

超高层连体建筑风荷载干扰效应大涡模拟研究^{*}

柯世堂[†], 王浩

(南京航空航天大学 土木工程系, 江苏 南京 210016)

摘 要:超高层三塔连体建筑的主楼受到裙房及子楼的干扰作用显著,以某超高层三塔连体建筑为对象,基于LES(大涡模拟)方法对其进行了24个方向角下的数值风洞试验,并将主楼的体型系数与物理风洞试验结果进行了对比验证,再基于大涡模拟结果分别从平均和脉动风压特性、涡量分布以及干扰机理等方面探讨了超高层多塔连体建筑风荷载和干扰效应.结果表明:大涡模拟和风洞试验结果吻合较好;单体工况下主塔表面随机涡旋较密集、风压脉动较大、且尾流分离区域较小,当子塔处于主塔上游位置时对主塔结构抗风设计存在有利的“遮挡效应”,此时来流湍流对主塔风场分布起主导作用;当子塔处于主塔下游位置时会对主塔存在不利的风压放大作用,特征湍流作用更明显.

关键词:超高层连体结构;数值风洞试验;大涡模拟;风荷载;干扰效应

中图分类号:TU973.213; TU312.1

文献标志码:A

Large Eddy Simulation Investigation of Wind Loads and Interference Effects on Ultra High-rise Connecting Buildings

KE Shitang[†], WANG Hao

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The main building of three-tower ultra high-rise connecting buildings is significantly interfered by the podiums and annexes. Large eddy simulation was adopted for three-tower ultra-high-rise connecting buildings. The shape coefficients of the main building were calculated, and the computational results were compared with the wind tunnel test results. The wind fields, wind pressure coefficients, and the interference effects between tall buildings were discussed. It is found that the large eddy simulation was a feasible way, and the turbulent wind velocity was higher in condition with single building. The field of flow separation is more lasting in condition with three buildings. The interference effect might have beneficial sheltering effect on the wind-induced vibration response of the main building when the main building was in the upstream. On the contrary, the wind pressure of main building might have been magnified when the main building was in the downstream.

^{*} 收稿日期:2016-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208254), National Natural Science Foundation of China(51208254); 博士后科学基金资助项目(2013M530255; 1202006B), China Postdoctoral Science Foundation(2013M530255; 1202006B); 中央高校基本科研业务费资助项目(YAH12010), Fundamental Research Funds for the Central Universities(YAH12010); 江苏省优秀青年基金项目(BK20160083), Outstanding Youth Foundation of Jiangsu Scientific Committee(BK20160083)

作者简介:柯世堂(1982—),男,安徽池州人,南京航空航天大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: keshitang@163.com

Key words: ultra high-rise connecting buildings; numerical wind tunnel simulation; large eddy simulation; wind load; interference effect

现代高层建筑逐渐朝着超高层、形式多样化发展,涌现出很多双塔甚至多塔连体结构.超高层多塔连体建筑的风荷载和响应特征与单体建筑有很大的不同,主要表现为主塔与子塔、以及子塔之间的干扰效应^[1],加上裙楼的影响使得整个多塔连体建筑的风荷载和干扰效应愈加复杂^[2-4].

历史上曾经发生过多起因为群体建筑物间相互干扰导致的风毁事件,这类事故的发生表明对超高层建筑间的风致干扰效应开展研究非常重要.而我国荷载规范对此类三塔连体超高层建筑的风荷载没有明确的规定,尽管国内外学者对典型超高层建筑表面风压分布和周围风环境^[5]、群体建筑干扰机理和风压特性^[6-7]、双塔连体结构风荷载特性^[8]等进行了深入研究,但大多数是对两栋单独或双体建筑的干扰效应进行了研究,且数值风洞研究大多拘泥于传统模拟方法,无法准确地揭示流场特征和干扰机理.随着国内超高层多塔连体建筑的大量兴建,已有的研究成果不能满足此类建筑设计风荷载取值和抗风机理研究的要求,因此,对于超高层多塔连体结构风荷载和干扰效应的 LES 研究具有重要的理论价值和工程意义.

鉴于此,本文对某超高层三塔连体建筑进行了大涡模拟研究,并通过与风洞试验结果对比验证了数值方法的有效性.再基于大涡模拟结果分别从涡量分布、干扰机理以及典型测点的脉动风压特性等方面探讨了超高层多塔连体结构风荷载特性和干扰效应,相关研究结论可为此类超高层三塔连体结构抗风设计提供科学依据.

1 工程概况

此超高层三塔连体建筑位于东南沿海地带,总建筑面积约 54.5 万 m²,包含商业、酒店、办公、公寓等功能;地下建筑分为 3 层,面积约 14.8 万 m³.本工程建筑群以钢筋混凝土框架-核心筒结构为主,主体工程有 3 栋连体建筑,其中主楼 A 为 65 层塔楼外加塔冠,总高度 298.7 m.子楼 B、C 塔楼总高度 158.7 m,底部为 5 层裙房,总高 16.1 m,如图 1 所示.

参照《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)相关条款,确定本工程设计基本风压为 0.70 kN/m²,地面粗糙度类别为 B 类,地面粗糙度指数为 0.15.

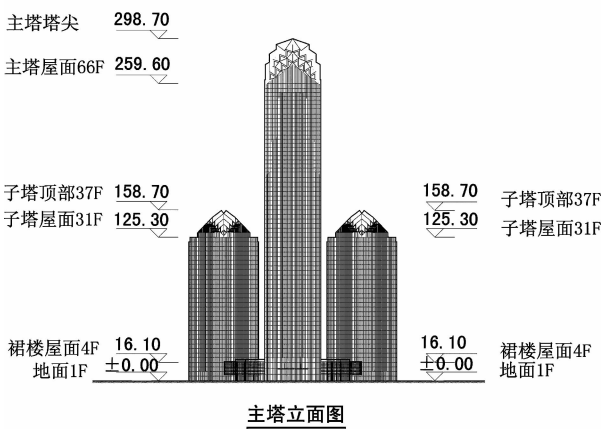


图 1 超高层三塔连体建筑立面图(m)
Fig. 1 Elevation and plan drawings of the three-tower ultra high-rise connected building(m)

2 大涡模拟

由于 LES 方法能够获得详细的湍流场动态信息,其已逐渐成为计算风工程领域的研究热点之一.大涡模拟法采用滤波函数,将流场中的涡分为大尺度涡以及小尺度涡,对大尺度涡进行直接求解,而小尺度涡则采用亚格子模型进行模拟.基于大涡模拟的数值计算能够很好地模拟流场以及风荷载的动力特性,并且可以模拟流场以及荷载特性在时间历程上的变化.本文通过模拟非稳态边界层湍流风场,采用大涡模拟方法获得此类建筑主塔表面的风荷载时程和周围流场分布.

2.1 几何建模和网格划分

为保证流动能够充分发展,三塔连体结构主体建筑底层外轮廓约为 140 m×180 m×300 m(长×宽×高),计算域为长方体, X=3 000 m, Y=1 800 m, Z=800 m,其中 X 为顺风向, Y 为横风向, Z 为高度方向,建筑物置于距离计算域入口 3H 处,从而保证尾流的充分发展.图 2 为三塔连体建筑的网格划分方式,为了更好地兼顾计算效率与精度,将计算域划分为局部加密区域以及外围区域.外围区域形状规整,可以用高质量的结构化网格进行划分;局部加密区域包含建筑模型,采用非结构化网格进行划分.核心区最小网格尺寸为 0.5 m,总网格数量约 520 万.

2.2 边界条件及数值计算设置

运用 FLUENT 流体软件进行大涡数值模拟计

算,计算域入口采用速度入口,设置大气边界层指数风速剖面和湍流度剖面,其中风速剖面中地面粗糙指数为 0.15,参考高度取 $Z_{\text{ref}}=10\text{ m}$,取 10 m 高 50 年一遇基本风速作为参考风速 $V_{\text{ref}}=33.8\text{ m/s}$,通过 UDF 文件定义上述脉动风场(见图 3);计算域顶部和侧面采用等效于自由滑移壁面的对称边界条件;计算域出口采用压力出口边界;地面以及建筑物表面采用无滑移壁面边界。

空气风场选用不可压缩流场,亚格子模型采用 Smagorinsky-Lilly 模型,同时采用 SIMPLEC 方法进行离散方程组的求解,该方法收敛性好且适合时间步长较小的大涡模拟计算^[9],设置了网格倾斜校正以提高混合网格计算效率.在进行非定常计算之前先进行 RANS 的定常计算,通过瞬态化处理使 LES 初始流场达到具有合理统计特征的状态. LES 计算的时间步长取为 0.05 s.

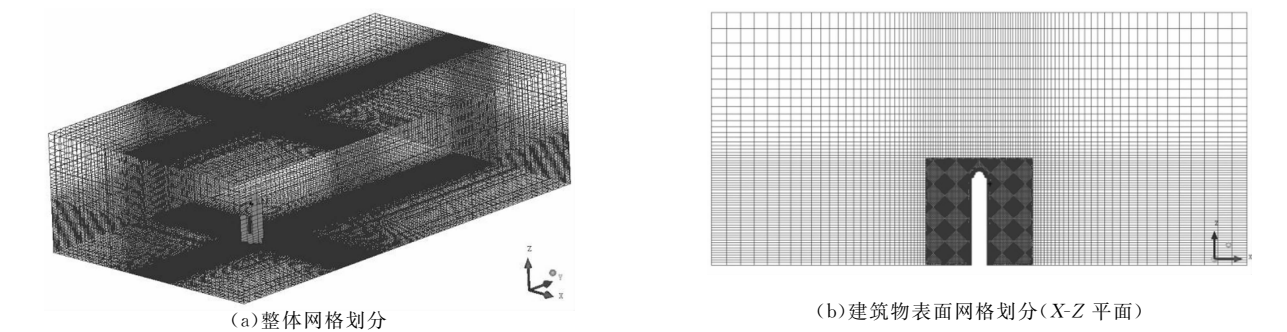


图 2 计算域和网格划分示意图
Fig. 2 Computational domain and mesh arrangement

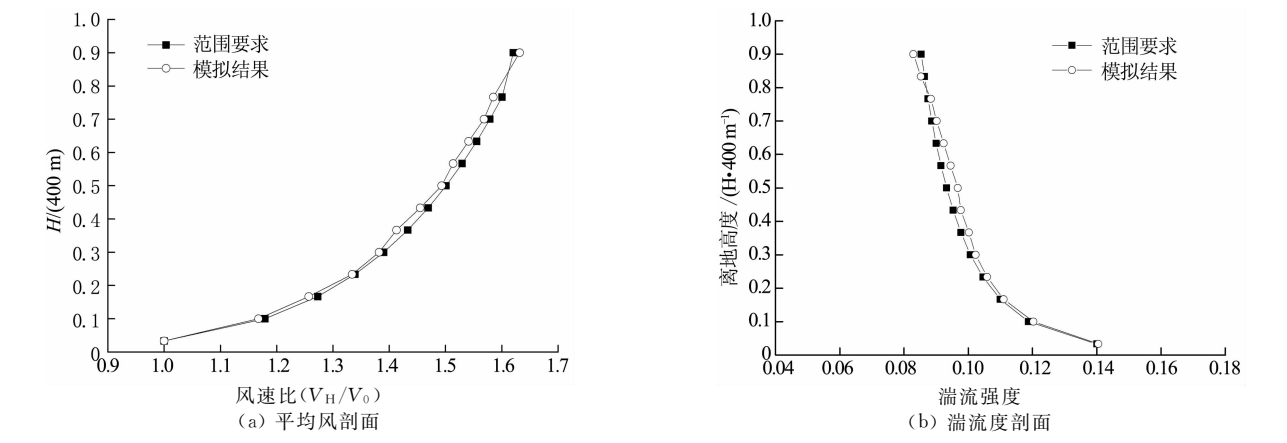


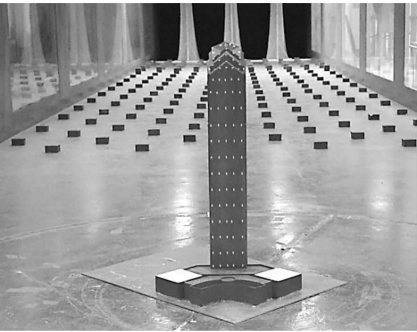
图 3 B 类风场模拟参数图
Fig. 3 Simulation parameters in terrain B

3 结果分析

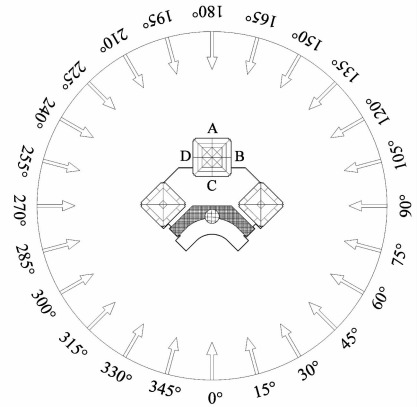
3.1 数值模拟有效性验证

对超高层连体建筑进行了干扰和单工况下的测压风洞试验.模型缩尺比为 1 : 300,在主塔表面沿高度布置 18 层,共 340 个同步测点,每个面 85 个测点,编号分别以 A,B,C 和 D 表示.试验中模拟风向角范围在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,角度间隔为 15° ,共 24 个试验风向角.图 4 给出了风洞试验模型及风向角示意图.将主楼数值模拟计算结果与风洞试验结果进行

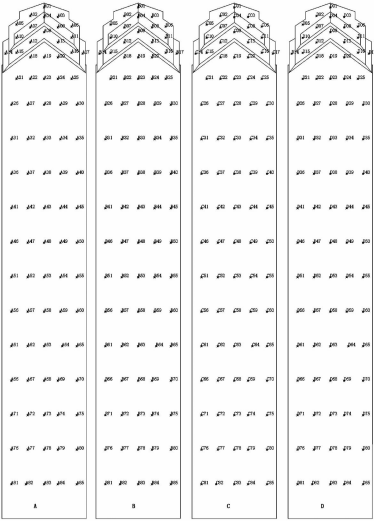
了比较,图 5 给出了 0° 风向角 80 m 和 160 m 截面测点数据对比图,图中测点 1 对应建筑物正迎风面中点,之后的测点按逆时针方向排列.可以发现,大涡模拟的结果与风洞试验的数据较接近且总体趋势十分吻合.模拟结果在建筑物的背面、侧面以及棱角处吻合较好,这些区域正是漩涡脱落和流动分离比较明显的地方^[10].风洞试验 1 : 300 的几何缩尺模型在屋顶和棱角处的测点无法足够密集,采用大涡模拟方法对此类结构的风荷载干扰效应进行研究具有可行性和科学性^[11].



(a) 风洞刚体测压模型



(b) 实验风向角



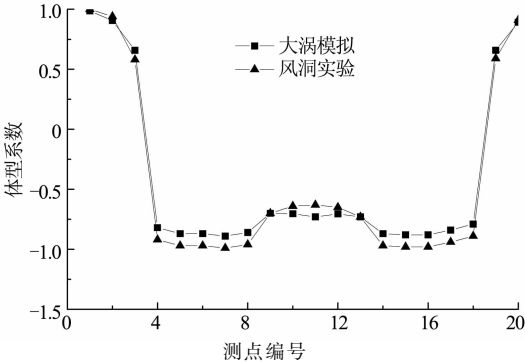
(c) 主塔测点布置图

图 4 风洞试验模型及测点布置图
Fig. 4 Rigid pressure test modal in wind tunnel and main tower measuring point layout

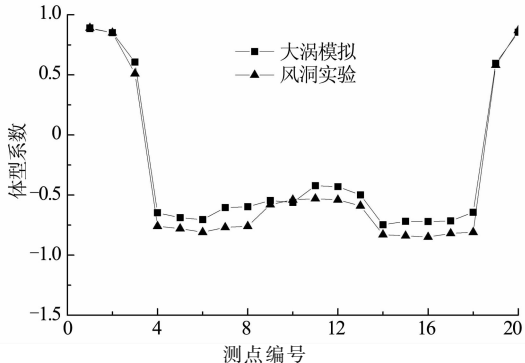
3.2 群塔流场干扰效应

图 6 和图 7 给出了 30°风向角下两种工况在不同高度处的风速等值线图。

对比可知:1)两种工况下主楼的正前方风速有明显差异,干扰工况下主楼正前方风速小于单工况下的风速,说明干扰建筑对主楼存在一定的“遮挡效应”;2)干扰工况下狭缝处的风速较单工况下风速小,与普通的并列布置不同,由于施扰建筑(子楼,

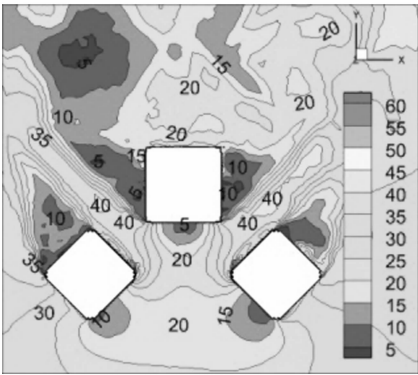


(a) Z=80 m 截面

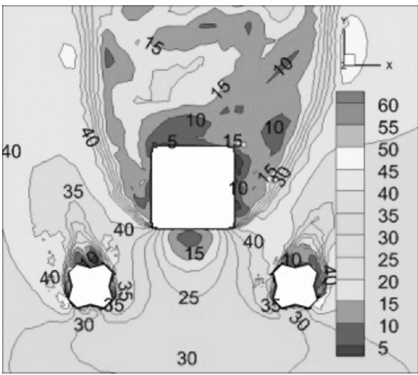


(b) Z=160 m 截面

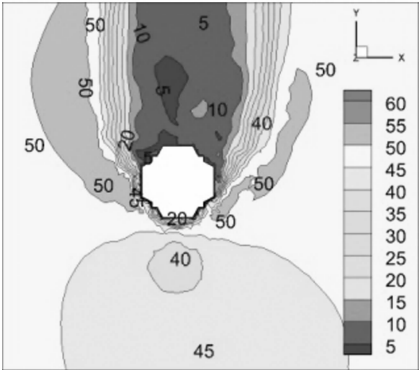
图 5 主楼 0°风向角下 80 m 及 160 m 截面体型系数
Fig. 5 Comparison of tower shape coefficient of main building in 80 m and 160 m height at 0 degrees of wind direction



(a) Z=50 m 高度处

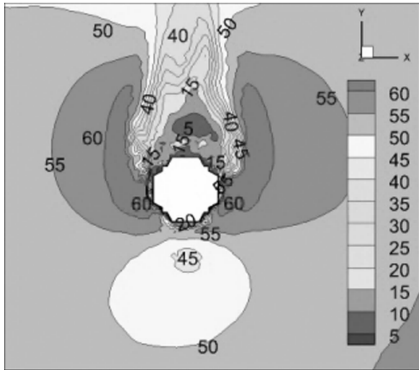


(b) Z=150 m 高度处



(c) $Z=280\text{ m}$ 高度处

图 6 干扰工况下不同高度平面风速等值线
Fig. 6 Contours of velocity magnitude of mode with disturbance at different height



(c) $Z=280\text{ m}$ 高度处

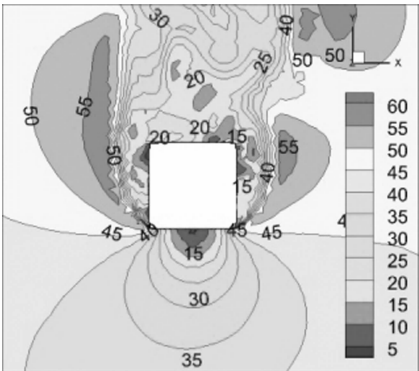
图 7 单体工况下不同高度平面风速等值线
Fig. 7 Contours of velocity magnitude of mode with main building at different height

下同)高度相对受扰建筑(主楼,下同)并不大,“峡谷效应”并不强烈;且由于受扰建筑两侧对称布置了干扰建筑,使得受扰建筑两侧流动分离相对对称,抵消了一部分“峡谷效应”和涡激振动^[12];同时子塔对主塔存在的“遮挡效应”也是狭缝处风速减小的原因之一;3)在不同高度处 B,C 塔对主塔都存在干扰影响且规律接近,说明干扰塔对受扰塔的干扰在其高度以上($Z\geq 150\text{ m}$)仍然存在,此超高层三塔连体建筑在静力干扰方面呈现明显的三维效应。

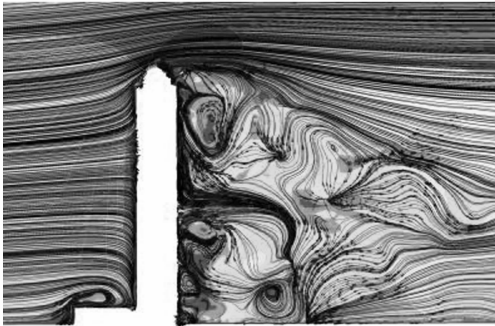
两种工况下建筑周围的风速云图和流线图如图 8 和图 9 所示. 由图可知, LES 方法很好地还原了流场分布以及流线的不规则性和复杂性, 风场在建筑物顶部和建筑迎风面棱角处发生流动分离, 出现加速效应. 气流在建筑物的侧面和顶部由于发生流动分离出现了漩涡脱落的现象, 在背风面和侧面形成尾流涡旋以及回流, 这些涡旋作用于建筑物背风面和侧面, 是形成吸力的原因之一. 主塔建筑采用了棱角处内收的设计方案, 一定程度上减小了建筑物侧面的流动分离现象。



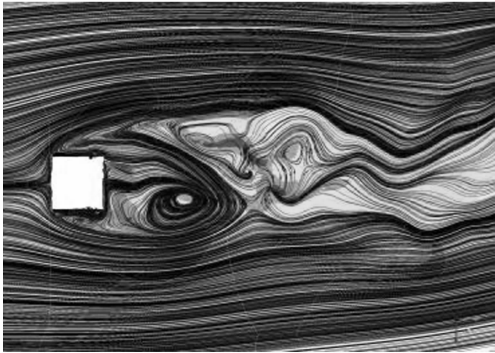
(a) $Z=50\text{ m}$ 高度处



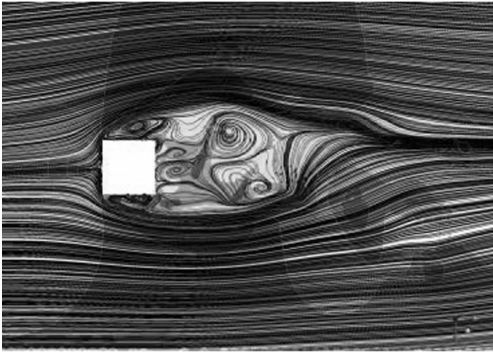
(b) $Z=150\text{ m}$ 高度处



(a) $X=0.1\text{ m}$ 平面

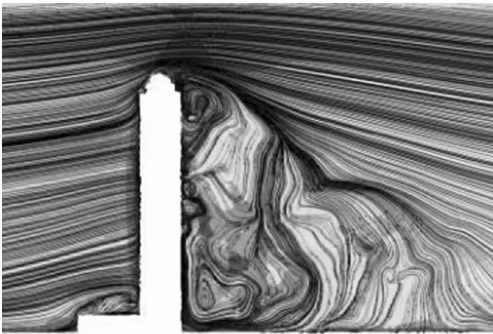


(b) $Z=120\text{ m}$ 平面

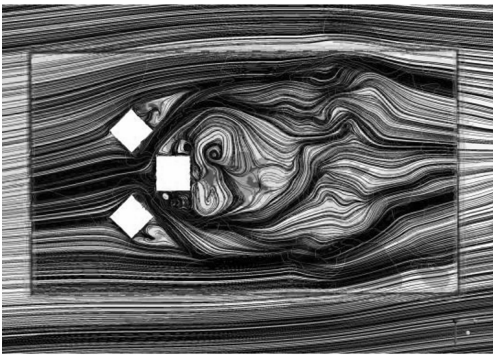


(c) $Z=240\text{ m}$ 平面

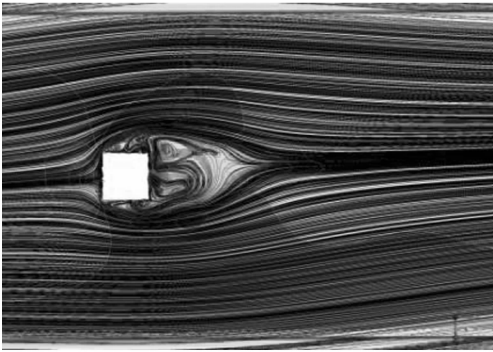
图 8 0° 风向角单体工况风速云图和流线图
Fig. 8 Wind speed chart and flow chart of single unit working condition at 0° wind degrees direction



(a) $X=0.1\text{ m}$ 平面



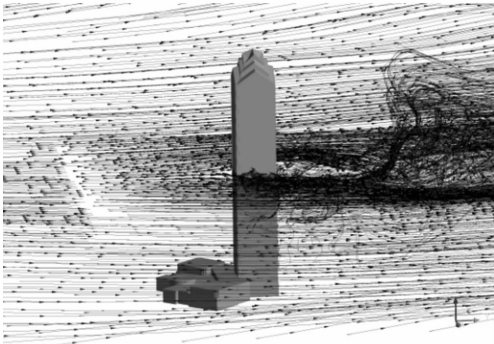
(b) $Z=120\text{ m}$ 平面



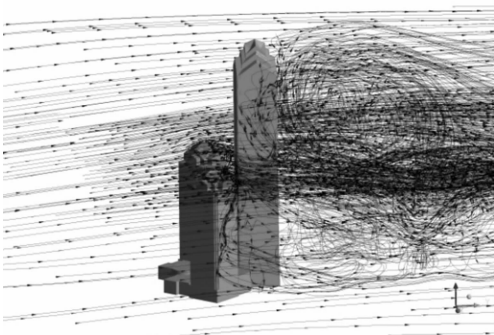
(c) $Z=240\text{ m}$ 平面

图 9 0° 风向角干扰工况风速云图和流线图
Fig. 9 Cloud chart and flow chart of disturbance conditions at 0° degrees of wond direction

图 10~12 给出了 0° 风向角下从 $Z=150\text{ m}$ 高度处的流线尾迹图和涡量图,对比发现:1)单体工况主楼后方的近尾流区域涡旋扁平,远尾流的影响距离也较短;建筑物表面尾流涡旋较多,涡旋尺度更细碎,导致涡旋强度较大.干扰工况下,施扰建筑的存在导致尾流分布呈现出明显的三维特征,尾流涡旋较少,再附着现象并不明显,近尾流区域的湍流特征将导致结构平均风压和脉动风压的减小(图 17, 18);2)子楼的存在导致超高层三塔连体建筑下游区域产生更长的尾流涡旋区,与单体工况形成的尾流差异很大,不能忽视子楼对周边建筑造成的影响.

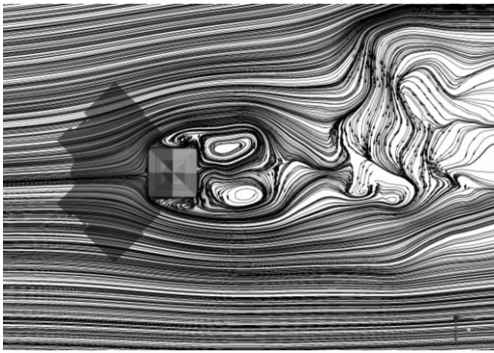


(a) 单体工况

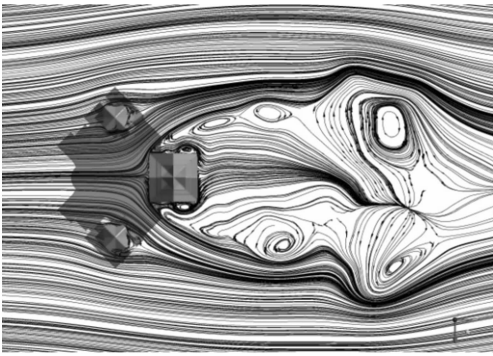


(b) 干扰工况

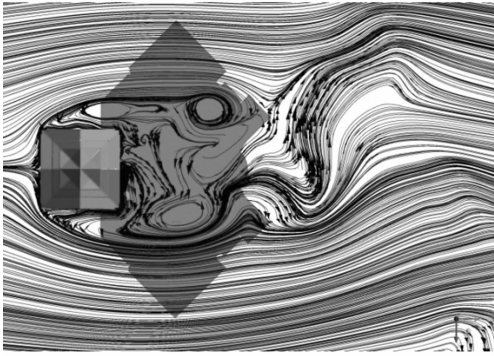
图 10 $Z=150\text{ m}$ 高度处流线图
Fig. 10 Diagram of streamlines at $Z=150\text{ m}$



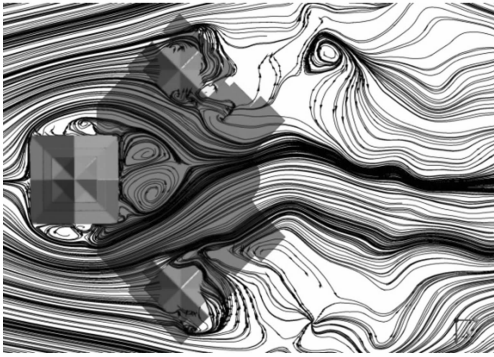
(a) 单体工况



(b)干扰工况

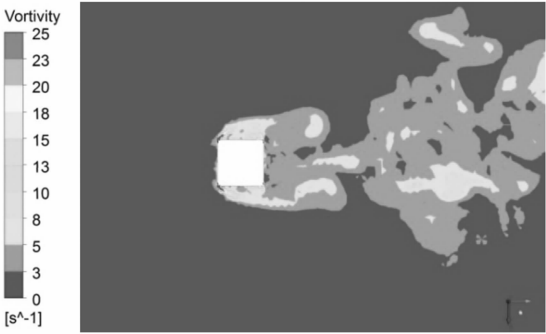


(a)单体工况

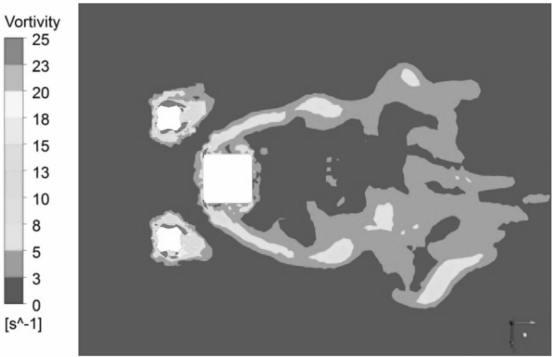


(b)干扰工况

图 13 180°风向角下 Z=150 m 高度处 X-Y 平面流线图
Fig. 13 Diagram of streamlines on X-Y plane at height of 150 m (180 dearness of wind direction)



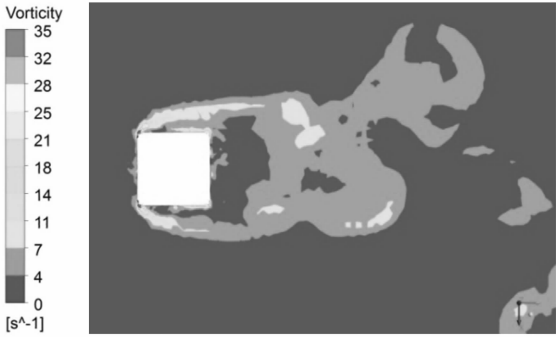
(a)单体工况



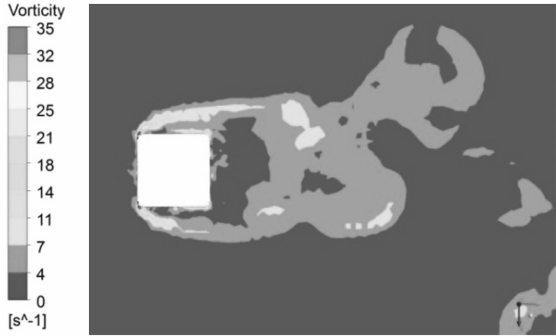
(b)干扰工况

图 12 0°风向角下 Z=150 m 高度处 X-Y 平面涡量图
Fig. 11 Diagram of vorticity distribution on X-Y plane at height of 150 m (0 dearness of wind direction)

180°风向角下 Z=150 m 高度处 X-Y 平面流线尾迹图和涡量图如图 13,14 所示,由图可知:1)在建筑物两侧产生明显的流动分离,在分离泡形成离散的涡旋,并脱落到建筑下方的尾流.同时上游建筑尾流边界受到施扰建筑干扰,导致漩涡中存在较大的逆压梯度,在气流分离处会产生较大的负压影响;2)180°风向角下,子楼的存在对主楼的来流湍流不大,而特征湍流差异明显,导致主楼周围风速、涡量及风压的增大.



(a)单体工况



(b)干扰工况

图 14 180°风向角下 Z=150 m 高度处 X-Y 平面涡量图
Fig. 14 Diagram of vorticity distribution on X-Y plane at height of 150 m (180 dearness of wind direction)

3.3 风压分布特性

图 15 给出了 0°风向角下主楼正迎风面部分测点

的风压系数时程曲线,其中 C63,C48 和 C33 测点分别位于正迎风面 100,160 和 220 m 高度处中点位置.由图可知:1)干扰工况下主楼受到明显的遮挡效应影响,测点所受风压较单体工况小;2)在施扰建筑高度($Z=150$)以下,遮挡效应较为明显,两种工况主楼风压系数相差较大;施扰建筑高度处,仍有明显的干扰且会产生较大的风压脉动;主体结构在施扰建筑高度以上,受上升气流的影响(图 10)遮挡效应明显减弱.

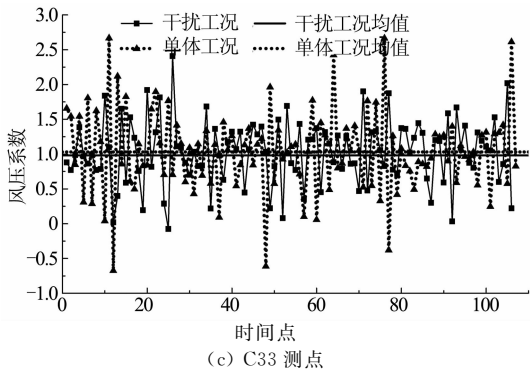
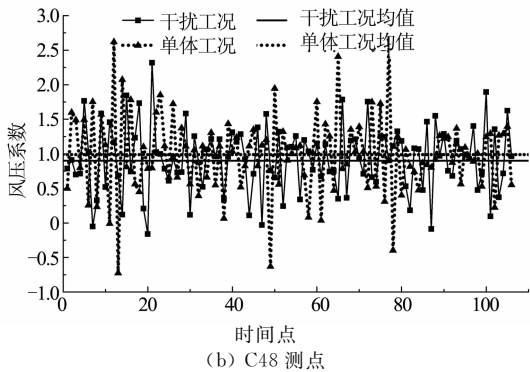
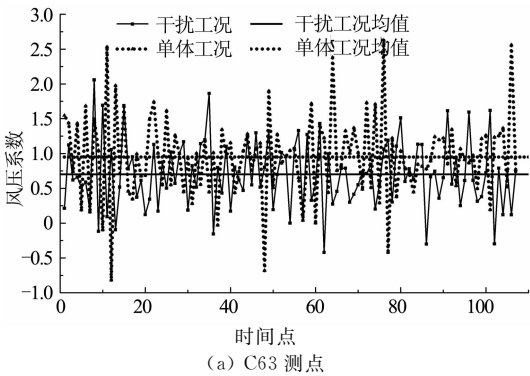


图 15 0°风向角下部分测点风压系数时程曲线
Fig. 15 Time history of some measure point
at 0 azimuth degrees of wind direction

180°风向角下主楼部分测点的风压时程曲线如图 16 所示,其中 A48 和 C48 点分别位于迎风面和背风面 160 m 高度处中点位置.分析可知:1)当施扰建筑处于受扰建筑的下游时,施扰建筑对于风压系数均值和根方差仍有不可忽略的影响,原因是上

游建筑尾流边界受到施扰建筑干扰(图 12)^[13];2)下游施扰建筑物对上游高层建筑会产生风压放大的干扰影响.

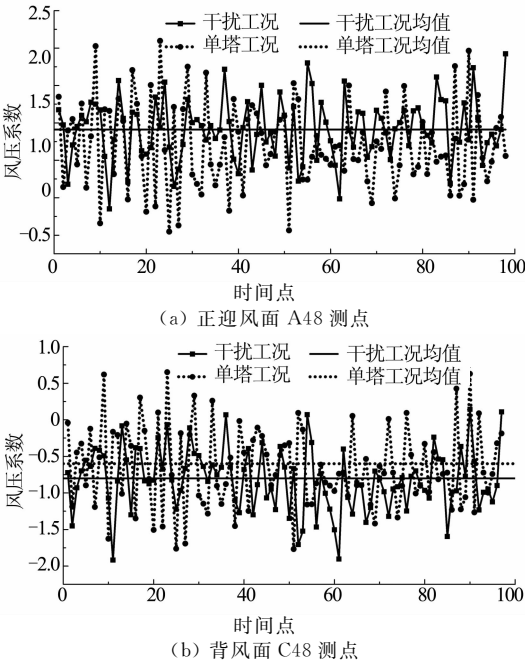
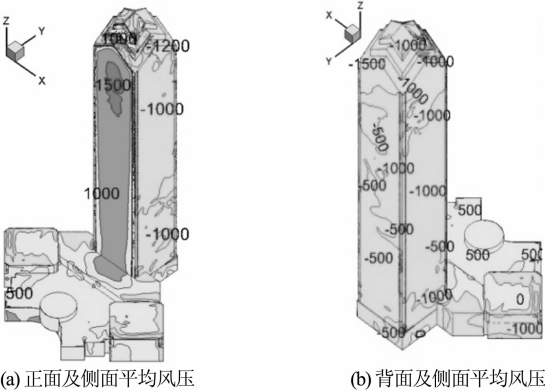


图 16 180°风向角下部分测点风压系数时程曲线
Fig. 16 Time history of some measure point
at 180 degrees of wind direction

图 17,图 18 分别给出了 0°风向角下表面平均风压和脉动风压分布.由图可知:1)两种工况下建筑物表面的平均风压分布规律比较一致,子塔的存在对主楼平均风压起到有利的“遮挡作用”;2)对比单体和干扰工况下正迎风面的脉动风压,在 100~220 m 高度范围内,干扰工况由于子塔的尾流影响导致主楼的脉动风压明显大于单体工况;3)由于建筑物屋顶采用阶梯型造型和裙楼的影响使得塔楼顶部和下部存在剧烈的流动分离和频繁的漩涡脱落现象,导致此处脉动风压较大,需引起重视;4)来流风在建筑物的两侧产生较强的流动分离现象,导致建筑物角部负压明显且变化较快.



(a) 正面及侧面平均风压 (b) 背面及侧面平均风压

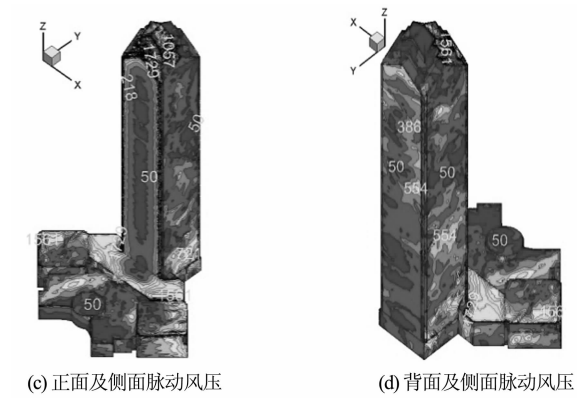


图 17 0°风向角下单体工况建筑表面风压分布
Fig. 17 Pressure distributions on surface of building with single building at 0 azimuth

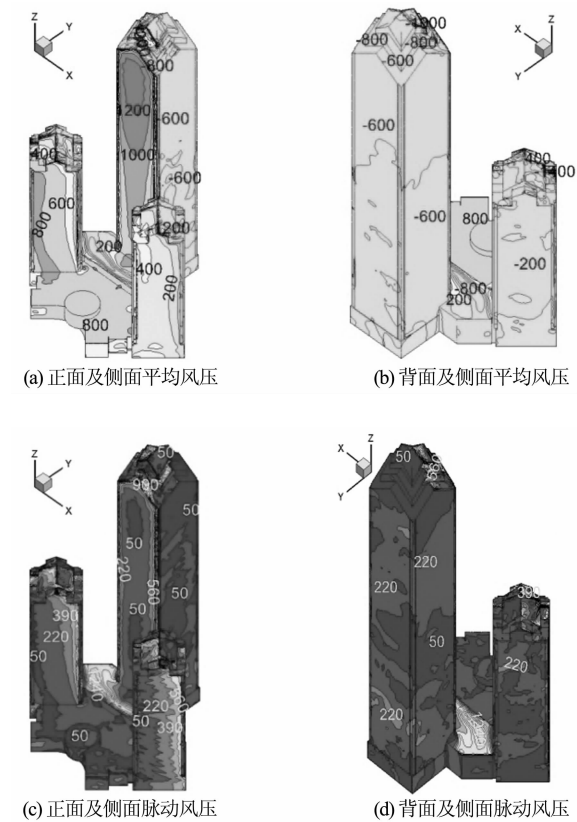


图 18 0°风向角下干扰工况建筑表面风压分布
Fig. 18 Pressure distributions on surface of building with three buildings at 0 degrees of wind direction

180°风向角下超高层三塔连体建筑表面的平均风压和脉动风压分布如图 19,图 20 所示。干扰工况下,主楼表面平均风压大于单体工况;主楼在 150 m 高度(施扰建筑高度)附近会产生剧烈的横风向共振效应,这种气动增强现象是由施扰建筑塔顶处存在的交替变化的回流所致,由此可见即使当施扰建筑处于受扰建筑物下游时仍需重视其对受扰建筑的风压干扰,尤其在施扰建筑总高度附近。

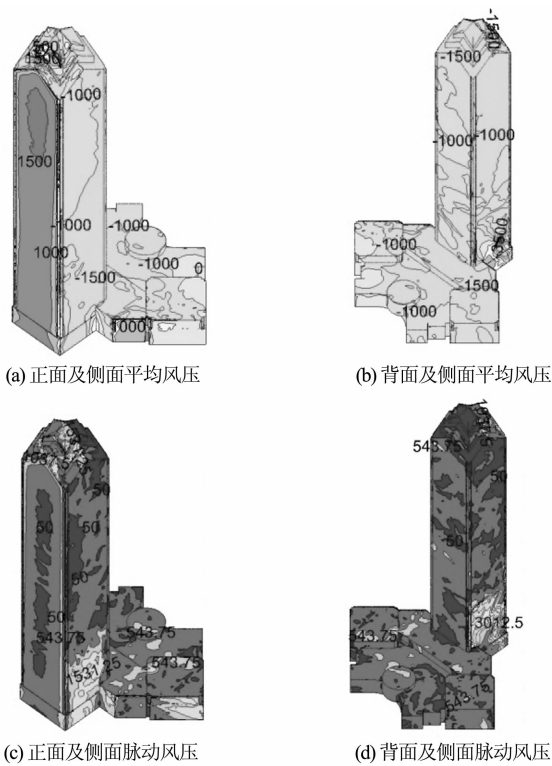


图 19 180°风向角下单体工况建筑表面风压分布
Fig. 19 Pressure distributions on surface of building with single building at 180 degrees of wind direction

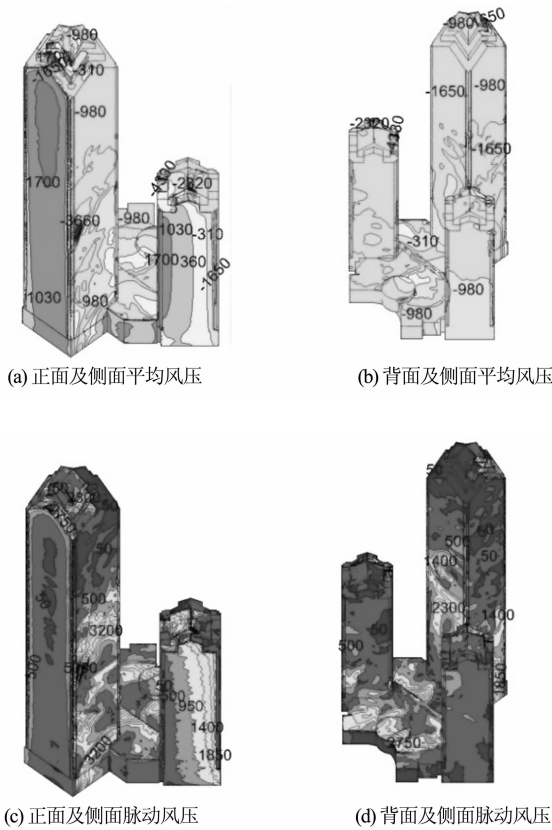


图 20 180°风向角下干扰工况建筑表面风压分布
Fig. 20 Pressure distributions on surface of building with three buildings at 180 degrees of wind direction

4 结 论

- 1) 基于 LES 方法对超高层三塔连体建筑进行数值模拟, 并与风洞试验结果进行对比验证了数值方法的准确性.
- 2) 施扰建筑处于受扰建筑上游时, 两种工况下超高层三塔连体建筑主塔周围风场存在较大差别, 干扰工况下风场的流动分离区域较长, 单体工况下随机涡旋较密集, 风压脉动较大; 施扰建筑的存在导致尾流分布呈现出明显的三维特征. 结果表明此超高层三塔连体建筑的多塔干扰对主塔结构抗风设计存在有利的“遮挡效应”, 此时来流湍流相比特征湍流起主导作用.
- 3) 施扰建筑处于受扰建筑下游时, 特征湍流的作用明显, 下游建筑对上游高层建筑会产生风压放大作用, 不能忽视下游建筑造成的“峡谷效应”和尾流干扰效应.
- 4) 由于施扰建筑的存在将导致建筑物下游区域存在更长的尾流涡旋区. 由此提出在密集大型商业圈的超高层多塔连体结构旁新建其他超高层建筑时, 在满足其他技术条件的情况下仍需考虑超高层多塔连体结构尾流的不利影响, 间距不能太小.

参考文献

[1] 余先锋, 谢壮宁, 顾明. 群体高层建筑风致干扰效应研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 1—11.
YU Xianfeng, XIE Zhuangning, GU Ming. Research progress of wind-induced interference effects on tall buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 1—11. (In Chinese)

[2] HUANG M F, CHAN C M, LOU W J. Optimal performance-based design of wind sensitive tall buildings considering uncertainties[J]. Computers & Structures, 2012, 98: 7—16.

[3] 张相庭. 结构风工程: 理论·规范·实践[M]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2006: 126—135.
ZHANG Xiangting. Structural wind engineering: theory, standard, practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 126—135. (In Chinese)

[4] 李秋胜, 陈凡. 高层建筑气动弹性模型风洞试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(1): 20—28.
LI Qiusheng, CHEN Fan. Experimental study of aerolastic effect on tall building [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(1): 20—28. (In Chinese)

[5] 王磊, 梁枢果, 邹良浩, 等. 超高层建筑抗风体型选取研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(11): 34—39.
WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Study on the body shape selection of super high-rise building from the

point of wind resistance[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(11): 34—39. (In Chinese)

[6] 张敏, 楼文娟, 何鸽俊, 等. 群体高层建筑风荷载干扰效应的数值研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 179—185.
ZHANG Min, LOU Wenjuan, HE Gejun. Numerical study on interference effects of wind loads about a cluster of tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 179—185. (In Chinese)

[7] 杨立国, 唐意, 金新阳. 错列超高层建筑群风荷载静力干扰效应的试验与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 125—130.
YANG Ligu, TANG Yi, JIN Xinyang. Numerical study and tests on wind-induced mean interference effects of staggered tall buildings [J]. Building Structure, 2011, 41(11): 125—130. (In Chinese)

[8] 滕振超, 何金洲. 双塔连体结构风荷载作用下的反应分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(8): 1844—1846.
TENG Zhenchao, HE Jinzhou. The effects analysis of double-tower connected structure on the wind load[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(8): 1844—1846. (In Chinese)

[9] 谢华平, 何敏娟, 马人乐. 基于 CFD 模拟的格构塔平均风荷载分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(5): 1980—1986.
XIE Huaping, HE Mingjuan, MA Renle. Analyse of mean wind load of lattice tower based on CFD simulation[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2010, 41(5): 1980—1986. (In Chinese)

[10] CHANG C H, ROBERT N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 1325—1334.

[11] 秦云, 张耀春, 王春刚. 数值风洞模拟结构静力风荷载的可行性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1593—1597.
QIN Yun, ZHANG Yaochun, WANG Chungang. Feasibility study about numerical wind tunnel in the simulation of static wind loads on buildings [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(12): 1593—1597. (In Chinese)

[12] 顾明, 葛福. 施扰建筑高度对主建筑层升力影响的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 181—188.
GU Ming, GE Fu. Experimental study of impact of changes in relative height of interfering building on main building layer lift force [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(2): 181—188. (In Chinese)

[13] 黄本才, 汪丛军, 周大伟, 等. 下游干扰体对上游高层建筑风力的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1025—1029.
HUANG Bencai, WANG Congjun, ZHOU Dawei, et al. Interference effects of wind forces of downstream buildings on upstream high-rise building[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(8): 1025—1029. (In Chinese)