文章编号:1674-2974(2021)11-0061-11

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2021.11.007

高层建筑形状及布局对城市街区 行人风环境影响研究

闫渤文^{1†},魏民¹,鄢乔^{1,2},程勇¹,舒臻孺³,李秋胜⁴,周绪红^{1,5}

(1. 重庆大学风工程及风资源利用重庆市重点实验室,重庆400045;
2. 湖北省联合发展投资集团,湖北武汉430061;3. 中南大学土木工程学院,湖南长沙410075;
4. 香港城市大学建筑学与土木工程学系,香港999077;5. 湖南大学土木工程学院,湖南长沙410082)

摘要:基于风洞试验和计算流体动力学方法(Computational Fluids Dynamics, CFD)研究 高层建筑形状及布局对城市街区行人风环境的影响.采用最大风速比和归一化加速面积比,定 量研究五种高层建筑形状及四类建筑布局对城市街区行人风环境的影响,确定全风向下的最 优建筑形状以及布局,结合 CFD 数值模拟获得的全域流场信息,揭示建筑形状和布局对于城 市街区行人风环境的影响机理.结果表明:在保持建筑高度和街区容积率一致的情况下,高层 建筑群周边最大风速比不会随着建筑形状和建筑布局的改变而发生明显变化.但建筑形状和 建筑布局会改变建筑群周边高风速区域的面积大小,全风向下的最优建筑形状和布局分别是 Y 字形和错列式布局,而最不利形状和布局分别是 H 字形和围合式布局.不同布局下的方形、 H 字形及 X 字形高层建筑群的最不利风向均位于斜风向,而十字形及 Y 字形则为正风向.高 层建筑群在行人高度处的风加速现象主要是由狭管效应和角部分离效应造成的.

关键词:城市街区;行人风环境;建筑形状;建筑布局;风洞;CFD 中图分类号:TU312.1 文献标志码:A

Study on Effects of Tall Building Shape and Layout on Pedestrian–level Wind Environment in the Urban Area

YAN Bowen^{1†}, WEI Min¹, YAN Qiao^{1,2}, CHENG Yong¹, SHU Zhenru³, LI Qiusheng⁴, ZHOU Xuhong^{1,5}

(1. Chongqing Key Laboratory of Wind Engineering and Wind Engergy Utilization,

Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Hubei United Investment Group Co, Ltd, Wuhan 430061, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

4. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

5. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper investigates the influences of tall building shape and layout on the pedestrian-level wind

作者简介:闫渤文(1989—),男,河南南阳人,重庆大学副教授,博士

^{*} 收稿日期:2020-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878104), National Natural Science Foundation of China(51878104);中央高校基本科研业务费专 项资金资助项目(2020CDJQY-A062), The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020CDJQY-A062);高等学校学科创新 引智计划资助项目(B18062), "111 Project"(B18062)

[†]通信联系人,E-mail:bowenyancq@cqu.edu.cn

(PLW) environment in the urban area by combing the wind tunnel test and Computational Fluids Dynamics (CFD) simulations. The maximum wind speed-up ratio and integrated normalized speed-up area ratio were used to quantify the effects of five different building shapes and four building layouts on the PLW environment. The favored building shape and layout with omnidirectional equal-probability distribution were determined, and the underlying mechanism of building shape and layout that influences the PLW environment in the urban area were elucidated according to the whole flow-domain information attained by CFD simulations. The PLW of groups of Y-shaped tall buildings in the staggered layout was most favored, while the most unfavorable scenario was H-shaped and enclosed layout; In addition, the most unfavorable wind directions of square, H-shaped and X-shaped tall buildings were in the oblique direction, while these of the cross- and Y-shaped buildings were in the normal wind direction. The wind speed-up phenomena of groups of tall buildings at the pedestrian-level were mainly attributed to the flow separation at building corners and channeling effects.

Key words:urban area; pedestrian-level wind (PLW) environment; building shape; building layout; wind tunnel; CFD(Computational Fluids Dynamics)

高层建筑物的存在会显著改变城市区域的空气 流动,形成包括撞击、绕流、分离及尾流区域等多种 复杂的钝体空气动力学现象^[1-3].与此同时,随着城市 化进程的不断加快,高密度城市区域建筑物间的气 动干扰现象愈加突出,导致行人高度处出现显著的 高风速区域,进一步加剧了建筑群行人风环境的恶 化,影响行人舒适度,更有甚者会危及行人安全,带 来行人风环境问题^[4].因此,有必要对高层建筑物周 边区域的行人风环境进行深入研究,提出改善高密 度城市区域行人风环境的方法,进一步落实当前我 国发展可持续的绿色宜居城市的战略^[5].

国内外学者对建筑物行人风环境做了广泛研 究,并逐渐形成了行人风环境的评估流程.主要包含 4方面:当地风气候、周边地形影响、建筑气动特性以 及行人风环境评估标准¹⁰.其中,建筑气动特性对行 人风环境的影响是当前的研究热点". 学者们对此展 开了广泛的试验研究. Tsang 等^[8]对 4 个并列布置的 矩形高层建筑开展了风洞试验,研究了长宽比、建筑 间距对高层建筑周边行人高度处风速的影响.Xu 等的构建了 40 种不同形状的单体高层建筑,研究了 建筑形状对行人风环境的作用机理.受到测点数量的 限制,风洞试验中无法提供建筑群周围及其全域详 细的三维流场.近些年,随着计算流体动力学方法 (Computational Fluids Dynamics, CFD)的快速发展以 及高性能计算资源的增长, 雷诺平均湍流模型 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)、大涡模 拟方法(Large-eddy Simulation, LES)以及分离涡模拟 (Detached-eddy Simulation, DES)已在城市行人风环 境舒适性评估和研究中得到应用.虽然 LES 和 DES 模型能在尾流和分离区获得比 RANS 模型更准确的 瞬态流场结果,但由于 RANS 模型计算效率高,且在 高风速区能提供可靠的平均风速模拟结果,仍被广 泛应用于行人风环境的研究和工程实践^[10-12]. Iqbal 和 Chan^[13]结合风洞试验和 CFD 数值模拟研究了建 筑间距和风向对十字形高层建筑群行人风环境的影 响. Van 等^[14]结合风洞试验验证了多种 RANS 湍流模 型,并采用 RANS 模型研究了雨棚、露台以及透风楼 层等气动外形修正措施对单栋高层建筑行人风环境 的影响.但目前行人风环境研究的主要研究对象还 只是单栋或者 2~3 栋建筑,并且现有研究中建筑物 外形多以矩形或者方形为主,缺乏建筑布局以及外 形对高层建筑群风环境的影响研究.

基于以上研究现状,本文结合风洞试验和 CFD 数值模拟,定量分析了等概率全风向下建筑外形及 布局对高层建筑群风环境的影响,明确了最优建筑 外形和布局,并进一步基于 CFD 全域流场结果揭示 了建筑外形和布局对高层建筑群行人风环境的影响 机理.

1 研究方法

1.1 风洞试验

本次风洞试验在香港城市大学边界层风洞中进行(见图 1(a)),试验段尺寸为 11.0 m×4.0 m×2.0 m

(长×宽×高).试验来流依据日本规范所规定的Ⅲ类 地貌^[15](见图1(b)).试验所采用的模型均由PVC材 料制成,几何缩尺比为1:400;每个高层建筑群模型 由8个相同的单栋高层建筑模型构成,为了保证容 积率相同,每一个单体建筑具有相同的高度*H*(210 mm)和平面投影面积(见图2),模型的阻塞比小于 3%.为了研究建筑形状及布局对行人风环境的影 响,本文参考了城市街区常见的5种建筑形状和4 种建筑布局,共20个工况(见表1),风向角间隔30°. 结合本文采用的建筑布局和建筑外形,考虑实际试 验方案的可行性,在街道、转角以及建筑模型周边布 置了26个测点,测点高度为距地面2.0m(缩尺后为 0.5 cm)的行人高度处(见图3).风速测量采用 kanomax风速探头,精度为±0.1 m/s,采样频率选用 625 Hz.









 (h)中部开口式布局
 (i)错列式布局
 图 2 不同建筑外形及布局(5种建筑形状 及4种布局)(单位:mm)

Fig.2 Different building shapes and layouts(five building shapes and four building layouts)(unit:mm)

表1 试验工况表 Tab.1 Test cases

工况	玉小	布局	工况	职作	布局
编号	形私	方式	编号	形状	方式
S–E	方形	围合	Y-MO	Y 字形	中部开口
S -CO	方形	角开口	Y–S	Y 字形	错列
S -MO	方形	中部开口	H–E	H字形	围合
S –S	方形	错列	Н-СО	H字形	角开口
С-Е	十字形	围合	H-MO	H字形	中部开口
С-СО	十字形	角开口	H–S	H字形	错列
C-MO	十字形	中部开口	Х-Е	X 字形	围合
C–S	十字形	错列	Х-СО	X 字形	角开口
Ү–Е	Y 字形	围合	Х-МО	X 字形	中部开口
Ү-С О	Y字形	角开口	X–S	X 字形	错列

注:1)S-方形建筑;C-十字形建筑;Y-Y字形建筑;H-H 字形建筑;X-X字形建筑;E-围合式布局;CO-角开口式布局; MO-中部开口式布局;S-错列式布局;2)每个工况风向角间隔 30°,如S-E-180 代表风向角为 180°时的方形建筑群围合式布 局工况.



1.2 CFD 数值模拟

CFD 数值模拟中,所有模型的尺寸均与风洞试验保持一致.计算域尺寸为15H(长)×10H(宽)×6H(高)(如图4所示),CFD 数值模拟的阻塞率小于3%,满足日本风规范规定的数值模拟计算域大小的要求^[15],无需对结果进行修正^[16-17].边界条件设定见表2,入口设置为速度入口(Velocity-inlet),出口设置压力出口(Pressure-outlet),两侧边界及顶部边界均采用对称性边界条件(Symmetry),建筑壁面和地面采用无滑移壁面(No-slip wall).网格划分采用结构化网格,在建筑物壁面处对网格加密,首层网格高度为0.0002m,建筑壁面首层网格y⁺为30左右,网格增长率为1.1,所有工况网格总量为7×10⁶-9×10⁶.



Fig.4 Computational domain and boundary conditions

由于 RANS 湍流模型会显著影响数值模拟结果的精度,为了验证不同 RANS 湍流模型,本文根据 Xu 等人在东京工艺大学(Tokyo Polytechnic University,TPU)边界层风洞中开展的方形单体建筑行人风 环境试验结果⁽⁹⁾,分别从定性和定量角度验证了不同 RANS 湍流模型的模拟精度,包括标准 *k*-*e* 模型、 Realizable $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型 以及 SST $k-\omega$ 模型.其中标准 $k-\varepsilon$ 模型中的湍流参 数依据文献[12]进行了修正,验证湍流模型参数对高 风速区模拟准确性的影响.

表 2 边界条件的设定 Tab.2 Settings of boundary conditions

位置			边界条件
入流面		平均风速 U	$U(z) = U_H(z/H)^{0.203}$
	Velocity –inlet	湍动能 k	$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_{\mu}}} \sqrt{C_1 \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) + C_2} $ ^[18]
		湍动能 耗散率 ε	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \sqrt{C_1 \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + C_2}$
出流面	Outflow		$\partial(u, v, w, p, k, \varepsilon)/\partial x = 0$
侧面	Symmetry		$v = 0, \partial(u, p, k, \varepsilon)/\partial z = 0$
顶部	Symmetry		$w=0,\partial(u,v,k,\varepsilon)/\partial z=0$
地面	No-slip wall		标准壁面函数,考虑物理粗糙 高度:K _s =9.793y ₀ /C _s ¹⁰

注:K_s为地面粗糙度高度,本文为0.005 m;y₀为气动粗糙度长度;C_s为粗糙度系数,本文为0.75.

本文采用基于有限体积法的 ANSYS/Fluent 15.0 CFD 数值模拟平台,相应的湍动能、湍流耗散率及平 均风速剖面等入口边界条件通过编写自定义函数 (User-Define Function, UDF)实现;求解器为基于压 力求解的不可压缩流稳态算法,速度-压力耦合方式 为 SIMPLEC,动量方程和湍流模型输运方程的非线 性对流项离散格式为二阶迎风格式 (Second order Upwind Scheme, SUS);模拟收敛准则为所有变量的 残差变化稳定,最终观察到 $k \ D \varepsilon$ 残差达到 10⁻⁶ 以 下,连续方程残差达到 10⁻⁴ 以下,且在关键监测点风 速值达到平稳.

1.3 来流自保持性

行人风环境 CFD 数值模拟研究中,由于行人高 度距离地面较近,来流特性易受到地面粗糙度的影 响而无法保证风场特性在来流方向上的一致,影响 数值模拟结果的准确性.因此,基于 RANS 模型的 CFD 数值模拟的关键问题之一是验证来流的自保持 性,即流体经过地表面时,保证流场沿来流方向的流 动特性保持一致^{119]}.本文通过修正壁面函数及粗糙度 参数的方法来实现风速的自保持性^{120]}.如图 5 所示, 在空风场的校验结果中,入口和出口的风速剖面较 为一致,具有较好的自保持性.



1.4 网格无关性验证

本节以工况 S-E-180 为例(网格总数为 7×10°), 建立了两套不同尺寸的网格(稀疏网格首层网格尺 寸为 0.000 4 m, 增长率为 1.1, 网格总数 400 万左右; 加密网格首层网格尺寸为 0.000 1 m, 增长率为 1.1, 网格总数1100万左右);3套不同网格对比见图6, 同时在图 7 中,给出了采用不同网格尺寸得到的 26 个测点模拟结果.

图7结果表明,稀疏网格与基本网格之间的计 算结果存在显著差异,而加密网格与基础网格之间 的差异却很小.说明采用基础网格进行模拟不仅可 以保证计算精度,而且可以尽可能小地消耗计算资 源,因此本文所有计算工况网格均按照基础网格方 式划分.





Fig.7 Grid-convergence analysis

1.5 行人风环境评估方法

在对建筑物周边的行人风环境进行评估时,常 常采用风速比 R_i进行分析^[21],其相关定义如下:

$$R_i = \frac{V_i}{V_0} \tag{1}$$

式中:V:为建筑物周边测点在行人高度处(本文为离 地面高度2m处)的风速;V。为无建筑物时,入口行 人高度处风速.

一方面,从定量的角度,本文通过采用误差度量 指标 q 进行分析^[22],其定义如下:

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} n_i,$$

$$n_i = \begin{vmatrix} 1, \left| \frac{R_{i \exp} - R_{i \text{ CFD}}}{R_{i \exp}} \right| \leq q \neq |R_{i \exp} - R_{i \text{ CFD}}| \leq q;$$

$$0, \notin \mathbb{H}.$$

(2)

式中:N为测点总数;Riesp、RiCFD分别代表试验结果及 其对应的数值模拟结果;q值最大计算误差为 20%.

另一方面,为了定量分析建筑形状和布局对高 层建筑群行人风环境的影响,本文采用最大风速比 R_{max}和归一化加速面积比A^{*}_{Rave}对建筑群风环境进行 量化评估¹⁹,其相关定义如下:

$$R_{\max,\theta} = \max(R_{i,\theta}), A_{R,\theta}^* = \frac{A_{R,\theta}}{A_T}$$
(3)

 $R_{\max} = \max(R_{\max,\theta}), R_{\min} = \min(R_{\max,\theta}),$

$$A_{R,\text{avg}}^* = \frac{1}{N} \sum A_{R,\theta}^*$$
(4)

其中A_T为评估区域的面积,本文为900×900 mm²,如图 8 所示.

由前文定义可知,A_R,中R值的大小应该为一 个大于 1.0 的数值. 关于 R 的具体取值, 在缺乏气象 统计资料时,要想满足风环境舒适性,主导风向下的风速比不宜大于 1.2^[23].因此,本文采用 *R_i* = 1.2,即计算 *A*_{1.2,0} 的归一化加速面积.



Fig.8 Schematic of speed–up area $A_{R,\theta}$

2 结果与讨论

2.1 CFD 结果验证

首先,基于 TPU 风洞试验结果,验证了 5 种不同 的 RANS 湍流模型,并将其模拟结果与试验结果进 行对比,发现:对于建筑物两侧加速区域的模拟,使 用不同的 RANS 湍流模型,其模拟结果有所不同,其 中 RNG *k*-*e* 模型以及修正湍流参数后的标准 *k*-*e* 模型模拟的效果最好.限于篇幅,此处不再给出相关 结果.这与现有研究中 RANS 模型对于高风速区域 (*R*_i>1.0)的模拟较为准确的结论基本一致^[10-13].考虑 到标准 *k*-*e* 模型计算效率更高,本文在后续研究中 主要采用经过修正湍流参数的标准 *k*-*e* 模型开展数 值模拟研究.

表 3 为本文开展 240 个工况在全部风向角下高风速区(*R*_i > 1.0)的试验与模拟误差对比结果,并与当前采用 RANS 模型开展行人风环境研究的数值模拟验证结果进行了对比.

从表 3 可以看出:高风速区,所有测点的最大误差值为 20.22%(工况 Y-E-150); 最小误差为 0.087%(工况 H-CO-0);与现有研究相比(郑朝荣 等^[24]的最大误差为 22.5%,最小误差为 1.21%,Iqbal 等^[13]的最大误差为 25.1%,最小误差为 1.59%),本 文的模拟精度更高,具有较高的可信度.

为了进一步说明经过修正湍流参数的标准 k-e

模型模拟结果的可信度,采用误差度量指标 q 进行 分析^[22],q 值根据前文计算最大误差选择 20%.

表 3 CFD 与试验结果对比

Tab.	.3 (Cross-comparison	between (CFD	and	test	resul	ts
------	------	------------------	-----------	-----	-----	------	-------	----

工况	最大	最小	一 7/田	最大	最小
	误差/%	误差/%	上优	误差/%	误差/%
S-E	15.82	0.21	Y-MO	20.22	2.29
S –CO	16.27	1.21	Y-S	19.74	2.84
S -MO	17.89	1.27	H–E	15.44	1.93
S –S	18.94	0.38	Н-СО	16.39	0.087
С-Е	17.55	0.91	H-MO	19.24	0.65
C-CO	16.55	1.96	H-S	15.82	1.23
C-MO	18.01	1.55	Х-Е	11.38	0.16
C–S	15.99	2.03	Х-СО	12.09	2.15
Ү–Е	14.21	0.62	X-MO	14.38	1.29
Y-CO	16.07	1.55	X-S	17.36	0.81

图 9 统计了所有工况的 q 值,发现所有计算工况的 q 值均在 0.85~0.92 之间,表明本文数值模拟计算的整体最大误差小于 15%,数据置信度在 0.85 以上.数值模拟在高风速区域可以得到与试验较为一致的结果,但在低风速区 RANS 模型结果准确性则较差,主要是因为本文所采用的稳态雷诺平均模型在建筑物尾流漩涡脱落区域(低风速区)低估了尾流中的湍动能,导致数值模拟结果与风洞试验结果相差较大.现有研究表明:采用 RANS 模型对行人风环境进行研究时,数值模拟与试验结果在高风速区 (*R*_i > 1.0)高度吻合,其误差控制在 0.2 左右,低风速区则准确性较差,与本文模拟结果相同⁶.



2.2 建筑形状及布局对行人风环境的影响评估

2.2.1 建筑形状对行人风环境影响

为了研究建筑形状对行人风环境的影响,图 10、 图 11 分别给出了不同建筑形状在不同风向角下 *R*_{max,θ}和*A*¹_{12,θ}的分布情况.









由于错列式分布的 R_{max,0} 和 A^{*}_{12,0} 分布趋势与围 合式分布趋势相同,角开口式与中部开口式布局的 R_{max,0} 和 A^{*}_{12,0}趋势相同,限于篇幅,结果未给出,可参 考图 10 和图 11 分布情况。

从图 10 *R*_{max,θ} 的分布趋势来看:在围合式布局和 角开口式布局下,方形、H字形及 X 字形建筑群的 *R*_{max} 出现在斜风向下,*R*_{min} 则出现在正风向下;而十 字形及 Y 字形建筑群则与此相反,*R*_{max} 出现在正风 向下,*R*_{min} 则出现于斜风向.对于角部开口式布局,可 以得到相同的结论,表明这四种布局不影响不同建 筑形状的最有利以及最不利风向角.进一步分析比 较 *A*^{*}_{1.2.θ},其分布规律与 *R*_{max,θ} 的分布规律完全相同, 即不同布局下,方形、H 字形及 X 字形的建筑群的最 有利风向为正风向,最不利风向为斜风向;十字形及 Y 字形建筑群的最有利风向为斜风向,最不利风向 为正风向.

图 12 给出了不同建筑形状在围合式布局下,最 不利风向角下所对应的行人高度处的风速比云图. 通过图 12 可以看出:风场中的高风速区域集中在建 筑群的侧面及建筑物之间形成的天然廊道中.进一 步分析,对于建筑群侧面高风速区域的形成,主要是 由于建筑物迎风前缘对风场剪切作用和气流下洗作 用联合造成的^[24];而建筑物通道高风速区域,则是由 于建筑物之间形成的通风廊道,产生狭管效应现象, 使得廊道区域的风速明显增大^[25].

图 13 为不同的计算工况在全风向下的最大风 速比 *R*_{max} 与归一化平均加速面积比 *A*^{*}_{1.2,avg} 的分布情 况. 从 *R*_{max} 和 *A*^{*}_{1.2,avg} 值的趋势来看,对于这 20 种不同 的计算工况, *R*_{max} 最大值为 1.532, 最小值为 1.468, 均 位于 1.5 附近, 相互之间差值仅为 4.18%; 另一方面 比较 A¹_{12,ag}的大小,明显发现不同工况之间 A¹_{12,ag}差 异很大,最大值为 4.02,最小值则为 1.67,相互之间 的差值超过了 140%.因此,在保持高度和容积率一 定的情况下,建筑群周边最大风速比不会随着建筑 形状和建筑布局的改变而发生明显变化;但建筑形 状和建筑布局会改变建筑群周边高风速区域的面积 大小,而高风速区域正是本文研究的重点.从 R_{max} 和 A¹_{12,ag}值的大小来看,围合式布局中,方形围合式布 局建筑群的 A¹_{12,ag}值最小,因此可认为其行人风环境



(a)方形围合式布局(b)十字形围合式布局(c)Y字形围合式布局



(d)H字形围合式布局 (e)X字形围合式布局
 图 12 最不利风向角下围合式布局行人高度处 R_i 云图
 Fig.12 Contours of R_i of buildings with five shapes in enclosed layout under the most unfavored wind direction



average speed-up area ratio of different test cases

整体上最优;相同的,角开口式及中部开口式布局下,十字形建筑群的整体行人风环境最优;Y字形建筑群在错列式布局下的行人风环境最优.与之前研究结论基本一致^[26-27].

2.2.2 建筑布局对行人风环境影响

由于 H 字形及 X 字形的 R_{max,θ} 和 A^{*}_{1,2,θ}分布趋势 与方形完全相同,Y 字形则和十字形的 R_{max,θ} 和 A^{*}_{1,2,θ} 分布趋势相同,因此,本节仅给出了方形和十字形建 筑群在不同布局下的 R_{max,θ} 和 A^{*}_{1,2,θ}分布情况.

从分布趋势来看(如图 14 和图 15 所示),方形 建筑群在四种不同布局下, *R*_{max} 对应的风向角均为斜 方向, 而 *R*_{min} 对应的风向角均与建筑物迎风面垂直; 十字形建筑群在四种布局下的结论与方形建筑群相 反. 这说明在不同布局下, 方形、H 字形及 X 字形的 建筑群的最有利风向角与建筑物侧表面垂直, 最不 利风向角则为斜风向; 而十字形和 Y 字形建筑群在 不同布局下的结论与前者截然相反.





Fig.15 $A_{1,2,\theta}^*$ under different building layouts

图 16 和图 17 以方形及十字形建筑群为例,分 析其作用机理,发现造成建筑群周边区域风速增大 的两个主要原因为角部分离效应及狭管效应.由于 方形建筑前角的分离剪切作用较大,导致其角部分 离效应更加明显,这就使得最不利风向角出现于斜 风向下.

通过计算不同工况下 R_{max} 和 A^{*}_{12.wg}值,从整体上 对不同工况的行人风环境进行评估. 方形、H 字形及 X 字形建筑群均在错列式布局下具有最优的行人风 环境效应; 十字形及 Y 字形建筑群则在中部开口式 下具有最优的行人风环境效应. 综合考虑建筑布局 和建筑形状,风环境最好的是 Y 字形错列式布局建 筑群,风环境最差的是 H 字形围合式布局建筑群.



通过风洞试验与数值模拟方法,深入研究了建 筑形状和建筑布局对高层建筑群行人风环境的影 响,得出如下结论: 1)经过风洞试验的验证,表明采用 RANS 模型 研究高层建筑群周边的行人风环境是可行的,对于 高风速区域的模拟,通过修正湍流参数,可以采用标 准 *k*-*e* 模型获得与风洞试验较为一致的模拟结果.

2)造成建筑群周边区域风速增大的主要原因是 建筑群中出现角部分离效应和狭管效应.建筑群周 边最大风速比 *R*_{max} 的大小不受建筑形状以及建筑布 局的影响,所有工况下 *R*_{max} 均位于 1.5 附近.

3)建筑形状对建筑群的最不利风向角影响较显 著,5种不同建筑形状下,方形、H字形及X字形建 筑群的最不利风向角均出现在斜风向角度,十字形 和Y字形建筑群的最不利风向为正风向;建筑布局 对于建筑群的最不利风向角度影响很小,4种不同布 局下,建筑群最不利风向角度未发生变化.

4)综合考虑建筑布局和建筑形状的影响,行人 风环境最好的是Y字形错列式布局建筑群,最差的 是H字形围合式布局建筑群.

5)在保持高度和容积率一定的情况下,建筑群 周边最大风速比不会随着建筑形状和建筑布局的改 变而发生明显变化.

参考文献

- KUBOTA T, MIURA M, DE TOMINAGA Y, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian – level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods [J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1699–1708.
- [2] 方智远,汪之松,李正良.雷暴冲击风作用下高层建筑风荷载频 域特性 [J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(1):100-107.

FANG Z Y, WANG Z S, LI Z L. Frequency domain characteristics of wind loads on high-rise buildings under thunderstorm downburst [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 100–107. (In Chinese)

- [3] 汪梦甫,梁晓婷. 带伸臂桁架减振层高层结构抗风效果分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):1-7.
 WANG M F,LIANG X T. Analysis on wind resistance effect of high-rise building with damped outrigger storeys [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(3):1-7. (In Chinese)
- [4] JUAN Y H, YANG A S, WEN C Y, et al. Optimization procedures for enhancement of city breathability using arcade design in a realistic high -rise urban area [J]. Building and Environment,

2017,121:247-261.

- [5] DU Y X,MAK C M. Improving pedestrian level low wind velocity environment in high-density cities: a general framework and case study[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 42:314—324.
- [6] BLOCKEN B, JANSSEN W D, VAN HOOFF T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 30: 15-34.
- [7] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, VAN BEECK J P A J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment [J]. Building and Environment, 2016, 100: 50-81.
- [8] TSANG C W, KWOK K C S, HITCHCOCK P A. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium [J]. Building and Environment, 2012, 49:167–181.
- [9] XU X D, YANG Q S, YOSHIDA A, et al. Characteristics of pedestrian-level wind around super-tall buildings with various configurations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 166:61-73.
- [10] YOSHIE R, MOCHIDA A, TOMINAGA Y, et al. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9/11):1551—1578.
- [11] MITTAL H,SHARMA A,GAIROLA A. A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 18:154-163.
- [12] BLOCKEN B. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: a foregone conclusion? [J]. Building Simulation, 2018, 11(5):821-870.
- [13] IQBAL Q M Y Z, CHAN A L S. Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation [J]. Building and Environment, 2016, 101:45-63.
- [14] VAN DRUENEN T, VAN HOOFF T, MONTAZERI H, et al. CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrianlevel wind speed [J]. Building and Environment, 2019, 163: 106293.
- [15] Recommendations for loads on buildings:AIJ—2004 [S]. Tykyo: Architectural Institute of Japan, 2004:10—12.
- [16] FRANKE J, HIRSCH C, JENSEN A G, et al. Recommendations on the use of CFD in wind engineering [C]//Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics. Belgium, DC: Von Karman Institute, 2004:568-576.
- [17] FRANKE J, HELLSTEN A, SCHLÜNZEN H, et al. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment
 [M]. Brussels: Meteorological Inst. COST Office, 2007:16–18.

- [18] YANG Y, GU M, CHEN S Q, et al. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(2):88–95.
- [19] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, CARMELIET J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(2):238-252.
- [20] 罗凯文,杨易,谢壮宁.基于 k-e 模型模拟平衡态大气边界层的 比较研究[J].工程力学,2018,35(2):21-29.
 LUO K W, YANG Y, XIE Z N. A comparative study on the simulation of neutral atmospheric boundary layer based on the k-e turbulence model[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2):21-29. (In Chinese)
- [21] STATHOPOULOS T, WU H, BÉDARD C. Wind environment around buildings: a knowledge-based approach [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 44(1/3): 2377–2388.
- [22] LIU Z Q, ISHIHARA T, TANAKA T, et al. LES study of turbulent flow fields over a smooth 3–D hill and a smooth 2–D ridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 153: 1–12.
- [23] 建筑工程风洞试验方法标准:JGJ/T 338—2014[S].北京:中国 建筑工业出版社,2014:13—15 Standard for wind tunnel test method of building engineering:JGJ/T

338-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,

2014:13-15. (In Chinese)

[24] 郑朝荣,陈勇,金钊,等. 基于超越阈值概率的某千米级摩天大楼室外平台行人风环境评估[J]. 建筑结构学报,2018,39(2): 122-129.

ZHENG C R, CHEN Y, JIN Z, *et al.* Pedestrian wind environment assessment on the outdoor platform of a certain kilometer –level skyscraper based on the probability of exceeding the threshold [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (2):122–129. (In Chinese)

- [25] BERNABEI R, BELLI P, MONTECCHIA F, et al. Possible implications of the channeling effect in NaI(Tl) crystals [J]. The European Physical Journal C, 2008, 53(2):205-213.
- [26] 应小字,朱炜,外尾一则.高层建筑群平面布局类型对室外风环 境影响的对比研究[J].地理科学,2013,33(9):1097—1103.
 YING X Y,ZHU W,HOKAO K. Comparative study on the influence of layout types of high-rise buildings on outdoor wind environment [J]. Geographical Sciences,2013,33 (9):1097—1103. (In Chinese)
- [27] 马剑,陈水福.平面布局对高层建筑群风环境影响的数值研究
 [J].浙江大学学报(工学版),2007,41(9):1477—1481.
 MA J,CHEN S F. Numerical study of plan arrangement effect on wind environment around tall buildings [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2007,41 (9):1477—1481. (In Chinese)