

建筑顶面风力机微观选址数值分析方法的研究

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省部共建教育部重点实验室, 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: 为确定建筑物顶面屋顶风力机微观选址的有效方法, 分别采用SKE、RKE、RNG、SST $k-\varepsilon$ 及LES共5种湍流模型对日本建筑学会在风洞实验中所用建筑物的顶面及周围流场进行数值模拟, 将各湍流模型的预测值与AIJ风洞实验的测量值进行对比分析, 并采用3种统计参数对各湍流模型的预测精度进行评估, 结果表明: LES模型对建筑物顶面风场湍流特性的预测是最准确的, 而SKE、RKE、RNG这3种湍流模型的预测精度均略低于LES模型的, 且这3种湍流模型对建筑物顶面三维风速的预测精度基本一致, 但对湍动能的预测略有差别, 其中SKE湍流模型最差, RKE湍流模型居中, RNG湍流模型最好。考虑到计算成本及实际建筑物的大尺寸, 采用数值模拟方法进行建筑物顶面屋顶风力机微观选址时, SKE、RKE、RNG这3种湍流模型的计算精度完全可达到要求, 其中RNG湍流模型的预测精度最好。

关键词: 建筑物; 风力机; 微观选址; 数值模拟; 湍流模型

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着全球城市化能源危机和温室气体排放量的急剧加快, 屋顶风力机已成为最具潜力的城市可持续发展能源发展措施之一。所谓的屋顶风力机是指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, 具有免于输送、绿色清洁的特点。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^[2,3], 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, 也会出现零输出功或损坏的情况^[4-6]。因此, 在城市环境内对屋顶风力机在建筑物顶面进行微观选址, 是屋顶风力机得到推广使用的必要前提。2009年, 国际能源署开展的Task27已将城市环境内屋顶风力机的应用和安装作为研究重点。

当前, 屋顶风力机的微观选址方法共有3种, 即现场测量、风洞实验及数值模拟计算。由于城市屋顶风力机作为微小型风电项目, 评估经费投入极其有限。且在城市环境内, 一个特定位置的测量点并不能有效反映其他位置的风速和湍流特性。因此现

场测量不是城市环境内屋顶风力机微观选址的有效方法; 风洞实验虽可对建筑物顶面风场特征做出准确预测, 但风洞实验的开展也需投入大量经费和时间。同时, 城市内建筑物样式繁多、布局复杂, 而风洞实验仅能对结构、布局相对简单的建筑物或建筑物群开展实验。因此风洞实验也不是城市环境内屋顶风力机微观选址的最适合方法; 相比较而言, 数值模拟计算则是一种切实可行的方法, 其既可对城市内复杂建筑物或建筑物群顶面上方风场特性做出准确预测, 又可缩短微观选址的时间周期和降低选址成本。因此, 数值模拟计算是当前城市环境内屋顶风力机微观选址较合适的方法之一。

目前已开展了一些采用数值模拟计算方法进行城市环境内屋顶风力机微观选址的研究, 但这些研究中所采用的湍流模型却各不相同, 有些研究者采用对网格数量要求相对较低的雷诺平均法^[7-10], 有些研究者采用更能捕捉流体湍流特征的大涡模拟法^[11]。虽然这些研究已取得了一定成果, 但有关各湍流模型在百米或千米级大尺度范围内的模拟计算精度, 以及哪种湍流模型更适合城市环境内屋顶风

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 内蒙古自然科学基金重大项目(2016ZD04); 内蒙古自然科学基金(2015MS0540)

通信作者: 汪建文(1958—), 男, 博士、教授, 主要从事风力机气动和结构动态特性方面的研究。wangjw@imut.edu.cn

力机微观选址的研究却少有开展。

针对该问题,本文利用 Fluent 软件,分别采用雷诺平均法(RANS)和大涡模拟法(LES),对日本 AIJ 风洞实验中的建筑物顶面及周围流场进行模拟计算。其中,雷诺平均法中分别采用标准 $k-\varepsilon$ (SKE)、可实现的 $k-\varepsilon$ (RKE)、重整化的 $k-\varepsilon$ (RNG)及 SST $k-\varepsilon$ (SST) 共 4 种湍流模型。将各湍流模型预测值与 AIJ 风洞实验中所测得建筑物顶面及周围流场的风速、湍动能等参数进行比较,并利用多个统计分析参数对数值模拟计算结果进行评价,从多个角度确定适合于工程领域中百米或千米级大尺度范围内屋顶风力机微观选址的数值模拟计算方法。

1 计算模型及边界设置

1.1 计算模型及网格的建立

所用模型为日本建筑物学会 AIJ 在风洞实验中所用建筑物,为了便于全世界 CFD 工作者开展计算模型正确性的比对,AIJ 已将该建筑物周围流场的实验测量结果向全球公开。该建筑物为长方体建筑物,具体尺寸为 $200\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (长 $L \times$ 宽 $W \times$ 高 H),如图 1 所示,其中来流风沿 X 轴方向入流。依据文献[12,13],计算域尺寸确定如下:入口距离建筑物迎风面的距离为 $5H$,建筑物侧面距离计算域边界的距离为 $5H$,顶面距离计算域边界的距离为 $3H$,出口边界置于建筑物后 $20H$ 的距离。计算域的阻塞率小于 3%,满足计算要求。

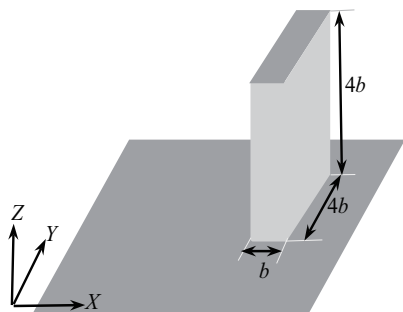


图1 AIJ实验模型示意图($b=50\text{ mm}$)

Fig. 1 Schematic view in AIJ experiment($b=50\text{ mm}$)

利用 ICEM CFD 软件对计算域进行六面体结构化网格划分。针对不同湍流模型,计算网格也不同,计算中共采用 3 种网格方案,如表 1 所示。

表1 各CFD计算模型的网格方案汇总

Table 1 Summary of mesh grid numbers used in each study case in CFD model

计算模型	网格数量	首层高/mm	增长率	y^+ 值
SKE/RKE/RNG	1277316	15	1.2	30~300
SST	4094744	0.09	1.05	<1~2
LES	4012895	0.07	1.05	<1

由于 3 种雷诺平均湍流模型对网格的要求相同,因此 3 种湍流模型中采用的网格完全一样。且 3 种湍流模型采用非平衡壁面函数对近壁面区域进行处理,因此设置建筑物四周壁面及地面的首层网格高度为 15 mm ,经检测 y^+ 在 30~300 之间,满足计算要求;SST 模型与 LES 模型对网格的需求基本一致,要求建筑物四周壁面及地面设置更精密的边界层网格,以准确捕捉近壁面区域的流体运动,经计算检测,所用网格的 y^+ 均能满足计算要求。

1.2 边界条件的设置

计算域的进流面采用速度入口边界;出口采用压力出口边界,出口压力梯度为零;计算域顶面及两侧面采用对称边界;建筑物四周壁面和地面均设置为无滑移壁面边界,沿壁面切向流体速度为零。

对于 $k-\varepsilon$ 系列模型,应用非平衡壁面函数对近壁区域流动进行处理。同时,由于入流面距离建筑物有一定距离,为了保证模拟的准确性,要求入口速度剖面能准确保持到建筑物前,计算过程中在地面设置了适当的壁面粗糙高度。地面粗糙高度满足式(1):

$$k_s = \frac{9.793z_0}{C_s} \quad (1)$$

式中, k_s ——壁面粗糙高度,mm; C_s ——粗糙常数; z_0 ——气动粗糙长度,mm。依据文献[14]和反复试算,最终确定 $z_0=0.18\text{ mm}$, $C_s=0.2$, $k_s=8.813\text{ mm}$ 。在此设置下,从进口到出口整个流域内的风速剖面不产生沿流向的梯度变化,具有良好的均一性。

所有计算均采用基于压力-速度耦合的 SIMPLEC 算法对 N-S 进行求解,其中采用精度较高的 quick 格式对流项中的动能、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 格式离散。残差收敛精度为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。

1.3 入口速度剖面

依据 AIJ 风洞实验数据, 计算域入流面的风速应满足指数关系式:

$$u = U_0 \left(\frac{z}{H_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中, u ——高度 z 位置的入口速度(沿 X 轴方向速度), m/s ; U_0 ——参考高度 H_0 处的参考速度, $H_0 = 200 \text{ mm}$ 时, $H_0 = 5.13 \text{ m/s}$; α ——指数, AIJ 风洞实验中的 $\alpha = 0.25$ 。

入口湍动能为 AIJ 实验风洞真实入口湍动能, 由 AIJ 实验测量得到。

入口湍流耗散率 ε 利用式(3)进行计算:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.74} k^{1.5}}{\kappa Z} \quad (3)$$

式中, C_μ ——常数, $C_\mu = 0.09$; k ——湍动能, m^2/s^2 ; κ ——卡门常数, $\kappa = 0.41$ 。入口速度剖面如图 2 所示。

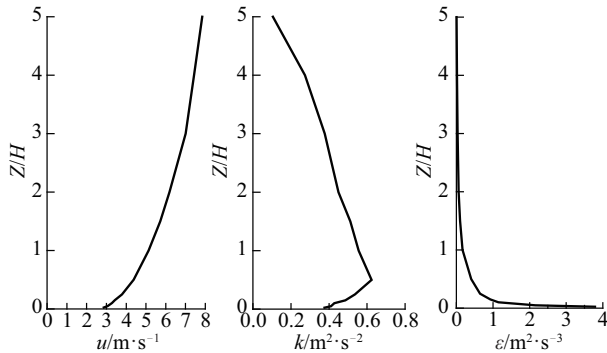


图2 入口时的速度、湍动能、湍流耗散率剖面

Fig. 2 Inflow velocity, turbulent kinetic energy and turbulence dissipation rate profiles

2 计算模型有效性验证

为了验证 5 种计算模型的有效性, 计算中提取了与 AIJ 风洞实验对应测量位置上 ($Y/H=0$ 中心截面上) 的平均速度 U , $U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$, 其中 u , v , w 分别为沿 X 向、 Y 向及 Z 向速度。图 3 为 $Y/H=0$ 平面内 AIJ 风洞实验测量位置分布图, 其中灰色框代表 AIJ 实验模型。各模型预测值与 AIJ 风洞实验测量值的比较如图 4 所示。

从图 4 可看到, 在建筑物前方 A 位置及建筑物后方 B 和 C 位置上, 虽然 SST 模型预测值在高于建

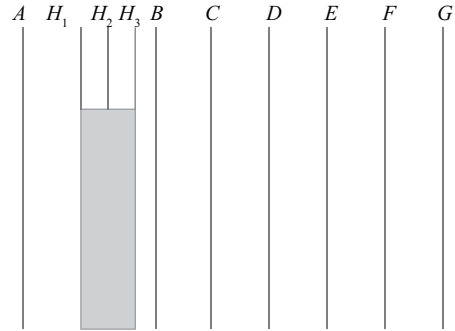


图3 AIJ实验模型测点布置图

Fig. 3 A scheme of x locations where vertical profiles are studied

筑物顶面区域内略高于实验测量值, 但总体来说, 其他 4 种湍流模型的预测值与实验测量值的吻合度均较高。随着距离建筑物后方距离的增大 (D 、 F 、 G 位置), 在低于建筑物顶面的区域内, 各模型预测值与实验测量值之间的偏差逐渐增大, 笔者认为这主要是因为流体越过建筑物后产生强烈的尾流效应, 而某些湍流模型不能对三维流场做出准确预测。可看到, 在该区域内, LES 模型预测值与实验预测值的吻合度最高; 在高于建筑物顶面的区域内, 除去 SST 模型外, 其他湍流模型的预测值与实验测量值之间的差别很小。可见, SKE、RKE、RNG 及 LES 这 4 种模型的对建筑物前、后方位置上平均速度的预测值略偏差于实验测量值, 但笔者认为这主要是由于导入计算域的人流边界不能完全与实验风洞的真实入流一致所造成的。因此可认为: SKE、RKE、RNG 及 LES 这 4 种模型均可对建筑物前、后方的风场特征做出准确预测。

由于本文的研究重点是建筑物顶面风场湍流特征的预测, 笔者又将建筑物顶面 H_1 、 H_2 和 H_3 这 3 个位置上的平均速度与实验测量值进行比较, 见图 4。从图中可见看到, 除 SST 模型预测值略高于实验测量值外, 其他 4 种湍流模型的预测值与实验测量值虽然在顶面至高于建筑物顶面 $0.1 H$ 范围内略有差别, 但总体来说, 4 种湍流模型均可准确对建筑物顶面风速特征做出预测。

由对图 4 的分析可知, SKE、RKE、RNG 及 LES 这 4 种计算模型的预测值真实有效。而 SST 计算模型预测值与实验测量值之间存在一定偏差, SST 湍流模型对具有尖角的长方体外流场的预测性较差。

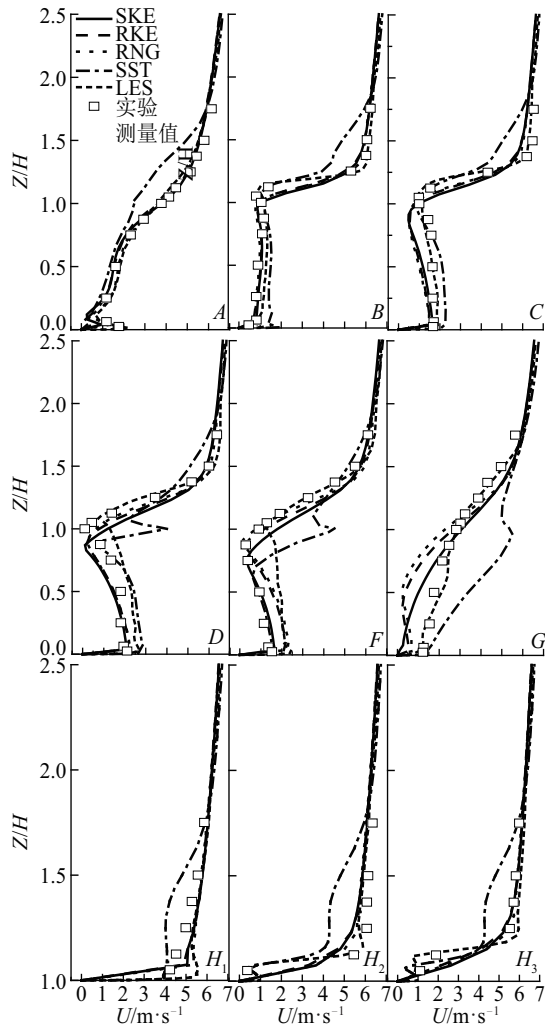


图4 X方向各位置上平均速度垂直剖面图

Fig. 4 Vertical profiles of mean velocity at the X locations

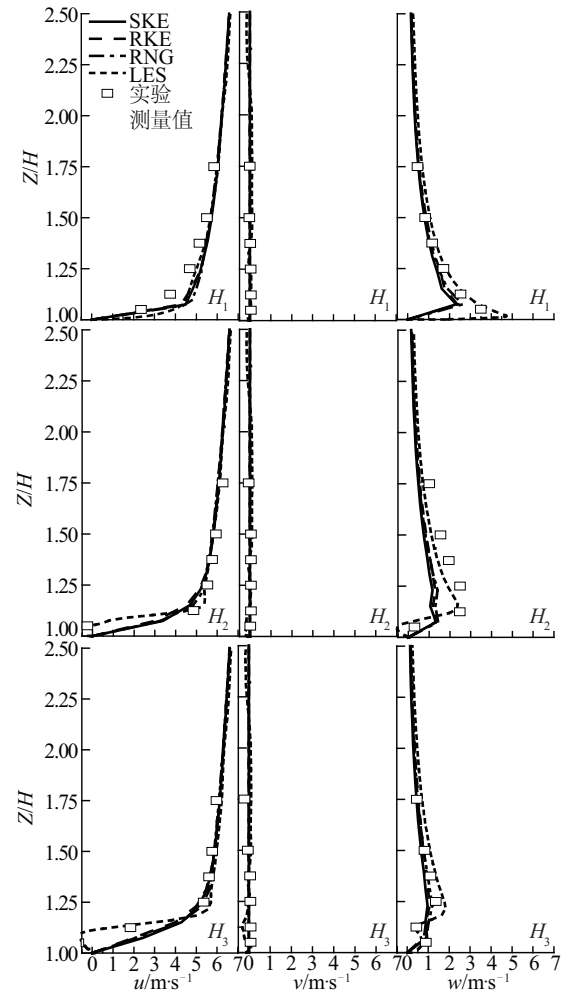
3 垂直剖面的比较

为了分析湍流模型对三维流场预测的准确性,文中提取 SKE、RKE、RNG 及 LES 这 4 种湍流模型中建筑物顶面 H_1 、 H_2 和 H_3 这 3 个位置上 X、Y 及 Z 3 个方向的速度及湍动能,并将结果与实验测量值进行比较。

3.1 速度剖面的比较

图 5 为 H_1 、 H_2 和 H_3 位置上 X 向速度 u 、Y 向的速度 v 及 Z 向速度 w 随高度的变化曲线,并将其与 AIJ 实验测量值进行比较。

从图 5 可看到,在 H_1 、 H_2 及 H_3 这 3 个位置上,LES 模型的预测值与实验测量值都高度吻合,而其他 3 种计算模型的预测值,仅在 X 向速度 u 和 Y 向

图5 H_1 、 H_2 和 H_3 位置上的速度垂直剖面Fig. 5 Vertical profiles of velocity at H_1 , H_2 and H_3

速度 v 上与实验测量值较吻合,Z 向速度 w 均略低于实验测量值。可见,在对建筑物顶面的三维风速进行预测时,LES 模型的准确性最高,而 SKE、RKE、RNG 这 3 种模型的准确性较 LES 模型低,尤其是对 Z 向速度的预测。这与 LES 和雷诺平均法对湍流运动处理方式不同所引发的模拟精度差别相一致。但从图上可看到,SKE、RKE、RNG 这 3 种模型的预测精度也已基本满足数值计算的准确性要求,尤其是在工程领域大尺度建筑物顶面风场的预测中,3 种湍流模型的计算精度完全可满足要求。同时,SKE、RKE、RNG 这种模型对建筑物顶面风场特征预测的准确性一致,也就是说,在选择 SKE、RKE、RNG 这 3 种模型进行建筑物顶面风场特性预测时,3 种湍流模型预测的准确性之间不存在差别。

随着距离建筑物顶面高度的增加,可看到,4 种

湍流模型在3个方向速度上的预测值之间的差别不断减小,在高于建筑物顶面 $0.25H$ 后,4种湍流模型的预测值相一致。

从图5还可看到,由于提取的是 $Y/H=0$ 平面内的三维速度,所以 Y 向速度 v 集中 $-0.1 \sim 0.1$ m/s 之间,可忽略; X 向速度 u 在3个位置上的大小相一致,只是在 H_2 和 H_3 位置上速度出现负值,说明两位置上建筑物顶面出现了轻微的回流; Z 向速度 w 随着距离建筑物入流前缘(H_1 位置)距离的加大而逐渐减小,说明随着距离的增大,建筑物顶面的流体的分离区域不断减小。

依据以上分析可知,在对建筑物顶面风速进行预测时,由于对湍流运动处理方式的不同,LES模型的准确性最高,另外3种湍流模型准确性之间的差距可忽略。而随着距离建筑物顶面高度的增大,LES模型的准确性优势逐渐消失。换句话说,LES模型对近壁面存在分离和回流的复杂区域内流场的预测存在优势,但如果在工程中应用领域中仅考虑风速的大小而无需关注其的三维流动特征时,4种湍流模型预测风速的准确性之间的差距可以忽略。

3.2 湍动能剖面的比较

屋顶风力机微观选址时,除需掌握建筑物顶面风速的变化外,还关心建筑物顶面湍流强度的分布特征,从而使风力机避开强湍流区域。根据3.1节分析结果,本节提取SKE、RKE、RNG及LES这4种湍流模型在 H_1 、 H_2 及 H_3 这3个位置上湍动能 k 随高度的变化曲线,并将其与实验测量值进行比较,如图6所示。

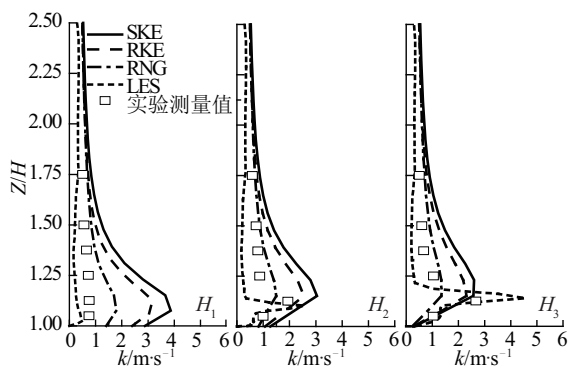


图6 H_1 、 H_2 和 H_3 位置上的湍动能垂直剖面

Fig. 6 Vertical profiles of turbulence kinetic energy at H_1 , H_2 and H_3

从图6可看到,4种湍流模型对湍动能 k 的预测

值均与风洞实验测量值存在一定差别,但随着距离建筑物迎风前缘距离的增大,两者之间的差别逐渐减小。在 H_1 位置上,LES模型的预测值与实验测量值相接近,而其他3种湍流模型的预测值均略大于实验测量值,尤其是在建筑物顶面至高于建筑物顶面 $0.5H$ 的高度范围内。其中SKE模型的偏差最大;在 H_2 和 H_3 位置上,4种模型的预测值与实验测量值之间虽仍存在差别,但曲线的总体变化趋势相一致,均随着高度的增加,湍动能先增大后减小。且在这两个位置上,RNG计算模型的预测值最接近风洞测量值;随着距离建筑物顶面高度的增加,SKE、RKE、RNG这3种湍流模型的预测值之间的差距逐渐减小,在高度达到建筑物顶面 $0.75H$ 时,3种湍流模型预测值之间的差距基本可忽略。

可见,4种湍流模型可较好地预测建筑物顶面湍动能的变化趋势,但却不能更准确预测湍动能的大小,笔者认为这与湍流模型对雷诺应力和平均速度梯度的处理方式有关,且计算中所给定的入口湍动能不完全与风洞入口湍动能一致也将影响模型预测值的准确性。但总体来说,对于百米或千米级别的大尺度建筑物顶面湍动能的预测,以上4种湍流模型预测值的误差基本可忽略。当然,4种模型中,LES模型的预测精度仍最高,其次为RNG模型,最差为SKE模型。

4 统计分析

为了更进一步评价几种湍流模型在建筑物顶面风场特征预测方面的准确性,本节利用由文献[14~16]中统计分析方法,对数值模拟计算结果和AIJ风洞测量结果进行了对比分析,以期从统计学角度对数值计算模型的精确性做出更有效地分析。

4.1 统计参数

1) 标准均方误差(normalized mean square error, NMSE)

标准均方误差可用于评价数值模拟预测值和实验测量值之间的差别程度,NMSE值越小,说明数值模拟预测值和实验测量值之间的差别越小,数值模拟预测值的准确性越高。标准均方误差可由式(4)计算得到:

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i P_i)} \quad (4)$$

式中, O_i ——每一位置上的实验测量值; P_i ——每一位置上的模型预测值; n ——测点的数量。

2) 分数偏差(fractional bias, FB)

分数偏差是用于衡量数值模拟预测值偏离实验测量值的程度。分数偏差为负数时, 数值模拟预测值高于实验测量值; 分数偏差为正值时, 数值模拟预测值低于实验测量值。分数偏差的绝对值越大, 表示数值模拟预测值偏离实验测量值的程度越大。分数偏差可由式(5)计算得到:

$$FB = \frac{\bar{O} - \bar{P}}{0.5(\bar{O} + \bar{P})} \quad (5)$$

式中, \bar{O} ——所有位置上实验测量值的平均值; \bar{P} ——所有位置上模型预测值的平均值。

3) 相关系数(R correlation coefficient, R)

相关系数是用以反映两变量之间相关程度的统计指标, 其计算公式如式(6)。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

对于数值模拟预测值和实验测量值, 当 $R=0.0$ 时, 两者无关系; 当 $0.0 < R < 1.0$ 时, 两者正相关; 当 $-1.0 < R < 0.0$ 时, 两者负相关; 两者间相关系数的绝对值越大, 模型预测值与实验测量值之间的线性相关性越大, 预测值与测量值的趋势越接近, 模型的预测精度越高。

4.2 统计分析结果

由前面的分析可看到, 在 $Y/H=0$ 的平面内, Y 向风速 V 极小, 均接近于 0, 因此下文仅对建筑物顶面 H_1 、 H_2 及 H_3 这 3 个位置上 X 向风速 u 、 Z 向风速 w 及湍动能 k 进行统计分析, 结果分别见表 2 及表 3。

表 2 各计算模型中 u 、 w 及 k 的 $NMSE$ 值和 FB 值

Table 2 Values of $NMSE$ and FB for u , w and k in all computational models

		SKE	RKE	RNG	LES
u	$NMSE$	0.0394	0.0311	0.0361	0.0105
	FB	-0.0991	-0.0786	-0.0995	-0.0337
w	$NMSE$	0.3914	0.3108	0.2617	0.0531
	FB	0.3956	0.3191	0.2816	0.0299
k	$NMSE$	0.9614	0.6378	0.3136	0.3286
	FB	-0.7238	-0.5631	-0.1647	0.5632

表 3 各计算模型中 u 、 w 及 k 的 R 值

Table 3 Values of R for u , w and k in all computational models

位置	计算模型	u	w	k
H_1	SKE	0.984	0.864	0.952
	RKE	0.986	0.827	0.942
	RNG	0.971	0.870	0.944
	LES	0.988	0.998	0.731
H_2	SKE	0.963	0.651	0.711
	RKE	0.955	0.776	0.731
	RNG	0.972	0.716	0.708
	LES	0.999	0.984	0.874
H_3	SKE	0.972	0.511	0.489
	RKE	0.993	0.597	0.579
	RNG	0.995	0.587	0.411
	LES	0.990	0.922	0.950

表 2 中统计了各湍流模型下 3 个位置上所有测点的平均标准均方误差。可看到, 在 H_1 、 H_2 及 H_3 这 3 个位置上, X 向风速 u 对应的 $NMSE$ 值最小, 而 Z 向风速 w 及湍动能 k 对应的 $NMSE$ 值较大。也就是说, 4 种模型对主流风速的预测准确度极高, 该风速是在建筑物顶面安装屋顶风力机时主要参考风速。从表中还可看到, LES 模型不仅能对 X 向风速 u 预测准确, 且对 Z 向风速 w 的预测也很准确, 说明 LES 模型可对流体流动的三维效应进行准确预测。对于 SKE、RKE、RNG 这 3 种模型, 其在 X 向风速对应的平均 $NMSE$ 值分别为 0.0394、0.0311、0.0361, 说明 3 种模型对建筑物顶面主流风向预测的精确度相同; 其在 Z 向风速对应的平均 $NMSE$ 值分别为 0.3941、0.3108、0.2617, 说明 3 种模型对 Z 向速度的预测精度略有差别, 其中 RNG 模型的精度最高, SKE 模型的精度最低, RKE 模型的精度居中。这与 3 种湍流模型本身对湍流运动预测的准确性相一致。

从表 2 中还可看到, 湍动能 k 对应的 $NMSE$ 值均较大, 其中 SKE 模型对 k 的预测精度最低, 其次为 RKE, 而 RNG 和 LES 的预测精度相当。

同时, 表 2 中列出了各湍流模型下 3 个位置上所有测点的平均分数偏差。可看到, 4 种计算模型中, X 向风速 u 对应的 FB 值均为负值, 这说明 4 种计算模型对 X 向风速 u 的预测值均大于实验测量值, 且偏差均很小, 4 种计算模型都可对主流风速做

出精确预测; Z 向风速 w 对应的 FB 值均为正值,这说明4种计算模型对 Z 向风速 w 的预测值均小于实验测量值,且偏差较大;而4种计算模型对湍动能 k 的预测均偏差较大,说明4种计算模型都不能很好地预测建筑物顶面的湍动能。而相比较而言,RNG模型的预测偏差最小。

表3中列出了 H_1 、 H_2 及 H_3 这3个位置上模型预测值与风洞实验测量值之间的相关系数。可看到,对于 X 向风速 u 而言,各模型预测值与实验测量值呈极强相关性,表明预测值与实验测量值的趋势变化完全一致;对于 Z 向风速 w 而言,各模型预测值与实验测量值呈强相关性,预测值与测量值的趋势变化基本一致;对湍动能 k 而言,除去SKE模型外,其他3种模型预测值与风洞测量值呈一般相关性。

由上文分析可知,SKE、RKE、RNG、LES这4种湍流模型对建筑物顶面主流风向的预测精度最高,预测值与风洞测量值之间偏差极小,且这两者之间的趋势完全一致;而4种湍流模型对 Z 向风速 w 和湍动能 k 的预测精度相对较低,尤其是对湍动能 k 的预测,但考虑到计算中入口湍动能与风洞真实入口湍动能之间的偏差,基本可认为4种湍流模型对湍动能 k 的预测较准确。

5 结 论

通过对日本AIJ风洞实验中所用建筑物顶面及周围流场的数值模拟计算,对比分析SKE、RKE、RNG、SST $k-\omega$ 及LES共5种湍流模型对建筑物顶面 X 、 Y 、 Z 3个方向风速及湍动能 k 的预测精度,并利用标准均方误差、分数偏差及相关系数等统计参数对各湍流模型的计算精度进行评估,得到以下结论:

1)LES模型对建筑物顶面风场湍流特性的预测最准确,而SKE、RKE、RNG这3种模型的预测精度略低于LES模型的,且这3种湍流模型对建筑物顶面三维风速的预测精度基本一致,而对湍动能的预测略有差别,其中SKE模型最差,RKE模型居中,RNG模型最好。

2)考虑到计算成本及实际建筑物的大尺寸,采用数值模拟方法对城市环境内屋顶风力机进行微观选址时,SKE、RKE、RNG这3种湍流模型的计算精度完全可达到要求,其中RNG湍流模型的预测精度最好。

[参考文献]

- [1] Gipe P. Wind energy basics[M]. Chelsea: Green Publishing Company, 1999.
- [2] 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.
- [3] Ledo L, Kosasih P B, Cooper P. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1379—1391.
- [4] 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.
- [5] Blackmore P. Sitting micro-wind turbines on house roofs[R]. Watford: BRE, 2008.
- [6] Blackmore P. Building-mounted micro-wind turbines on high-rise and commercial buildings[R]. Watford: BRE, 2010.
- [7] Nalanie M. Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(10): 1013—1018.
- [8] White L V, Wakes S J. Permitting best use of wind resource for small wind-turbines in rural New Zealand: A micro-scale CFD examination[J]. Energy for Sustainable Development, 2014, 21(8): 1—6.
- [9] Wang B, Cot L D, Adolphe L, et al. Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings[J]. Energy and Buildings, 2015, 88(2): 57—67.
- [10] 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.
- [10] 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.
- [11] Francisco T S, Oscar L G, Carlos P, et al. An empirical-heuristic optimization of the building-roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings[J]. Applied Energy, 2016, 164(2): 769—794.
- [12] 庄 智, 余元波, 叶 海, 等. 建筑室外风环境CFD模拟技术研究现状[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 108—114.
- [12] Zhuang Zhi, Yu Yuanbo, Ye Hai, et al. Review on CFD simulation technology of wind environment around

- buildings [J]. Building Science, 2014, 30 (2) : 108—114.
- [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] Schlünzen K H, Bächlin W, Brünger H, et al. An evaluation guideline for prognostic microscale wind field models[A]. 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes [C], Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004.
- [15] Eichhorn J. Application of a new evaluation guideline for microscale flow models[A]. 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Purposes [C], Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004.
- [16] Grawe D, Schlünzen K H, Pascheke F. Comparison of results of an obstacle resolving numerical model with wind tunnel data [A]. 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Purposes [C], Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004.

RESEARCH ON METHOD OF MICROSITING OF ROOFTOP WIND TURBINE AT THE TOP OF BUILDINGS

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, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Wind Energy and Solar Energy Utilization Technology,

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to confirm the method of micrositing of rooftop wind turbine, the flow field of AIJ building used in the wind tunnel is simulated with different turbulence models. Five kinds of turbulence model, such as SKE, RKE, RNG, SST $k-\varepsilon$ and LES are used. Comparisons between predicted values and measurement values are carried out, and the accuracy of various turbulence models is conducted by three statistical parameters. The results show that LES is most precise, and after it is SKE, RKE and RNG. Of course, the precisions of wind speed for SKE, RKE and RNG are same, and for precisions of turbulence intensity, RNG is first, RKE is second, SKE is third. Considering the computational expense and actual building scale, SKE, RKE and RNG are all used for micrositing of rooftop wind turbine, and RNG is most precise.

Keywords: buildings; wind turbine; micrositing; numerical simulation; turbulence model