减小。综合来说,平屋顶上方不适合安装高度低于 $1.1H$ 的屋顶风力机;在高度高于 $1.2H$ 时,除去中间靠后位置的建筑物外,可将屋顶风力机安装于其他所有建筑物顶面任何位置;当安装高度高于 $1.4H$ 后,屋顶风力机可安装于所有建筑物顶面的任何位置。

图8 平屋顶建筑物群上方的湍流强度云图

综上所述,平屋顶上方的湍流强度最弱,最利于屋顶风力机的安装,另外三种形状的屋顶上方湍流强度受风向影响严重,都不适合安装高度低于其屋顶最高位置的屋顶风力机;四种屋顶上方屋顶风力机的安装高度都不得低于 $1.1H$ 高度;对于金字塔屋顶、斜屋顶和三角形屋顶这样的非平屋顶建筑物,可优先考虑将屋顶风力机安装于屋檐;在建筑物群内,当安装高度高于 $1.2H$ 后,可忽略屋顶形状的影响,将屋顶风力机安装于第一排建筑物顶面的任何位置;而当高度高于 $1.4H\sim 1.5H$,屋顶风力机可安装于建筑物群内所有建筑物顶面任何位置。

从以上的分析还可以得到,对于高度相同的非平屋顶建筑物,迎风的倾斜屋脊面积越大,则建筑物顶面的湍流强度越大,且湍流强度随高度下降的速度也越慢,越不利于屋顶风力机的安装。

为了进一步对各屋顶形状顶面上方更高位置的湍流强度做出分析,文中提取了建筑物群内中心建筑物顶面拐角、中心及边位置上(详细位置见图9)湍流强度随高度的变化曲线,如图10所示。

图9 屋顶顶面分析位置示意图

图10 建筑物顶面各位置上的湍流强度剖面

图10为斜屋顶、金字塔屋顶及三角形屋顶顶面三个位置上的湍流强度曲线,图中纵坐标以屋檐高度为起点。如图10所示,在中心位置上,湍流强

度随着高度先增大后减小, 且随着风向由 0° 变换到 90° , 湍流强度逐渐增大; 90° 入流时, 最大湍流强度值都达到了 25%, 其中, 金字塔屋顶中心位置上的湍流强度下降的最快, 在高度达到 $1.1H$ 后, 其三个风向下的湍流强度都小于了 16%; 而其他两种屋顶形状中心位置上的湍流强度在高度高于屋檐 9 m 后(距离地面 $1.35H$ 高)才开始小于 16%。

在拐角位置上, 由屋檐至屋顶最高位置的垂直高度范围内, 三种屋顶形状的建筑物顶面的湍流强度在某一风向条件下都超过了 16%, 不适合安装屋顶风力机。其中, 金字塔屋的湍流强度最低, 高度达到屋顶最高位置后(距离地面高度 H 后), 湍流强度值在三风向下都低于了 16%; 而对于斜屋顶, 高度高于屋檐 6.5 m 后(距离地面高度 $1.2H$ 后), 湍流强度值在三个风向下才都低于了 16%; 对于三角形屋顶, 高度高于屋檐 9 m 后(距离地面高度 $1.35H$ 后), 湍流强度才降低到了 16% 以下。

在边位置上, 由屋檐至屋顶最高位置的垂直高度范围内, 三种屋顶形状的建筑物顶面的湍流强度在某一风向条件下都出现了大于 16% 的情况, 不适合安装屋顶风力机; 其中, 金字塔屋顶, 高度高于屋檐 5 m 后(距离地面 $1.1H$ 高度后), 可安装屋顶风力机; 而对于其他两种屋顶形状的建筑物, 高度高于屋檐 8m 后(距离地面 $1.3H$ 高度后), 才可将屋顶风力机安装于边位置。

综合以上分析, 可以再次肯定, 对于斜屋顶、金字塔屋顶及三角形屋顶而言, 不适合安装高度低于屋顶最高点的屋顶风力机, 屋顶风力机的安装高度必须高于 $1.1H$ 。同时可以看到, 金字塔屋顶上方的湍流强度随高度下降的速度较快, 笔者初步认为这是由于金字塔屋顶四个侧面屋脊的迎风面积相差很小, 屋顶上方湍流强度受风向影响相对较小所引起的。也就是说, 对于相同高度的非平顶建筑物, 金字塔屋顶最利于屋顶风力机的安装, 且安装高度高于 $1.1H$ 后即可安装于其顶面的任何位置; 而对于斜屋顶和三角形屋顶, 只有安装高度高于 $1.35H$ 后才能将屋顶风力机安装于其顶面任何位置。

图 11 为平屋顶顶面各位置在三个风向下的湍流强度值变化曲线。图中纵坐标以屋顶高度为起点。可以看到, 在平顶建筑物群内, 只有安装高度高于 $1.35H$ 后才可将屋顶风力机安装于建筑物顶面任何地方。而对单体平顶建筑物而言, 屋顶风力机的安装高度超过 $1.3H$ 即可将其安装于顶面任何位置^[12], 可见, 建筑物群内建筑物之间的相互干扰是不容忽略的。

图 11 平屋顶建筑物顶面各位置上的湍流强度剖面

总之, 建筑物顶面的湍流强度取决于建筑物顶面形状和风向, 且建筑物群内建筑物之间的相互干扰也将对顶面湍流强度产生一定的影响。总体来说, 平屋顶上方湍流强度分布最利于屋顶风力机的安装, 其次为金字塔屋顶, 再其次为平斜屋顶和三角形屋顶。对于非平顶建筑物, 金字塔屋顶上方屋顶风力机安装高度相对较低; 从建筑物群角度来考虑, 平屋顶建筑群最利于屋顶风力机的安装。

3.3 风速特征分析

安装屋顶风力机时, 除了需要避开建筑物顶面的强湍流区域外, 还需要考虑建筑物顶面风速的变化。为了分析建筑物顶面的风速特征, 引入量纲一的风加速因子

$$C_v = (v - v_0) / v_0 \quad (6)$$

式中, v 为建筑物顶面的实际风速; v_0 为建筑物顶面未受干扰时的风速。可见, $C_v < 0$ 表示风流经建筑物后风速低于了来流风速, 出现了减速现象; $C_v > 0$ 表示风流经建筑物后风速高于了来流风速, 出现了增速现象, 且 C_v 越大, 增速效果越好。

依据上一节的分析结果, 本节提取了四种屋顶形状的建筑物群顶面上方高于屋顶最高位置 $0.1H$ 、 $0.2H$ 、 $0.3H$ 三个高度处(距离地面分别为 $1.1H$ 、 $1.2H$ 、 $1.3H$)在 3 个风向下的风加速因子云图。图 12 为斜屋顶建筑物群顶面上方不同高度上的风加速因子云图。

从图 12 可以看到, 由于斜屋顶形状的不对称性, 风流体由不同方向流经斜屋顶时, 其顶面上方风速变化规律也截然不同。 0° 入流时, 由于建筑物顶面的阻滞作用, 在高度达到 $1.1H$ 时, 建筑物顶面风速出现了轻微减速现象; 随着高度的增加, 顶面的阻滞作用逐渐减弱, 风速开始增大, 当高度达到 $1.2H$ 时, 第一排建筑物顶面风速开始达到来流风速; 而当高度达到 $1.3H$ 时, 所有建筑物风速逐渐达到来流风速, 第一排建筑物顶面甚至出现轻微的增

速效应。同时可以看到,此时建筑物群内无明显的“夹道效应”,笔者初步认为这是由于在该风向下,风流体受到建筑物迎风面的阻滞后向建筑物的两侧流动,使建筑物间夹道内的流体流量增加,但由于斜屋顶两侧面倾斜屋脊的存在,使得流道加宽,从而使夹道内的风速未出现明显变化。

图 12 斜屋顶建筑物群顶面上方的 C_v 云图

同样, 45° 入流时, 由于风流体遇上建筑物后将沿建筑物的两侧面流动, 一侧的流道宽度不变, 而另一侧由于倾斜屋脊的存在使得流道加宽, 因此可以看到, 所有建筑物顶面在靠近无倾斜屋脊侧的拐角区域出现了较强的增速效应象; 随着高度的增加, 屋顶形状的影响逐渐减弱, 建筑物顶面的增速和减速区域面积都不断缩小; 当高度达到 $1.3H$ 时, 建筑物群内第一排和第一列建筑物顶面的风速基本达到来流风速。

90° 入流时, 可以看到, 建筑物之间的“夹道效应”极其明显。这是由于风流体受到倾斜屋脊的阻滞后向建筑物的两侧面流动, 夹道内的流体流量增加, 而此时流道宽度却未得到加宽, 从而使得夹道内流体的流速加快; 同时, 建筑物顶面的流体由于回流和阻滞而出现了严重的减速; 随着高度的增大, 屋顶形状的影响逐渐减弱, “夹道效应”逐渐减弱, 减速区域也逐渐减小。但该风向下风速随高度增长的很缓慢, 当高度达到 $1.3H$ 时, 也仅第一排建筑物顶面大部分区域的风速达到了来流风速的 90% 以上。

可见, 斜屋顶建筑物群顶面上方增速效应与风向存在很大关系。总体来说, 在高度高于 $1.1H$ 后, 斜屋顶上方无明显的加速区域; 当高度高于 $1.3H$ 后, 第一排建筑物顶面的风速仍略低于来流风速;

当高度高于 $1.4H$ 后, 第一排建筑物顶面的风速才基本达到来流风速。也就是说要想保证屋顶风力机输出特性, 应考虑其安装高度大于 $1.4H$; 当高度达到 $1.5H$ 后, 所有建筑物顶面的风速才完全达到来流风速。

三角形屋顶建筑物群顶面上方风速分布特征与斜屋顶的相类似, 只是在 0° 入流时, 由于迎风面为倾斜的屋脊, 使得建筑物群顶面上方的减速区域略大于斜屋顶的。而 90° 入流时, 由于倾斜屋脊加大了建筑物间夹道的宽度, 从而使夹道内的风速增加幅度小于斜屋顶时的增加幅度。总之, 三角形屋顶建筑物群顶面上方的增速效应对风向较敏感。在高度达到 $1.3H$ 后, 第一排建筑物顶面的风速基本达到来流风速; 当高度达到 $1.5H$ 后, 所有建筑物顶面的风速才完全达到来流风速。

图 13 为金字塔屋顶建筑物群顶面上方不同高度上的风加速因子云图。可以看到, 与斜屋顶和三角形屋顶相比较, 由于金字塔屋顶四个侧面的屋脊都是倾斜的, 建筑物之间的“夹道效应”显著减弱; 且屋顶的增速效应明显强于斜屋顶的, 风向对加速效应的影响也较小。可见, 在高度高于 $1.1H$ 后, 建筑物顶面的风速降低现象明显减小; 当高度高于 $1.3H$ 后, 建筑物顶面的风速仍略低于来流风速; 而当高度高于 $1.4H$ 后, 所有建筑物顶面的风速才基本达到来流风速。

图 13 金字塔屋顶建筑物群顶面上方的 C_v 云图

平屋顶建筑物群内的“夹道效应”也较弱。在高度高于 $1.3H$ 后, 建筑物群内所有建筑物顶面的风速才完全达到来流风速。

综上所述, 各屋顶形状的建筑物群顶面上方的风加速现象都不明显。其中平屋顶顶面风速受风向

影响较小, 而且风速随高度增长的最快, 在高度达到 $1.3H$ 后即可保证屋顶风力机的良好输出; 其次为金字塔屋顶, 其顶面的风速受风向影响也较小, 风速随高度增长较快, 在高度达到 $1.4H$ 后风速基本达到来流风速; 最差为斜屋顶和三角形屋顶, 在高度达到 $1.5H$ 后风速基本达到来流风速。同时, 由于平屋顶和金字塔屋顶结构的对称性, 使得建筑物群内的“夹道效应”较弱。

为了进一步对各屋顶形状顶面上方更高位置的风速特征做出分析, 文中也提取了中心建筑物顶面拐角、中心及边位置上风速随高度的变化曲线。图 14 为斜屋顶、金字塔屋顶和三角形屋顶顶面各位置的风速曲线。其中细实线为未受干扰的入口处风速。图中纵坐标以屋檐高度为起点。

图 14 建筑物顶面各位置上的平均风速分布曲线

从图 14 可以看到, 在中心位置上, 斜屋顶和三角形屋顶未出现增速现象。而金字塔屋顶也仅在高度低于 $1.1H$ 时出现了很小的增速, 随后又略低于了来流风速; 随着高度的继续增加, 中心位置的风速逐渐增大, 在高度高于屋檐 11 m 后(距离地面高度 $1.5H$ 后), 中心位置上的风速达到了来流风速。

在拐角位置上, 在高度低于 $1.1H$ 的高度内, 斜屋顶、金字塔屋顶上的风速在三个风向下都出现了增速, 而三角形屋顶仅在某一风向下产生了增速现象; 随着高度的增加, 三种屋顶上的风速都低于了来流风速, 直到高度高于屋檐 12 m 后(距离地面高度 $1.5H$ 后), 拐角位置的风速才达到来流风速。

在边位置上, 在高度低于 $1.1H$ 的高度内, 三种屋顶上的风速仅在某一风向下高于了来流风速; 在高度达到 $1.1H$ 后, 三种屋顶上的风速都低于了来流风速, 直到高度高于屋檐 11 m 后(距离地面高度 $1.5H$ 后), 风速才达到来流风速。

图 15 为平屋顶建筑物顶面上各位置风速随高度的变化曲线。可以看到, 平屋顶三个位置上的风速并未出现增速现象, 且 45° 入流情况下风速降低的最严重。直到高度高于屋檐 7.5 m 后(距离地面高度 $1.5H$)三个位置上的风速达到来流风速。

图 15 平屋顶建筑物顶面各位置上风速分布曲线

由此可见, 在建筑物群内, 建筑物顶面没有出现显著的增速现象, 这与文献[16]的研究结论相一致。这也说明, 建筑物群内建筑物相互之间的影响作用是不容忽视的。

综合以上分析, 可以看到, 对于斜屋顶、金字塔屋顶和三角形屋顶, 顶面的风速仅在低于 $1.1H$ 高度内、在某一风速下出现了加速; 而在高度高于 $1.1H$ 后, 顶面的风速都低于了来流风速; 但基本在高度高于屋檐 11 m 后(距离地面 $1.5H$ 高度后), 风速又都达到来流风速。平屋顶顶面无明显的增速现象, 当高度高于顶面 $1.5H$ 后, 风速基本达到来流风速。

4 结 论

以符合城市粗糙大气边界层的速度剖面为入口边界条件,采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对北方地区常见的、顺列布置的斜屋顶、金字塔屋顶、三角形屋顶及平屋顶建筑物群顶面上方的风速和湍流强度分布特征进行模拟计算和分析,得到以下结论。

(1) 平屋顶最利于屋顶风力机的安装,安装高度高于 $1.3H$ 后顶面任何位置都可保证屋顶风力机的安全运行和良好输出特性;其次为金字塔屋顶,安装高度高于 $1.4H$ 后顶面任何位置都可保证屋顶风力机的安全运行和良好输出特性;最差为三角形和金字塔屋顶,安装高度高于 $1.5H$ 后顶面任何位置都可保证屋顶风力机的安全运行和良好输出特性。

(2) 对于金字塔屋顶、斜屋顶和三角形屋顶这些非平顶建筑物,不合适安装低于屋顶最高位置的屋顶风力机,且可优先考虑将屋顶风力机安装于屋檐。

(3) 为了避开强湍流区域,以上四种屋顶形状的建筑顶面屋顶风力机的安装高度不得低于 $1.1H$ 。

(4) 在建筑物群内,当安装高度高于 $1.2H$ 后,屋顶风力机安装于第一排建筑物顶面任何位置时都可避开强湍流区域;而第一排建筑物顶面风速达到来流风速的高度随着屋顶形状的不同而不同。

(5) 在建筑物群内,当安装高度高于 $1.5H$ 后,可忽略屋顶形状的不同,将屋顶风力机安装于群内所有建筑物顶面任何位置。

参 考 文 献

- [1] GIPE P. Wind energy basics[M]. London: Chelsea Green Publishing Company, 1999.
- [2] FRANCISCOT S, CARLOS P, OSCAROL G, et al. On roof geometry for urban wind energy exploitation in high rise buildings[J]. Computation, 2015, 3(2): 299-325.
- [3] MÜLLER G, JENTSCH M F, STODDART E. Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings[J]. Renewable Energy, 2009 34(5): 1407-1412.
- [4] RICCIARDELLI F, POLIMENO S. Some characteristics of the wind flow in the lower urban boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(11): 815-832.
- [5] LEDO L, KOSASIH P B, COOPER P. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1379-1391.
- [6] ALLEN S, HAMMOND G, MCMANUS M. Energy analysis and environmental life cycle assessment of a micro-wind turbine[J]. Power and Energy, 2008, 222 (7): 669-684.
- [7] BLACKMOR P. Sitting micro-wind turbines on house roofs[R]. Watford: BRE, 2008.
- [8] BLACKMOR P. Building-mounted micro-wind turbines on high-rise and commercial buildings[R]. Watford: BRE, 2010.
- [9] 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(2): 1106-1118.
- [10] PARK S H, PARK J H, PARK H C, et al. The performance of small wind power generation systems on super high-rise buildings[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3): 489-499.
- [11] OSHIHIDE T Y, AKABAYASHI S, KITAHARA T, et al. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations[J]. Building and Environment, 2015, 84(1): 204 -213.
- [12] 侯亚丽, 汪建文, 王强, 等. 平顶建筑物顶面风力机安装位置和高度研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 236-242.
HOU Yali, WANG Jianwen, WANG Qiang, et al. Wind turbine installation location and height on roof of the flat-top buildings[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(1): 236-242.
- [13] FRANKE J, HELLSTEN A, SCHLÜNZEN H, et al. The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: A summary [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 44(1-4): 419-427.
- [14] MACDONALD R W. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 97(1): 25-45.
- [15] International Electro technical Commission, International Standard IEC61400-61401. Wind turbine generator systems-part 1: Safety requirements[S]. Geneva: IEC-International Electrotechnical Commission, 1999.
- [16] MILLWARD-HOPKINS J T, TOMLIN A S, MA L, et al. Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model[J]. Renewable Energy, 2013, 60(12): 701-710.

作者简介: 侯亚丽, 女, 1982 年出生, 博士, 讲师, 主要研究方向为风能应用和风力机尾流结构。

E-mail: houyali1234@163.com

汪建文(通信作者), 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为风能应用和风力机。

E-mail: wangjw@imut.edu.cn