

干扰下方形超高层建筑风压的非高斯特性研究*

何书勇¹, 刘庆宽^{1,2,3}, 张同亿⁴, 郑云飞⁵, 王 熙¹, 付赛飞¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043) (4. 中国中元国际工程有限公司 北京, 100089)

(5. 石家庄铁路职业技术学院铁道工程系 石家庄, 050041)

摘要 借助刚性模型测压试验, 对干扰状态下的方形超高层建筑表面风压的非高斯特性进行研究。给出非高斯测点数量干扰因子 IF 和非高斯测点数量占建筑总测点数的比例 Q , 来分析建筑表面风压非高斯特性受干扰的影响程度。以串列和并列布置为例, 对受扰建筑表面风压的非高斯区域进行划分, 并给出其风荷载建议值。结果表明: 参数 Q 和 IF 能够准确地描述受扰建筑表面风压非高斯区域的大小及其受干扰的影响程度, 并确定了受扰建筑表面风压非高斯特性最明显时施扰建筑的位置; 串列和并列布置下, 施扰建筑对受扰建筑各表面风压非高斯区域的发生位置以及大小均产生不同程度的影响; 考虑了受扰建筑表面风压的非高斯特性, 给出串列和并列布置下受扰建筑表面风荷载极大负值随间距变化的拟合公式, 结果可为此类结构的抗风设计提供参考。

关键词 高层建筑; 风洞试验; 干扰效应; 非高斯特性; 风荷载

中图分类号 TU972⁺.9; TU201.1

引 言

超高层建筑围护结构对风荷载比较敏感, 在抗风设计时需要予以关注。目前对于风荷载的设计, 国内外大部分荷载规范均基于结构表面风压时程服从高斯分布的假设进行设计^[1-2], 然而研究表明^[3-5], 结构表面的极值风压在高湍流、尾流以及流动分离区域时呈现明显的非高斯特性。因此, 对于结构荷载设计是否需要考虑风压的非高斯特性仍需要进一步研究^[3-10]。

目前, 针对单个建筑风压发生非高斯的区域及其影响因素研究较多, 且得到较好的结论; 而对干扰下建筑表面的风压非高斯特性及其风荷载取值研究较少。因此, 笔者基于刚性模型测压试验, 对干扰下的方形超高层建筑表面风压的非高斯特性进行研究。首先, 给出参数 IF 和 Q , 来分析建筑表面风压非高斯特性受干扰的影响程度, 确定受扰建筑表面风压非高斯特性最明显时, 施扰建筑的位置; 其次, 给出串列和并列布置时受扰建筑各表面风压非高斯区域的划分情况; 最后, 基于划分的风压高斯和非高斯区域, 对不同的区域采用相应的风荷载计算方法, 并给出其风荷载建议值, 结果可为干扰下超高层建筑围护结构的荷载设计提供理论依据。

1 风洞试验概况

1.1 试验模型及测点布置

试验模型为同尺寸的两方形建筑, 其长×宽×高均为 100 mm×100 mm×600 mm, 模型的几何缩尺比为 1:300, 模型的测点布置如图 1 所示。为了研究模型 b 位置的改变对模型 a 的影响, 采用符合右手定则的坐标系统, 以模型 a 的底部中心位置为坐标

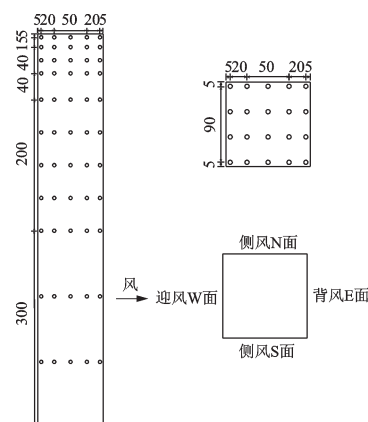


图 1 试验模型测点布置(单位:mm)

Fig.1 Arrangement of measuring points in the test model (unit: mm)

* 国家自然科学基金资助项目(51778381);河北省自然科学基金资助项目(E2018210044);河北省高端人才资助项目(冀办[2019]63号);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2020065)

收稿日期:2021-05-29;修回日期:2021-10-12

原点建立坐标系,如图2所示,其中横、纵坐标均经过无量纲处理,分别表示模型b的 x,y 坐标值与模型宽度 B 的比值。测试模型b位于模型a上游 $18B$ 、下游 $5B$ 以及横风向 $5B$ 范围内共140个位置时受扰建筑表面,模型b为施扰建筑。

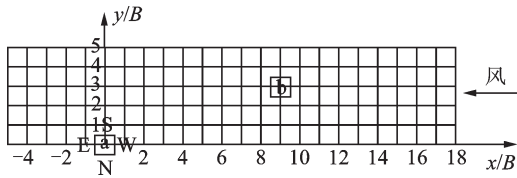
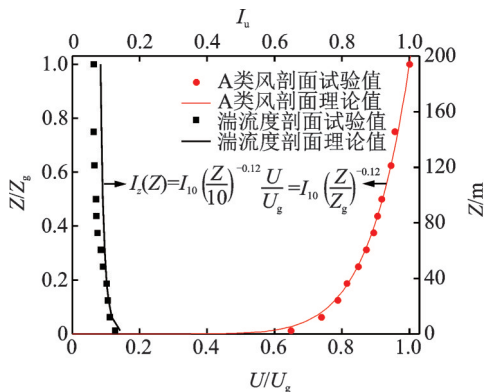


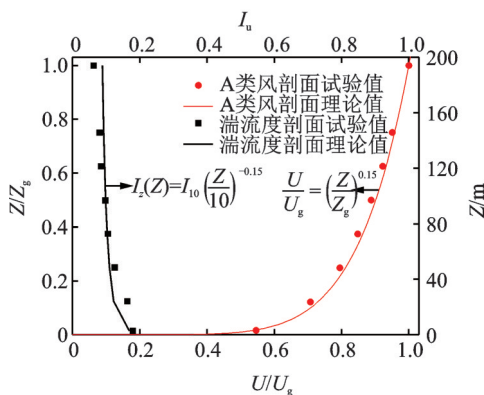
图2 试验模型的位置示意图
Fig.2 Location diagram of the test model

1.2 风场模拟

本次试验分别在均匀、A类和B类风场中进行,其中均匀流场的湍流度小于0.4%。A类和B类风场的平均风速和紊流度剖面见图3。试验时以模型高度600 mm处为参考点,参考点处风速为16 m/s,压力测试仪器采样频率为312.5 Hz,采集时间为28.8 s,每



(a) A类风场
(a) Class A wind field



(b) B类风场
(b) Class B wind field

图3 平均风速剖面与紊流度剖面

Fig.3 Mean wind velocity profile and turbulence profile

个测点都记录了9 000个数据的压力时域信号。

1.3 数据处理方法

1.3.1 风荷载的计算

模型表面各测压点的风压值,均采用无量纲的风压系数表示

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{P_r} = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5\rho U_r^2} \quad (1)$$

其中: $C_{pi}(t)$ 为测点 i 处的风压系数; $P_i(t)$ 为测点 i 处的风压; P_0 为参考点静压; P_r 为来流动压,取模型顶部高度处来流动压; ρ 为空气密度; U_r 为参考点高度处来流的风速平均值。

式(2)和式(3)分别为按统计方法计算的风压系数极值和风荷载极值

$$C_{pi}^{\pm} = \bar{C}_{pi}(t) \pm k\tilde{C}_{pi}(t) \quad (2)$$

$$w_{ki}^{\pm} = K_T C_{pi}^{\pm} w_0 \quad (3)$$

其中: $\bar{C}_{pi}(t)$ 和 $\tilde{C}_{pi}(t)$ 分别为 $C_{pi}(t)$ 的均值和均方根; k 为峰值因子,工程应用中常取 $3.5^{[11-12]}$,因此本研究取3.5; C_{pi}^+ 和 C_{pi}^- 分别为风压系数极大值和极小值; w_{ki}^+ 和 w_{ki}^- 分别为风荷载极大值和极小值; K_T 为风场换算系数,荷载规范规定A类和B类风场, K_T 分别取1.284和1; w_0 为基本风压,为了使结果更具有普适性,本研究取 w_0 为0.1 kN/m²。

1.3.2 脉动风压的非高斯区划分标准

对于脉动风压的非高斯特性,采用风压时程的三阶矩(偏度)和四阶矩(峰度)进行表征,表达式为

$$S(i) = j^{-1} \sum_{i=1}^j [(C_{pi}(t) - \bar{C}_{pi}(t)) / \tilde{C}_{pi}(t)]^3 \quad (4)$$

$$K(i) = j^{-1} \sum_{i=1}^j [(C_{pi}(t) - \bar{C}_{pi}(t)) / \tilde{C}_{pi}(t)]^4 \quad (5)$$

其中: $S(i)$ 和 $K(i)$ 分别为测点 i 风压系数时程的偏度和峰度; j 为风压时程的数据个数,在此为9 000。

文献[3]建议将 $|S| > 0.5$ 且 $|K| > 3.5$ 作为脉动风压非高斯区域的划分标准,文献[4, 9, 13, 14]均沿用此标准展开研究。笔者参考文献[7]的方法,用偏度和归一化峰度的关系对此判断标准进行验证,处理结果见图4,其中 $(K-S)/K$ 为归一化峰度,除了迎风W面和顶面的偏度和归一化峰度呈线性关系外,其他3个面上均偏离线性。已有研究表明^[3-4],正对来流风向的高层建筑迎风面和受气流影响较小的顶面的风压基本服从高斯分布,而其他3个立面一般处于气流分离区、再附区以及尾流区域,其表面风压服从非高斯分布,这也说明高斯和非高斯测点的偏度和峰度之间的关系不同。

分别对迎风W面和顶面测点的偏度 S 和归一化峰度 $(K-S)/K$ 进行分析,得到的回归方程为

$$(K - S)/K = 1.011 - 0.3938S \quad (6)$$

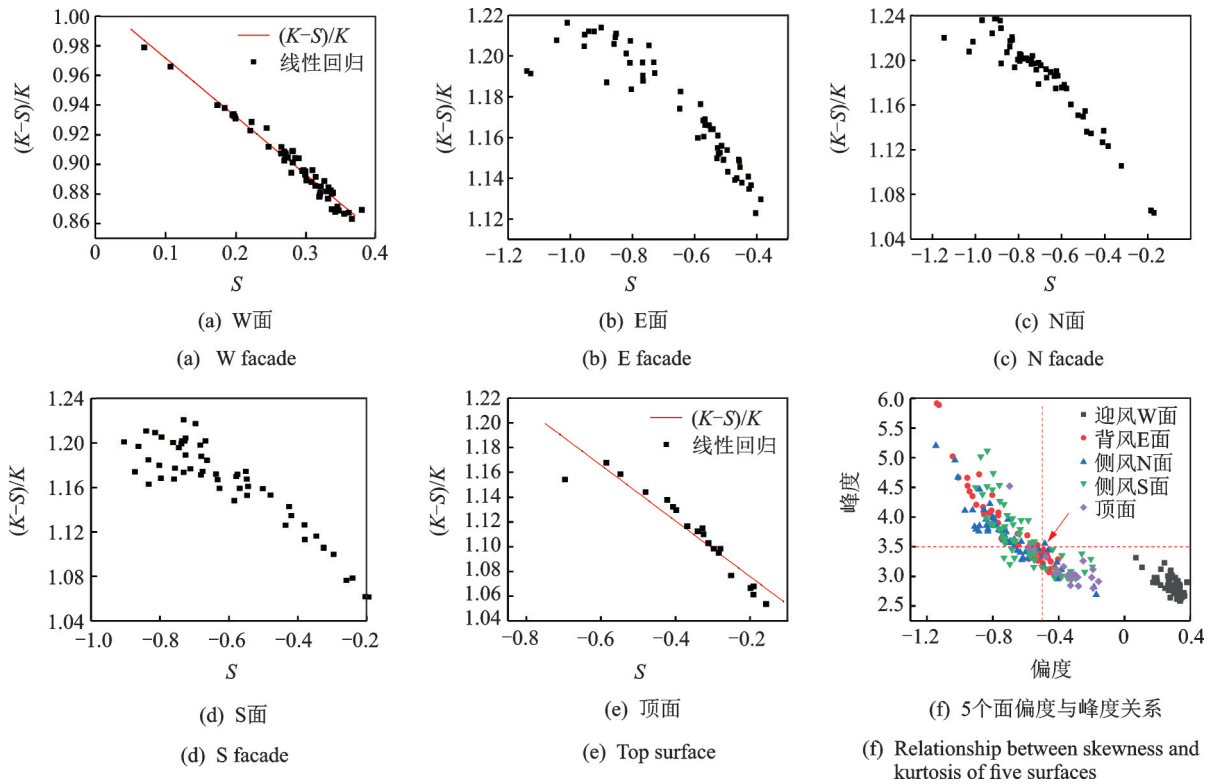


图 4 测点偏度与归一化峰度、峰度的关系

Fig.4 Relationship between skewness of measurement points and normalized kurtosis and kurtosis

$$(K - S)/K = 1.031 - 0.2247S \quad (7)$$

当测点的偏度和峰度满足式(6)和式(7)时,测点的风压时程服从高斯分布,否则服从非高斯分布。但如果偏度很大、峰度很小或偏度很小、峰度很大时测点也服从高斯分布。因此,结合图 4(f)确定超高层建筑非高斯特性的判断标准,此判断标准与文献[3]的判断标准一致,本研究选用此标准来判断高斯和非高斯风压。

1.3.3 干扰对风压非高斯特性影响程度的判断标准

为了清晰地描述建筑结构表面风压非高斯特性受干扰的影响程度,定义两个参数 IF 和 Q。IF 为受扰时受扰建筑表面的非高斯测点总数占未受扰时该面的非高斯测点总数,在此以非高斯测点数量的增减来反映非高斯区域的影响程度,如式(8)所示;Q 为受扰建筑表面的非高斯测点数量占该面总测点数量的比例,以百分比的形式表示,如式(9)所示

$$IF = N_i / N_m \quad (8)$$

$$Q = n_i / n_{it} \quad (9)$$

其中: i 表示受扰建筑的各个表面,当 i 取W,E,N,S和T时分别表示受扰建筑的迎风W面、背风E面、侧风N面、侧风S面和顶面;IF为干扰因子,为无量纲量; N_i 为受扰时受扰建筑 i 表面的风压非高斯测点数量; N_m 为未受扰时受扰建筑 i 表面的风压非高斯测点数量; n_i 为受扰建筑 i 表面的风压非高斯测点数; n_{it} 为受扰建筑 i 表面的测点总数。

笔者结合以上两种参数来共同分析,当IF小于、等于或大于1时,表明干扰对受扰建筑表面风压非高斯区域的影响分别呈减小、不变和增大作用。而参数Q越大则表明建筑某一面的风压非高斯区域越大,在围护结构风荷载设计时需要予以关注。本研究重点分析当 $IF > 1$ 时风压非高斯区域较明显的部分。

2 干扰对风压非高斯特性的影响

2.1 干扰对风压非高斯特性的影响程度分析

图 5 为均匀流场下受扰建筑各表面的 Q 和 IF 分布图,其中白色区域为对应参数小于 1 的区域,阴影区域为对应参数大于 1 的区域,阴影部分颜色越深代表对应的参数值越大。通过对图 5 中的 Q 和 IF 分布图中白色区域进行对比发现,除 W 面、E 面和 S 面有较好的对应外,其余两个面(N 面和顶面)的 Q 和 IF 分布图中白色区域有很大差别,这表明仅用参数 IF 来判断干扰状态下超高层建筑表面风压非高斯区的具体情况并不全面;而结合参数 Q 之后不仅能准确判断建筑表面非高斯区域受干扰的影响程度,也能判断其非高斯区域的大小。

由图 5 可知,受扰建筑各面的两个参数云图均在相同位置处达到最大,如图中红色线条标记位置。其中,各面的两个参数最大值及其施扰建筑相应坐标位置汇总于表 1,即当施扰建筑位于表 1 中

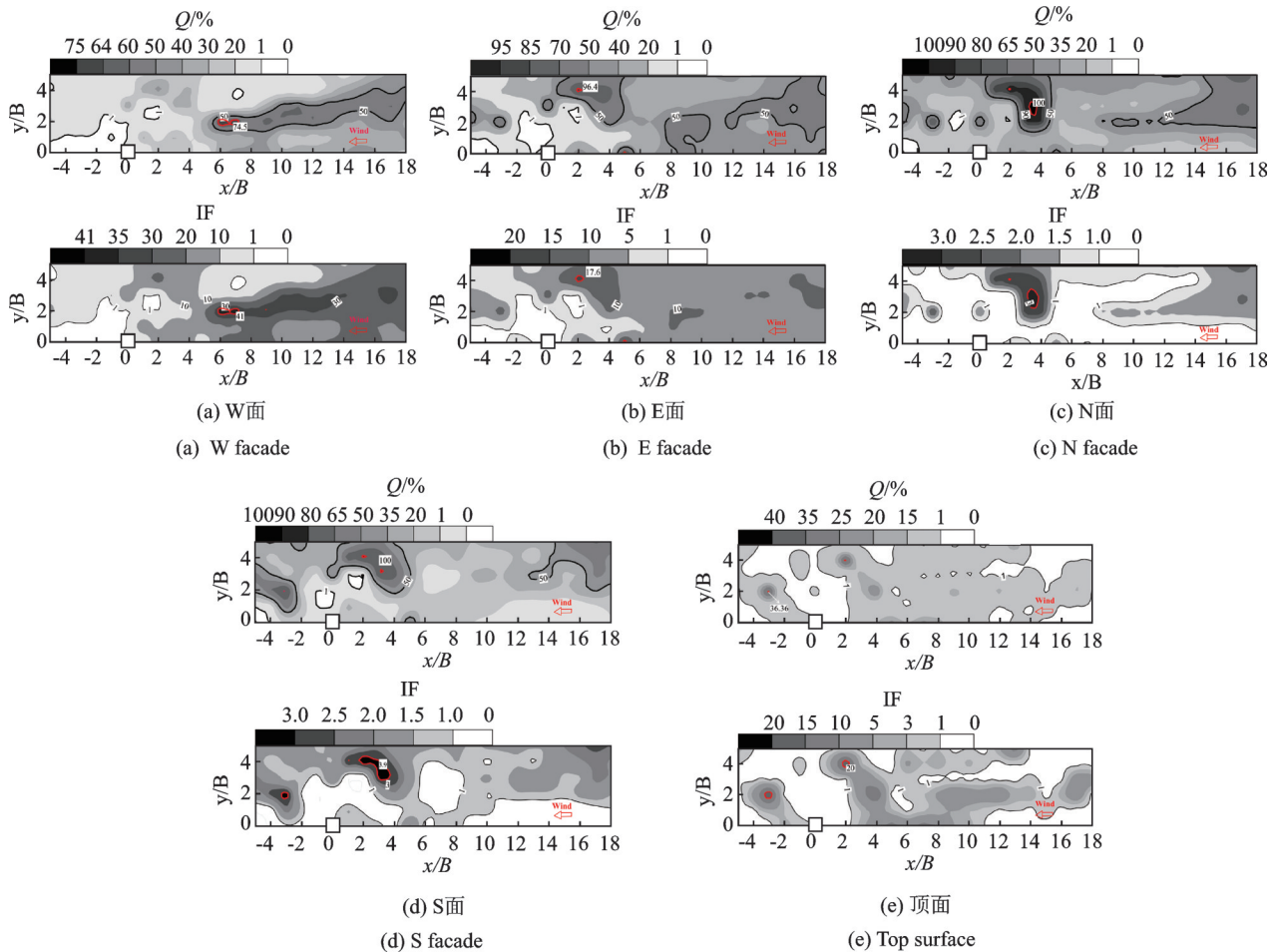


图 5 干扰状态下各表面非高斯区域 Q 和 IF 分布图

Fig.5 Distribution of Q and IF in non-Gaussian regions of each surface under interference state

($x/B, y/B$)位置处时,受扰建筑相应表面的风压非高斯区域和受干扰的程度均达到最大。由此可知,当施扰建筑位于(3,3)和(2,4)位置时,N面和S面的Q均为100%,受扰建筑N面和S面上全为风压非高斯区域,则在此干扰情况下对建筑围护结构设计时,需要考虑风压的非高斯特性。

表 1 超高层建筑各表面风压非高斯特性最明显的位置
Tab.1 The most obvious position of non-Gaussian wind pressure on each surface of the super high-rise building

立面	($x/B, y/B$)	IF	Q/%
W面	(6,2)	41.0	74.50
E面	(5,0)/(2,4)	17.6	96.40
N面	(3,3)/(2,4)	3.0	100.00
S面	(3,3)/(2,4)/(-3,2)	3.9	100.00
顶面	(-3,2)/(2,4)	20.0	36.36

2.2 干扰下脉动风压的非高斯区域划分

为了更加准确地分析施扰建筑位置的改变对受扰建筑各表面风压非高斯区域大小的影响,本节给

出了均匀流场下串列和并列布置时受扰建筑表面风压的非高斯区域划分图,如图6和图7所示。

2.2.1 串列布置时受扰建筑的分区结果

图6中阴影区域为非高斯区域,空白区域为高斯区域。当施扰建筑位于受扰建筑下游 $0\sim 5B$ 间距时,受扰建筑各表面基本上为风压高斯区域,且不随施扰间距的变化而改变,因此图6中均未给出施扰建筑位于受扰建筑下游时受扰建筑各表面的风压非高斯区域划分图。当串列间距为 $-B$ 和 B 时,都存在两个建筑的W面和E面重合现象,所以在此也未给出串列间距为 $-B$ 和 B 时受扰建筑各表面的非高斯区域分布图。

图6(a)为W面的风压非高斯区域分布图,当串列间距为0时(即未受扰时),W面上全为高斯区域;当施扰建筑位于受扰建筑上游时,串列间距位于 $2B\sim 4B$ 时,W面上的风压非高斯区域主要位于底部边缘和上部角部位置;当串列间距位于 $5B\sim 13B$ 时,W面上风压非高斯区域均位于该面的上部区域且呈阶梯型向下增长;当串列间距位于 $14B\sim 16B$ 时,W面上风压非高斯区域达到最大,占该面的

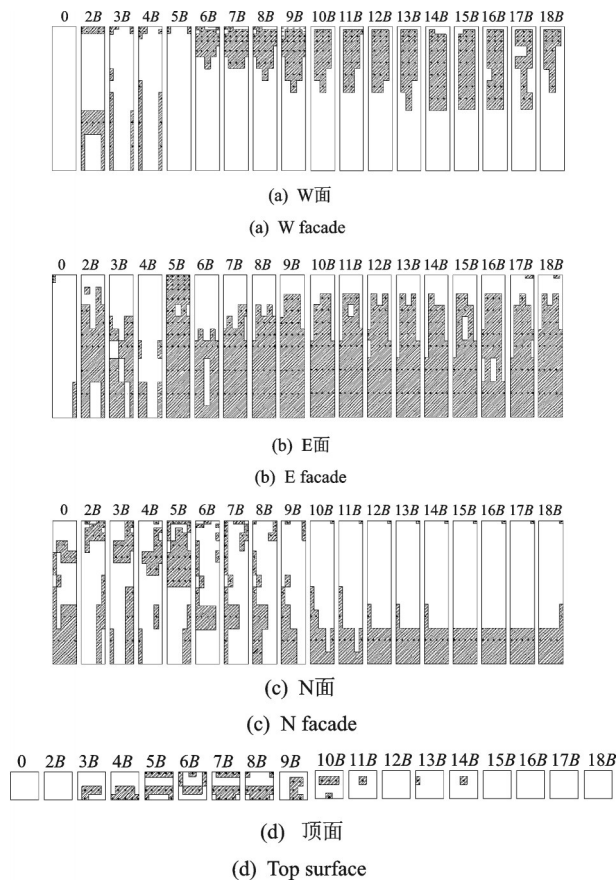


图 6 串列布置下超高层建筑各表面风压非高斯区划分
Fig.6 Non-Gaussian regions division of wind pressure on each surface of super high-rise building under tandem layout

38.14%;当串列间距为 17B 时, W 面上风压非高斯区域开始减小,直到间距为 18B 时,区域面积减小到该面的 19.7%。

图 6(b)为 E 面的风压非高斯区域分布图,当间距为 0 时, E 面的非高斯区域位于斜对角的角部区域;当串列间距位于 2B~4B 时,非高斯区域主要位于该面的中下部且不断减小;在间距为 4B 时减到最小,占该面的 16.9%;当间距为 5B 时非高斯区域最大,占该面的 96.7%;当串列间距位于 6B~9B 时,非高斯区域呈阶梯型向上增大;当串列间距位于 10B~18B 时,非高斯区域基本不随间距的变化而变化,此时非高斯区域最大,占该面的 80.7%。

对侧风面的风压非高斯区域进行分析,由于两侧面结构本身对称,来流条件一样,其风压的非高斯分布基本一致,故以 N 面为例进行分析,如图 6(c)所示。当串列间距为 0 时, N 面的风压非高斯区域主要位于该面的下部以及背风侧边缘;当串列间距位于 2B~4B 时,风压的非高斯区域主要位于迎风侧气流分离区;当间距为 5B 时,风压的非高斯区域主要位于该面的上部;当间距为 6B~9B 时,风

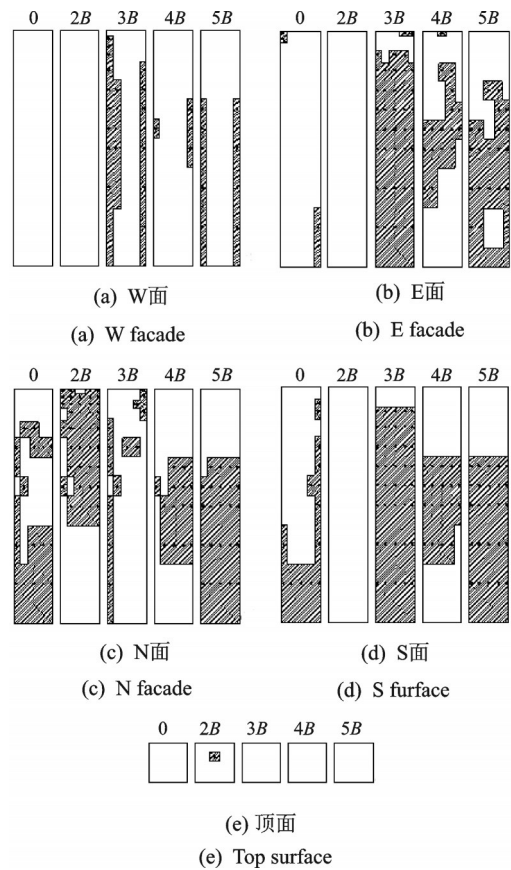


图 7 并列布置下超高层建筑各表面风压非高斯区划分
Fig.7 Non-Gaussian region division of wind pressure on each surface of super high-rise buildings under the parallel layout

压的非高斯区域主要位于该面的背风侧边缘;当间距为 10B~18B 时,风压的非高斯区域主要集中在下部 1/4H 高度内,且非高斯区域基本没有明显变化,区域大小占该面约 25%,其中 H 为模型高度。

图 6(d)为顶面的非高斯区域分布图,当间距位于 0~2B 时,顶面上全为高斯区域;随着串列间距的增加,顶面风压的非高斯区域主要位于迎风侧边缘和背风侧边缘,且非高斯区域大小呈先增加后减小趋势,其中间距在 4B~8B 时,顶面的风压非高斯区域较大;当间距为 15B 时,顶面的脉动风压基本不受施扰建筑影响,全为高斯区域,与未受扰状态一致。

2.2.2 并列布置时受扰建筑的分区结果

并列布置时,受扰建筑 W 面和 E 面的风压非高斯分区如图 7(a,b)所示。随着并列间距的增大, W 面的风压非高斯区域主要位于该面的两侧边缘; E 面在间距为 2B 时全为风压高斯区域;在间距为 3B 时风压的非高斯区域达到最大,占该面的 90.7%。

受扰建筑 N 面和 S 面的风压非高斯分区如图 7(c,d)所示, N 面是离施扰建筑最远的面, S 面是离施扰建筑最近的面,因此两个侧面的风压非高斯区域分布不一致。 N 面的风压非高斯区域随并列间距

的变化比较明显,但无规律可循;S面在2B时全为风压高斯区域,而在间距为3B时该面基本全为风压非高斯区域,且非高斯区域面积占该面的91.7%。由图7(e)可知,受扰建筑顶面风压的非高斯区域基本不随并列间距的变化而变化。

2.3 受扰建筑表面极值风荷载的拟合计算

基于上节受扰建筑表面风压的高斯和非高斯划分区域,对串列和并列布置下受扰建筑围护结构风荷载的取值进行研究。其中,对于风压高斯区域的风荷载值分别采用规范方法^[15]和统计方法进行计算,并取二者中绝对值较大值作为该区域的风荷载值。对于风压非高斯区域的风荷载则用分段多观测法^[12]进行计算,并取其极值作为该区域的风荷载值。最终取受扰建筑表面各区域风荷载极值的极大负值作为设计荷载进行研究。

图8为得到的受扰建筑表面风荷载极大负值随串列间距的变化曲线,从图中可以看出,A类和B类风场下受扰建筑表面风荷载极大负值随串列间距的变化规律基本一致,均随着串列间距的增大呈先减小后增大趋势,其中在x/B为4时,受扰建筑表面风荷载极大负值达到最小,此时A类风场的荷载绝对值比B类风场大23%左右。图9为受扰建筑表面风荷载极大负值随并列间距的变化曲线,可知在A类和B类地貌下受扰建筑风荷载极大负值随并列间距的变化规律基本一致,均随并列间距的增大先减小后增大。采用基于最小二乘法理论的多项式拟合法对串列和并列布置下围护结构风荷载取值进行拟合,考虑到多项式拟合的准确性,笔者选择多项式二次拟合,其中串列和并列布置下的拟合公式为

$$w_k^- = a(x/B)^2 + b(x/B) + c \quad (10)$$

$$w_k^- = a(y/B)^2 + b(y/B) + c \quad (11)$$

其中: w_k^- 为受扰建筑表面风荷载极大负值; x/B 和

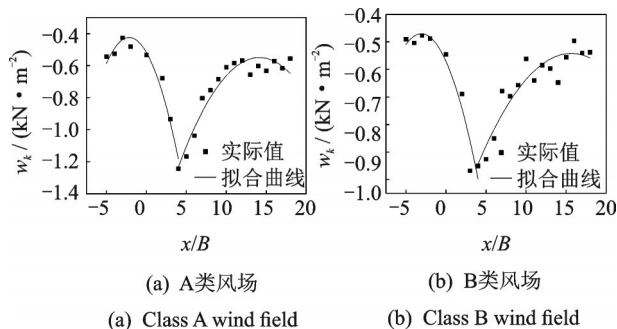


图8 受扰建筑表面风荷载极大负值随串列间距的变化曲线
Fig.8 Variation curve of the maximum negative value of wind load on disturbed building surface as a function of tandem spacing

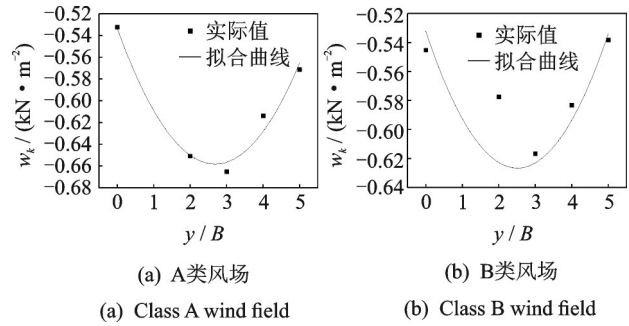


图9 受扰建筑表面风荷载极大负值随并列间距的变化曲线
Fig.9 Variation curve of the maximum negative value of wind load on disturbed building surface with parallel spacing

y/B 分别为施扰建筑与受扰建筑的串列和并列间距; a, b, c 为常数,取值见表2和表3。

表2 串列布置时拟合公式参数选择表

Tab.2 Parameter selection table of fitting formula in tandem arrangement

风场类型	间距范围	a	b	c	最大相对误差/%
A类风场	$-5 \leq x/B \leq 4$	-0.020 05	-0.086 3	-0.516 4	13.4
	$4 \leq x/B \leq 18$	-0.006 64	0.187 8	-1.877 0	16.6
B类风场	$-5 \leq x/B \leq 4$	-0.010 52	-0.064 9	-0.570 1	7.7
	$4 \leq x/B \leq 18$	-0.002 96	0.092 6	-1.267 0	13.3

表3 并列布置时拟合公式参数选择表

Tab.3 Parameter selection table of fitting formula for parallel arrangement

风场类型	间距范围	a	b	c	最大相对误差/%
A类风场	$0 \leq y/B \leq 5$	0.017 3	-0.092 9	-0.533 5	2.3
B类风场	$0 \leq y/B \leq 5$	0.014 9	-0.075 0	-0.532 4	12.7

3 结 论

1) 本研究给出的参数Q和IF能够准确地描述干扰状态下受扰建筑表面风压的非高斯区域大小及其受干扰的影响程度。当施扰建筑位于受扰建筑上游(2B,4B)时,受扰建筑背面、侧面和顶面的风压非高斯特性最明显;当施扰建筑位于(6B,2B)时,受扰建筑迎风面的风压非高斯特性最明显。建议设计人员进行抗风设计时对受扰建筑表面风压非高斯

特性最明显的位置予以关注。

2) 串列布置下,当施扰建筑位于受扰建筑下游时,施扰建筑对受扰建筑各表面风压的非高斯区域没有影响。当施扰建筑位于受扰建筑上游时,随着串列间距的增大,施扰建筑对受扰建筑表面风压非高斯区域产生的位置以及大小均产生不同程度的影响。并列布置下,随着并列间距的增大,受扰建筑迎风面和顶面的风压非高斯区域受施扰建筑影响较小,而背风面和侧面的风压非高斯区域受施扰建筑影响较大。

3) 考虑了受扰建筑表面风压的非高斯特性,并给出串列和并列布置下受扰建筑表面风荷载极大负值随间距变化的拟合公式,结果可为此类结构的抗风设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] HOLMES J D. Wind action on glass and Brown's integral[J]. *Engineering Structures*, 1985, 7(4): 226-230.
- [2] GIOFFRE M, GRIGORIU M, KASPERSKI M, et al. Wind-induced peak bending moments in low-rise building frames[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, 126(8): 879-881.
- [3] GIOFFRE M, GUSELLA V, GRIGORIU M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. I: stochastic field[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2001, 127(9): 981-989.
- [4] 董欣, 赵昕, 丁洁民, 等. 矩形高层建筑表面风压特性研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(10): 116-124.
DONG Xin, ZHAO Xin, DING Jiemin, et al. Wind pressure characteristics on a high-rise building with rectangular section [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(10): 116-124. (in Chinese)
- [5] KUMAR K S, STATHOPOULOS T. Fatigue analysis of roof cladding under simulated wind loading [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 77/78: 171-183.
- [6] 孙瑛, 武岳, 林志兴, 等. 大跨屋盖结构风压脉动的非高斯特性[J]. *土木工程学报*, 2007(4): 1-5, 12.
SUN Ying, WU Yue, LIN Zhixing, et al. Non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on long-span roofs[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007(4): 1-5, 12. (in Chinese)
- [7] 韩宁, 顾明. 方形高层建筑风压脉动非高斯特性分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 971-976.
HAN Ning, GU Ming. Analysis on non-Gaussian features of fluctuating wind pressure on square tall buildings [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(7): 971-976. (in Chinese)
- [8] 楼文娟, 李进晓, 沈国辉, 等. 超高层建筑脉动风压的非高斯特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(4): 671-677.
LOU Wenjuan, LI Jinxiao, SHEN Guohui, et al. Non-Gaussian feature of wind-induced pressure on super-tall building[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(4): 671-677. (in Chinese)
- [9] 叶继红, 侯信真. 大跨屋盖脉动风压的非高斯特性研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(7): 9-15, 232.
YE Jihong, HOU Xinzhen. Non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on long-span roofs[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(7): 9-15, 232. (in Chinese)
- [10] 杜晓庆, 方立文, 张永平, 等. 切角措施对方柱风压非高斯特性的影响机理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(4): 142-150.
DU Xiaoqing, FANG Liwen, ZHANG Yongping, et al. Effect of chamfer modification on mechanisms of non-Gaussian features of wind pressure on square cylinder [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(4): 142-150. (in Chinese)
- [11] 陈伟, 张锋, 施宗城, 等. 汕头跳水游泳馆屋面风载分布的风洞试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001(4): 72-76.
CHEN Wei, ZHANG Feng, SHI Zongcheng, et al. A wind tunnel test study on the distribution of wind loads on the roofs of Shantou natatorium and diving room[J]. *Journal of Building Structures*, 2001(4): 72-76. (in Chinese)
- [12] 全涌, 顾明, 陈斌, 等. 非高斯风压的极值计算方法[J]. *力学学报*, 2010, 42(3): 560-566.
QUAN Yong, GU Ming, CHEN Bin, et al. Study on the extreme value estimating method of non-Gaussian wind pressure [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(3): 560-566. (in Chinese)
- [13] KUMAR S K, STATHOPOULOS T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2000, 126(8): 944-956.
- [14] 刘新, 田玉基. 围护结构非高斯风压时程的峰值因子[J]. *北京交通大学学报*, 2013, 37(4): 128-133.
LIU Xin, TIAN Yuji. Peak factor of the non-Gaussian time history of wind pressure for enclosure structure [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, 37(4): 128-133. (in Chinese)
- [15] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.



第一作者简介:何书勇,男,1995年11月生,博士生。主要研究方向为桥梁风荷载、风致振动与控制。曾发表《防雪栅与路基间距对路基积雪分布影响规律的数值模拟研究》(《振动与冲击》2021年第40卷第6期)等论文。
E-mail:heshuyong789@126.com

通信作者简介:刘庆宽,男,1971年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁风致振动与控制。
E-mail:lqk@stdu.edu.cn