

DOI:10.11918/202312030

大深宽比矩形高层建筑表面脉动风压非高斯特性

袁家辉^{1,2}, 陈水福², 刘奕²

(1. 中冶南方城市建设工程技术有限公司, 武汉 430063; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要: 为探究大深宽比矩形高层建筑表面脉动风压的非高斯特性, 本文对深宽比为 1/9 ~ 9 的矩形高层建筑进行了同步测压风洞试验。基于试验结果, 分析了建筑表面风压的三阶和四阶统计矩分布特性, 对高层建筑各立面风压进行高斯与非高斯分布的分区; 研究了风压的空间相关系数与非高斯性强度的关系, 提出了一种新的估算建筑侧面平均再附长度的计算方法。结果表明: 在建筑侧风面上, 脉动风压服从高斯还是非高斯分布取决于测点到迎风前缘的距离; 除了以往文献指出的迎风面角部、侧风面分离区和背风面风压呈现非高斯性外, 再附区后面的风压也呈现出高度的非高斯性; 本文提出的相关系数法在计算平均再附长度时具有良好的准确性, 利用该方法获得了矩形高层建筑侧风面的平均再附长度沿高度的变化呈抛物线形状。

关键词: 矩形高层建筑; 非高斯特性; 风洞试验; 相关系数; 平均再附长度

中图分类号: TU973.213

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)01-0046-10

Non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on rectangular tall buildings with large side ratio

YUAN Jiahui^{1,2}, CHEN Shuifu², LIU Yi²

(1. WISDRI City Construction Engineering & Research Incorporation Ltd., Wuhan 430063, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To investigate the non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on rectangular high-rise buildings with large side ratios, wind tunnel tests were conducted on scale models with side ratios ranging from 1/9 to 9. Based on the results, the third and fourth statistical moments of wind pressures on building surface were analyzed. Zones of Gaussian and non-Gaussian were classified for rectangular buildings with various side ratios. The relationship between spatial correlation coefficient of wind pressure and non-Gaussian intensity was studied and a new method for estimating the mean reattachment length at building side wall was proposed by evaluating the correlation coefficient of wind pressure. The results show that on the side wall, the non-Gaussian wind pressures are related to the distance from the leading edge. Apart from the non-Gaussianity in the corner of windward wall, separated flow regions of side wall and leeward wall noted by some literature, wind pressures behind the area where reattachment happens present non-Gaussian nature as well. The correlation coefficient method proposed in this paper has good accuracy in calculating the mean reattachment length, and the mean reattachment length calculated by the correlation coefficient method along the height changes in a parabolic shape.

Keywords: rectangular high-rise building; non-Gaussian feature; wind tunnel test; correlation coefficient; mean reattachment length

在工程实践中, 建筑结构表面的脉动风压通常被认为近似服从于高斯分布。但是近些年的相关试验研究表明, 高斯模型并不能准确地描述建筑结构所有位置的脉动风压。Stathopoulos^[1]和 Kumar 等^[2]发现, 低矮建筑屋面的角落和流动分离区的脉动风压呈现高度的非高斯特性。更为严重的是, Kumar 等^[2]的研究表明, 相较于高斯类型的风荷载,

非高斯类型的风荷载有更大的概率引起结构的疲劳损伤。

国内外学者对各种建筑结构上的非高斯脉动风压特性做过一些研究。Ko 等^[3]对方形截面高层建筑进行了风洞试验研究。试验结果表明, 由于风压的非高斯特性, 侧风面受到的吸力会大于预测值。Gioffre 等^[4]对深宽比为 1/1.5 和 1.5 的矩形截面高

收稿日期: 2023-12-12; 录用日期: 2024-01-02; 网络首发日期: 2024-04-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240408.1349.006>

基金项目: 国家自然科学基金(51878607)

作者简介: 袁家辉(1996—), 男, 博士, 工程师; 陈水福(1967—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈水福, csf@zju.edu.cn

层建筑进行了风洞试验研究,发现分离区的气流呈现高度的非高斯性。楼文娟等^[5]对带切角的菱形超高层建筑进行风洞试验,发现建筑侧面的前缘气流分离区、背风面以及迎风面切角区域的脉动风压存在显著的非高斯特性。韩宁等^[6]通过风洞测压试验对方形高层建筑脉动风压非高斯特性进行了研究,发现受分离流和尾流综合作用的立面均为负偏且峰值值相对较大,其主要以非高斯区域为主。庄翔等^[7]对深宽比约为 1/3 和 3 的矩形高层建筑进行风洞测压试验,分析了长边迎风和短边迎风时的表面风压的非高斯特性。结果表明:在迎风面,非高斯区主要位于迎风边缘及角部;在侧风面,长边迎风时,非高斯区主要集中在迎风前缘附近;短边迎风时,非高斯区位于靠近背风边缘的旋涡再附区。杜晓庆等^[8-9]采用大涡模拟方法,研究了标准方柱和切角方柱表面风压非高斯特性。方柱表面风压非高斯分布区域主要集中在方柱侧面后角部位和方柱背风面,切角处理可明显减小方柱后角部位和背风面的风压非高斯区域。

以往的研究通过风洞试验和数值模拟方法发现高层建筑的迎风面角部、侧风面分离区和背风面部分区域风压呈现非高斯特性。然而这些研究对象都是特殊体型和小深宽比的高层建筑。随着城市空间的日益紧张,大深宽比的板式高层建筑已成为一种常见的住宅建筑形式^[10]。图 1 所示为典型板式高层住宅小区,这种高层住宅的截面形式近似为矩形,高度一般为百米左右,短边尺寸为十几米左右,长边尺寸从二十几米到近百米不等。这种大深宽比矩形高层建筑表面脉动风压的非高斯特性还不清楚。



图 1 典型板式高层住宅小区

Fig. 1 A typical slab-type high-rise residential area

为探究这类大深宽比矩形高层建筑表面风压的非高斯特性,本文对深宽比为 1/9 ~ 9 的矩形高层建筑进行了同步测压风洞试验。基于试验结果,分析了系列建筑表面风压的三阶和四阶统计矩分布特性,对高层建筑各立面风压进行高斯与非高斯分布的分区;研究了风压的空间相关系数与非高斯性强

度的关系,提出了一种新的估算建筑侧风面平均再附长度的计算方法。

1 风洞试验

1.1 风场设置

本次风洞试验在加拿大西安大略大学边界层风洞 II 的高速试验段中进行。试验段宽 3.4 m,高 2.1 m,长 30 m,最大风速可达 30 m/s。试验按照工程科学数据库(engineering sciences data unit)模拟了开阔地貌的风场。平均风速剖面按照 ESDU-85020^[11]推荐的公式模拟:

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{10}} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)} + \frac{86.25f_c z}{\bar{U}_{10}} \quad (1)$$

式中: \bar{U}_{10} 为 10 m 高度处的平均风速, z 为所在高度, z_0 为地表粗糙长度, f_c 为科里奥利力。

湍流强度剖面理论值按照 ESDU-82026^[12]推荐的公式模拟:

$$I_{uz} = \frac{7.5\eta u [0.538 + 0.09\ln(z/z_0)]^p}{[1 + 0.156\ln(u/f_c z_0)] \bar{U}_z} \quad (2)$$

式中: u 为摩擦速度, η, p 为拟合参数。

图 2 为风场的平均风速和湍流度剖面,模型顶部 0.5 m 高度处参考风速为 8.86 m/s。可见理论值和试验值基本吻合。图 2 同时还给出了 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[13]中 A 类地貌的风速剖面,可见工程科学数据库的开阔地貌与《建筑结构荷载规范》的 A 类地貌剖面基本相同。

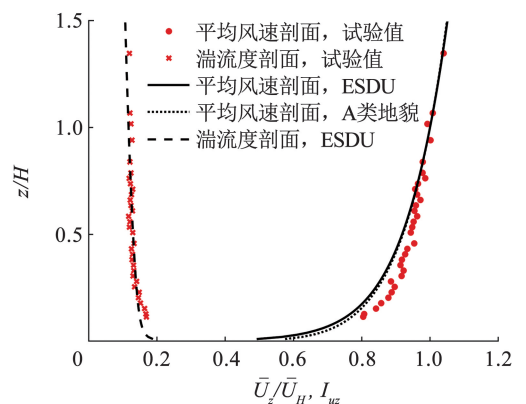


图 2 平均风速剖面 and 湍流度剖面

Fig. 2 Mean velocity and turbulence intensity profiles

脉动风速谱模拟采用 ESDU-74031^[14]建议的 von-Karman 谱模拟:

$$\frac{f S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4f_u}{(1 + 70.8f_u^2)^{5/6}}, f_u = \frac{fL_u}{\bar{U}_z} \quad (3)$$

式中: f 为频率, S_{uu} 为脉动风速功率谱密度, σ_u 为脉动风速标准差。

图 3 给出了本次试验在 $z=0.762H$ 处的脉动风速谱试验值和理论值,可见二者吻合良好。

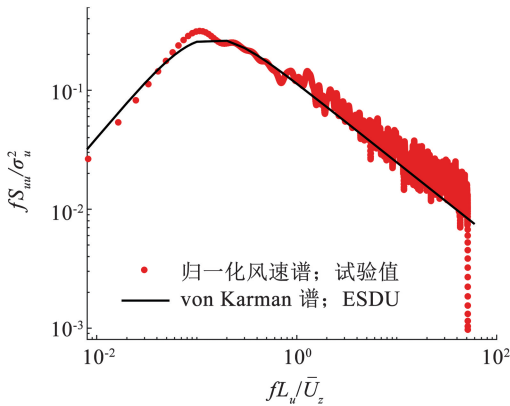


图 3 $z=0.762H$ 高度处脉动风速谱

Fig. 3 Fluctuating velocity spectrum at $z=0.762H$

1.2 试验模型

为便于后续分析,按照风工程的惯用方法,定义

模型的深宽比为 D/B ,其中 B 为迎风面宽度, D 为侧迎风面深度。短边迎风时深宽比大于等于 1,长边迎风时深宽比小于等于 1。试验采用节段模型,共有 12 段。其中 1~6 段的深宽比为 0.5,7~12 段的深宽比为 1.0(如图 4 所示风向)。本次试验共组装了 21 种深宽比的矩形高层建筑模型,深宽比分别为 1/9、1/8、1/7、1/6、1/5、1/4、1/3、1/2、1.5、1、1.5、2、2.5、3、4、5、6、7、8 和 9。拼接完成的模型高 0.5 m、宽 0.06 m、长 0.06~0.54 m,几何缩尺比为 1:200。模型沿高度方向布置了 7 个测点层,分别位于 $0.1H$ 、 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.65H$ 、 $0.8H$ 、 $0.9H$ 和 $0.98H$ 高度处,各测点层的布置方式相同。本次试验 0° 风向是短边迎风方向, 90° 风向是长边迎风方向。针对每种深宽比工况进行了测压试验,试验的压力参考点在模型顶部高度,获得了各测点的风压系数时程。图 4 给出了节段模型和测点平面布置图,图 5 给出了风洞试验过程照片。

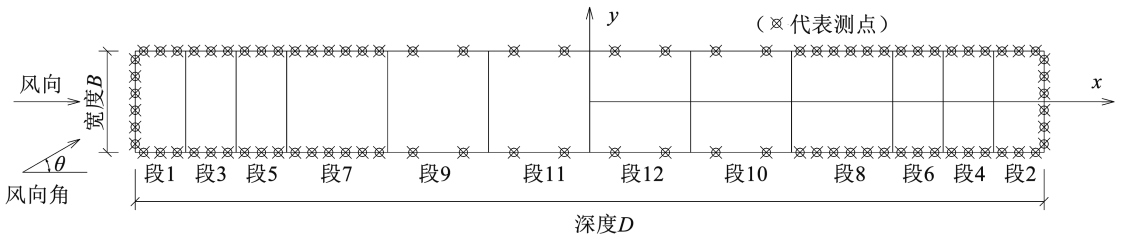


图 4 节段模型和测点平面布置

Fig. 4 Segment models and layout of pressure taps



图 5 风洞试验过程照片

Fig. 5 Wind tunnel test photos

2 非高斯风压分布

2.1 峰度和偏度系数

对于高斯信号,1 阶和 2 阶统计矩就可以完全描述其随机特性;但对于非高斯信号,除前 2 阶统计矩外,3 阶统计矩偏度和 4 阶统计矩峰度仍是重要参数。对于测点的风压系数时程 $C_p(t)$,偏度系数 c_{sk} 和峰度系数 c_{ku} 按照下式计算:

$$\begin{cases} c_{sk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{C_p(t_i) - C_{p,mean}}{C_{p,std}} \right]^3 \\ c_{ku} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{C_p(t_i) - C_{p,mean}}{C_{p,std}} \right]^4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为采样数, t_i 为第 i 次采样时间, $C_{p,mean}$ 为测点的风压系数时程均值, $C_{p,std}$ 为测点的风压系数时程标准差。偏度系数反映概率密度曲线的对称性,偏度系数小于 0 时,概率密度曲线相对于中轴会左偏;偏度系数大于 0 时,概率密度曲线相对于中轴会右偏。峰度系数反映概率密度曲线的尖锐程度,峰度系数大于 3 时,概率密度曲线比高斯分布尖锐;峰度系数小于 3 时,概率密度曲线比高斯分布平坦。从理论上说,高斯信号的偏度系数等于 0,峰度系数等于 3。

为了接下来能更清晰地描述测点在建筑上的位置,图 6 给出了测点位置三维示意图。在侧风面上,测点到迎风前缘的距离记为 d 。

图 7~9 给出了不同深宽比建筑迎风面、侧风面和背风面脉动风压偏度和峰度系数分布。图 7~9 以深宽比为 1/8、1/5、1/3、1/2、1、2、3、5 和 8 的建筑为例进行绘制。图 7~9 中网格代表测点的控制范围,颜色越红代表偏度和峰度系数值越大,颜色越蓝代表偏度和峰度系数值越小。

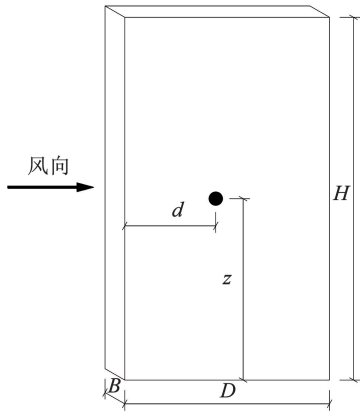


图 6 测点位置三维示意

Fig. 6 Three-dimensional schematic diagram of pressure tap

图 7 表明,对于选定的所有深宽比建筑,迎风面上的偏度和峰度系数分布是相似的。偏度系数大致从下到上,从中间到两侧减小,特别是当 $D/B > 1$ 时。最大偏度系数为 0.64,位于 $D/B = 1/8$ 建筑 $0.1H$ 高、 $1.5B$ 宽(从左至右)的位置。峰度系数从下到上大致减小,从中间到两侧增加,特别是对于大深宽比建筑。最大峰度系数为 4.03,位于 $D/B = 1/5$ 建筑 $0.3H$ 高、 $3.92B$ 宽的位置。除少数测点的脉动风压外,偏度和峰度系数基本小于 0.5 和 3.5,接近正态分布。总的来说,迎风面上的脉动风压可以用高斯模型来描述。

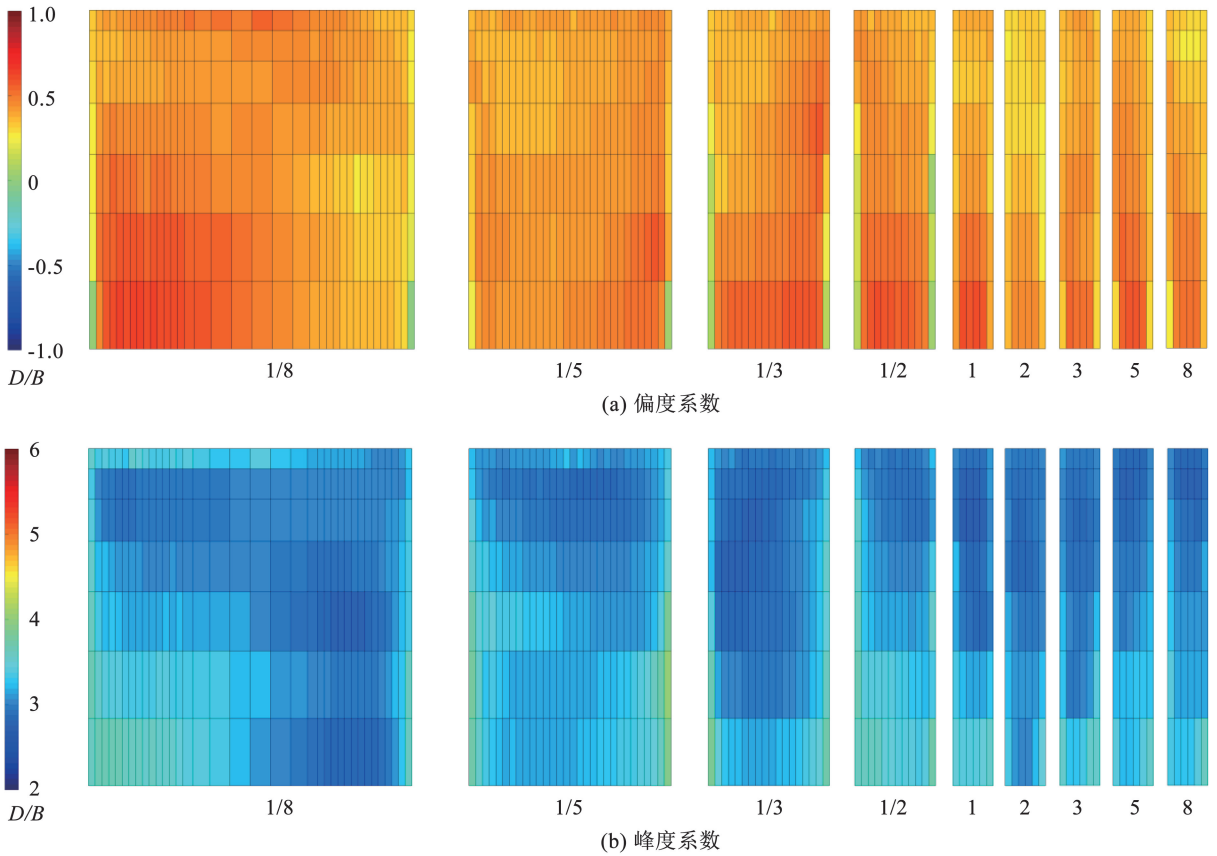


图 7 不同深宽比建筑迎风面脉动风压偏度和峰度系数分布

Fig. 7 Skewness and kurtosis coefficient distributions on the windward walls

如图 8 所示,对于不同深宽比建筑,侧风面的偏度和峰度系数的分布是不同的。对于 $D/B \leq 1$ 的建筑,所有位置的偏度系数都小于 -0.5 ,这意味着概率密度分布函数左偏。除少数测点外,峰度系数均大于 3.5。对于 $D/B > 1$ 的建筑,迎风前缘附近的偏度和峰度系数分布比较接近。在分离区所在的 $0 \sim 0.5B$ 范围内,脉动风压呈非高斯分布。在分离区和再附点之间存在一个从上往下发展的弧形区域,在这个区域内脉动风压的偏度和峰度系数接近高斯分布。对此的一种可能解释是,在建筑前缘的

分离流和再附后形成的回流在弧形区域上方相遇,相反方向的气流相互抵消,使得弧形区域内的流场较为稳定。在 $z/H = 0.5$ 高度处,弧形区域的后缘距侧风面前缘约 $2.5B$,这是矩形高层建筑侧风面平均再附点的大致位置^[15]。这表明弧形区域的后缘边界是气流再附的位置。在弧形区域之后,除了右下角的小部分区域外,脉动风压的偏度和峰度系数再次呈现非高斯特征。这是因为再附后的剪切层是不稳定的,会在侧风面上形成滚动的涡流,导致脉动风压呈现非高斯特征。根据以上现象可以得出:在侧

风面上,脉动风压服从高斯还是非高斯分布取决于测点到迎风前缘的距离 d 。在 $z/H = 0.5$ 高度处,对于 $d/B \leq 0.5$ 范围内,脉动风压是非高斯的;对于

$0.5 < d/B < 2.5$ 范围内,脉动风压为高斯分布;对于 $d/B \geq 2.5$,脉动风压是非高斯的。

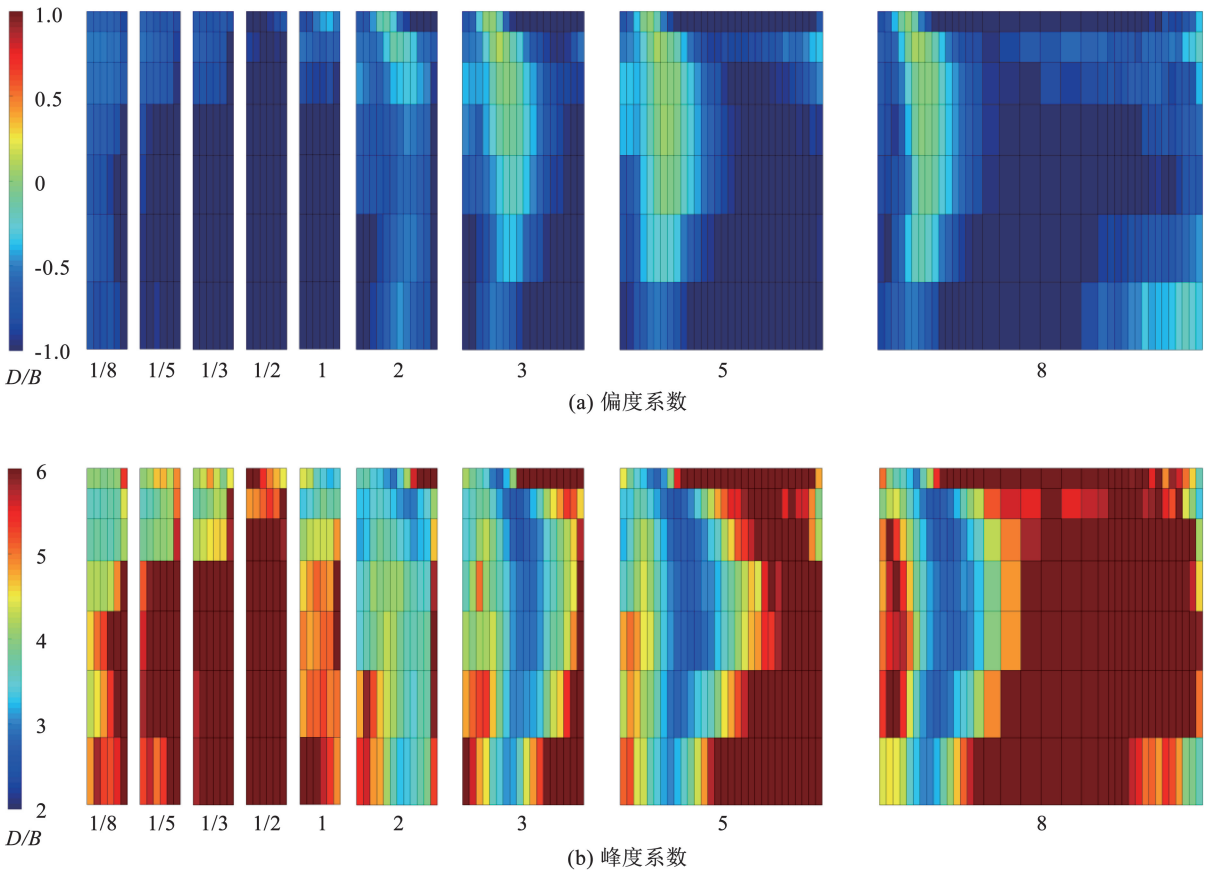


图 8 不同深宽比建筑侧风面脉动风压偏度和峰度系数分布
Fig. 8 Skewness and kurtosis coefficient distributions on the side walls

从图 9 可以看到,除少数区域外,背风面的脉动风压具有较高的偏度和峰度。对于小深宽比建筑,高斯类型的脉动风压出现在背风面的中心和底部,而对于大深宽比建筑,高斯类型的脉动风压出现在背风面的顶部和底部。在背风面上,非高斯类型的脉动风压可能与上游拐点分离的自由剪切层有关。自由剪切层是不稳定的,最终会在建筑后缘形成离散的旋涡。在旋涡形成期间,建筑后面尾流区域的空气会被夹卷^[16]。这种持续的夹卷过程导致背风面大部分位置的脉动风压呈现非高斯特征。

2.2 高斯和非高斯区划分

确定建筑表面的高斯区和非高斯区对峰值因子的计算和围护结构设计非常重要。不同学者对非高斯和高斯风压的判定略有一些差别,但是这些方法也基本都是从单次试验中总结出来的,并没有内在理论。Kumar 等^[17]最早针对低矮建筑屋面提出了划分方法,且一直被广大学者参考^[4-5,7]。具体划分标准:

$$|c_{sk}| > 0.5, c_{ku} > 3.5 \quad (5)$$

针对不同深宽比的矩形高层建筑各表面,将试验获得的风压数据按式(5)进行高斯区和非高斯区的划分。图 10 划分了正交风向下深宽比为 1/8、1/5、1/3、1/2、1、2、3、5 和 8 的矩形高层建筑迎风面、侧风面和背风面的高斯区和非高斯区,图 10 中白框表示高斯区域(图中 G),灰框表示非高斯区域(图中 NG)。

从图 10 可以看出,准定常理论可以适用的迎风面几乎完全是高斯区,迎风面上少量非高斯区的偏度系数大约在 0.56 到 0.63 之间,峰度系数大约在 3.52 到 3.67 之间。这种微小的误差可以解释为试验的不确定性和统计偏差。对于 $D/B \leq 1$ 的建筑,侧风面基本完全是非高斯区。而对于 $D/B > 1$ 的建筑,由于气流分离、再附和滚动的涡流,侧风面既有高斯区也有非高斯区。由于侧风面的涡流在尾缘脱落,背风面大部分区域为非高斯区。

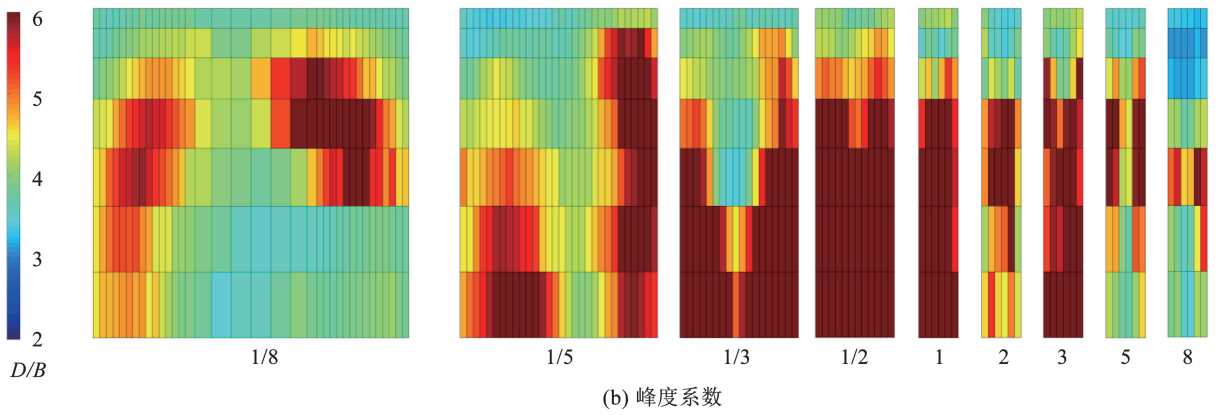
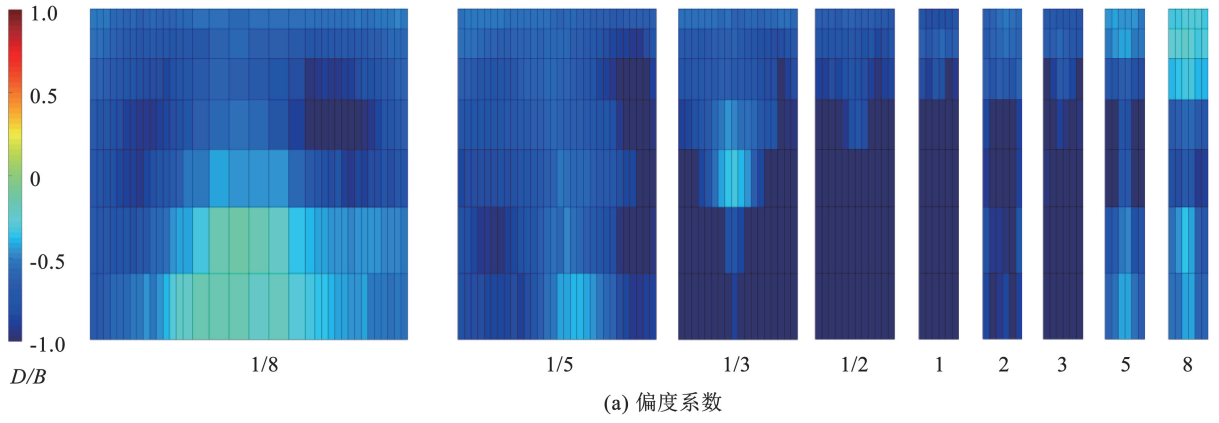
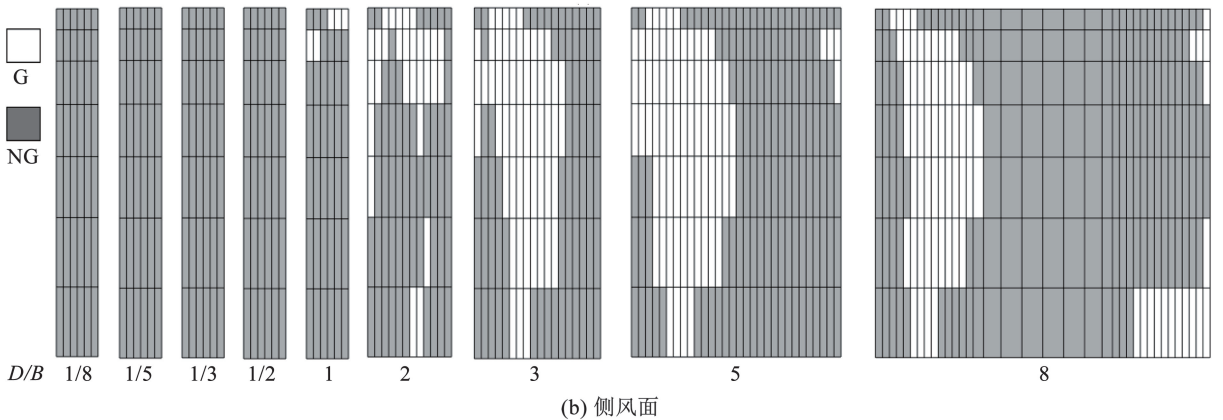
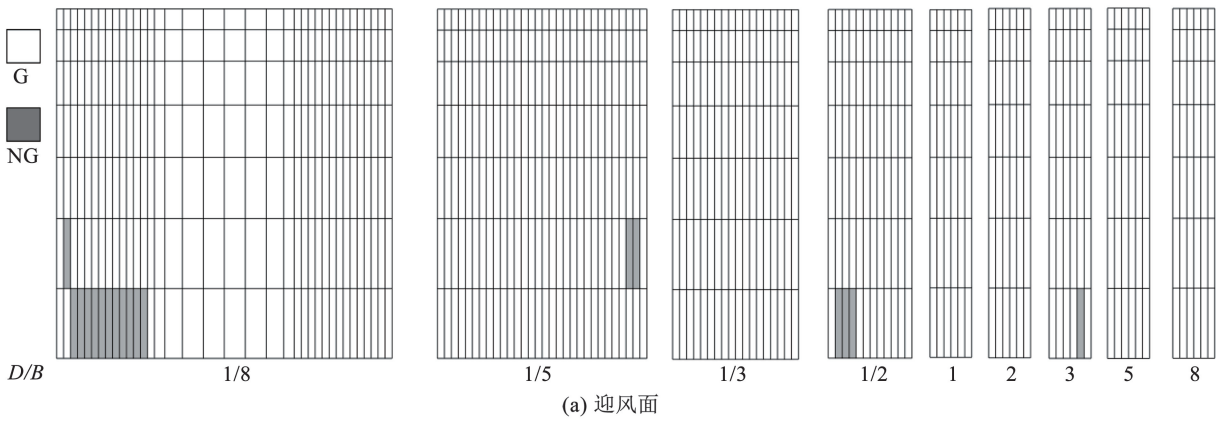


图 9 不同深宽比建筑背风面脉动风压偏度和峰度系数分布

Fig. 9 Skewness and kurtosis coefficient distributions on the leeward walls



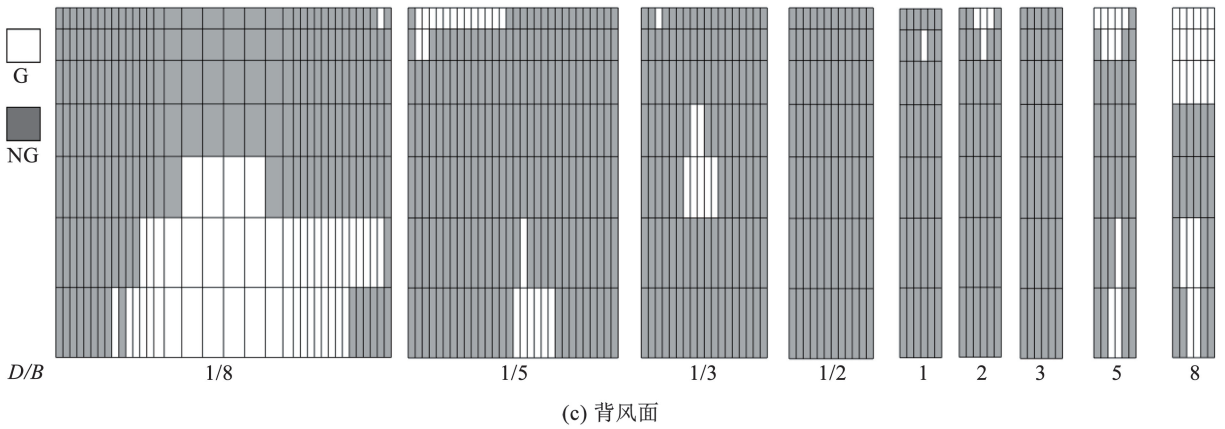


图 10 不同深宽比建筑高斯区和非高斯区分布

Fig. 10 Gaussian and Non-Gaussian zones for buildings with different side ratios

3 再附长度的计算

上一节指出,对于 $D/B \geq 3$ 的建筑,分离区和再附点之间的位置风压呈现非高斯性、再附点后面的风压呈现高度非高斯特性。再附点三维位置是确定大深宽比建筑的高斯风压和非高斯风压分区的重要定量指标。目前计算平均再附长度的方式主要有两种,第一种是 PIV 流场可视化试验^[18-19];第二种是通过计算分离泡再附点处的折减风压系数,从而间接判断平均再附长度^[20-21]。PIV 试验操作非常复杂,且成本高昂;折减风压系数方法主要应用于大跨度屋盖结构,但是分离泡再附点处的折减风压系数会受到建筑高宽比的影响^[21],不同模型再附点处的折减风压系数存在一定的差异,折减风压系数法在计算高层建筑平均再附长度时会产生误差。为了给出适用于矩形高层建筑平均再附长度的简易计算方法,本文通过研究相关系数和再附点位置的关系,给出再附点长度的理论计算公式。

3.1 相关系数法

中心极限定理表明,在适当的条件下,即使原随

机变量不是正态分布,大量相互独立的随机变量的均值经适当标准化后,其分布收敛于标准正态分布^[22]。点涡模型认为,空间中存在大量多维旋涡。每个旋涡在运动过程中都将其能量从其中心转移到周围环境,并在遇到壁面时产生压力。建筑表面上的风压可以看作是许多点涡作用的总和,如果旋涡是独立的,则风压服从高斯分布;相反,如果旋涡具有相关性,则风压不服从高斯分布。相关系数是用来确定不同位置风压的空间相关性,反映流场结构的主要指标。测点 i 和测点 j 处的风压相关系数由下式给出:

$$\rho_{ij} = \frac{E[(C_{pi} - C_{pi,mean})(C_{pj} - C_{pj,mean})]}{C_{pi,std} \cdot C_{pj,std}} \quad (6)$$

式中: $C_{pi,mean}$ 为测点 i 的风压系数时程均值, $C_{pi,std}$ 为测点 i 的风压系数时程标准差。

图 11 给出了 $D/B = 8$ 的建筑侧风面风压的水平相关系数,其中 d 为到建筑前缘的距离。由于相关系数的值容易受到测点间距的影响,图 11(a) 以建筑前缘的第 1 个测点的风压为参考,图 11(b) 以建筑后缘的第 1 个测点的风压为参考。

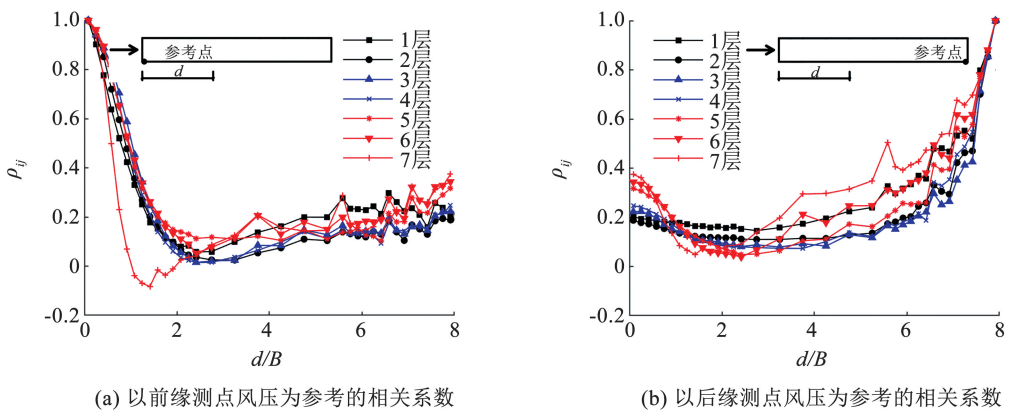


图 11 $D/B = 8$ 的建筑侧风面风压的水平相关系数

Fig. 11 The horizontal correlation coefficients of wind pressures on the side wall with $D/B = 8$

在图 11 中,所有曲线显示出大致相同的趋势,这表明不同高度处流场的结构是相似的。相关系数的峰值在参考点处,然后不断下降,直到在 $d = 1.42B \sim 2.42B$ 处达到最小值,达到最小值后又缓慢增加。在图 11 中值得关注的是,无论参考点在什么位置,相关系数大约在气流再附点的位置处达到最小值。对于高度在 $0.5H$ 的第 3 测点层而言,相关系数在 $d = 2.42B$ 处达到最小值,这与偏度和峰度分析的结果是相互吻合的。

以建筑前缘上的第 1 个测点风压为参考,风压的相关系数可视为和建筑前缘距离的函数。侧风面上的平均再附长度可以用相关系数取最小值的测点位置与建筑前缘之间的距离来估计,本文给出其计算式:

$$\rho = f(d), X_r = f^{-1}(\min(\rho)) \quad (7)$$

式中: ρ 为以建筑前缘第 1 个测点风压为参考的风压相关系数, d 为到建筑前缘的距离, X_r 为平均再附长度。一般认为建筑深宽比大于 3 时会稳定地发生再附^[23-24]。因此该方法适用于估计 $D/B \geq 3$ 的矩形高层建筑侧风面上再附点的位置。由于平均再附长度是通过相关系数来估算的,本文将该方法称为相关系数法。

3.2 矩形建筑周围三维绕流

Akon 等^[21] 基于低矮建筑屋面的风压和风速场测量以及均匀流动中二维矩形棱柱的研究结果,提出了一种利用平均风压分布来估计平均再附长度的数学模型。Akon 等^[21] 发现,在再附点位置,

Roshko^[25] 提出的折减风压系数随湍流强度变化。折减风压系数表达式:

$$C_p^* = \frac{\bar{C}_p - \bar{C}_{p,\min}}{1 - \bar{C}_{p,\min}} \quad (8)$$

式中: \bar{C}_p 为平均风压系数, $\bar{C}_{p,\min}$ 为分离泡下壁面上最小的平均风压系数。Akon 等^[21] 给出的再附点位置处的折减风压系数 C_{p,X_r}^* 随湍流强度变化的函数如下所示:

$$C_{p,X_r}^* = -0.463I_u + 0.334 \quad (9)$$

式中 I_u 为来流的湍流强度。

图 12 给出了分别采用 Akon-Kopp 方法^[21] 和相关系数法估计 $D/B \geq 3$ 的矩形高层建筑侧风面平均再附长度。由图 12 可见,无论采用哪种方法估计的平均再附长度,其随高度的变化形式是相似的。对于 $D/B \geq 3$ 的建筑,平均再附长度随高度以抛物线形状变化。最大平均再附长度大约是 $2.5B$,出现在建筑中间高度;最小平均再附长度大约是 $1.3B$,出现在建筑物的顶部。对于不同深宽比建筑,相关系数法估计的平均再附长度的离散性大于 Akon-Kopp 方法。对此的一种可能解释是侧风面上的测点数量不够密集。另外,用相关系数法估计的建筑物顶部和底部高度的平均再附长度大于 Akon-Kopp 方法估计的再附长度。这种差异可归因于 Akon-Kopp 方法是基于低矮建筑屋面试验的风压和风速场推导出来的。这对于矩形高层建筑平均再附长度计算的适应性可能较差。

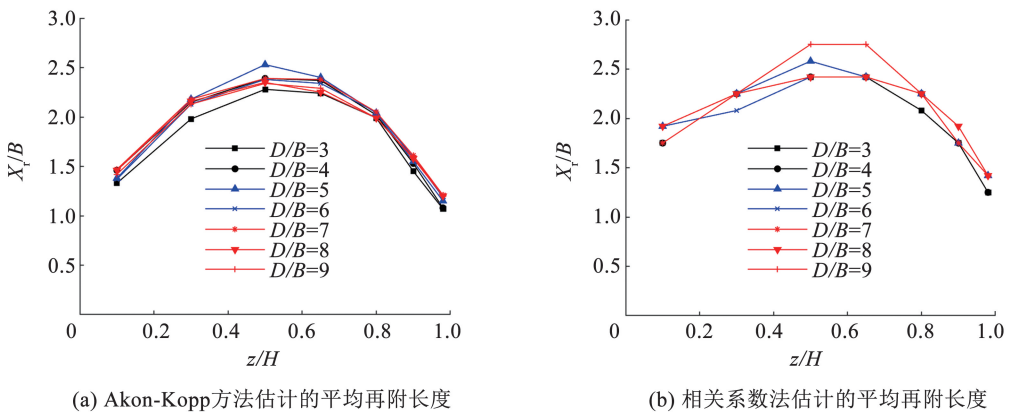


图 12 $D/B \geq 3$ 的矩形高层建筑侧风面平均再附长度

Fig. 12 The mean reattachment lengths on the side walls with $D/B \geq 3$

为了更好地描述矩形高层建筑侧风面流场的空间结构,本文采用多项式拟合平均再附长度随高度的变化关系,具体方程由下式给出:

$$X_r/B = p_1 \left(\frac{z}{H}\right)^2 + p_2 \left(\frac{z}{H}\right) + p_3 \quad (10)$$

式中: B 为建筑迎风面投影宽度, z 为气流所在高度,

H 为建筑总高度, p_1, p_2, p_3 是拟合参数。参数的拟合结果分别为 $-4.78, 4.81$ 和 1.32 。式(10)可以用于描述 $D/B \geq 3$ 的矩形高层建筑侧风面的平均再附随高度的变化关系,图 13 给出了 $D/B \geq 3$ 的建筑平均再附长度随高度变化拟合曲线。

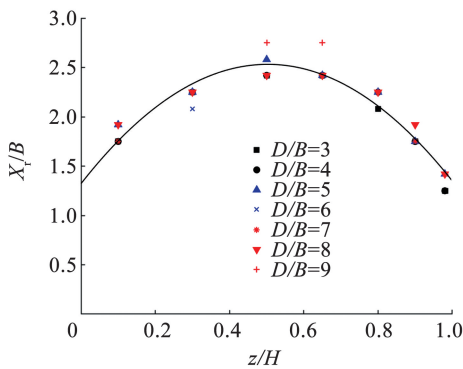


图 13 $D/B \geq 3$ 建筑的平均再附长度随高度变化拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of the mean reattachment lengths with height for buildings with $D/B \geq 3$

相关系数法分析得出的结果与偏度和峰度系数分析得出的结果是一致的,由以上结果可以给出 $D/B \geq 3$ 的建筑侧风面气流分离与再附示意图,见图 14。气流在迎风前缘分离后,在侧风面再附时沿高度的变化呈抛物线形状。

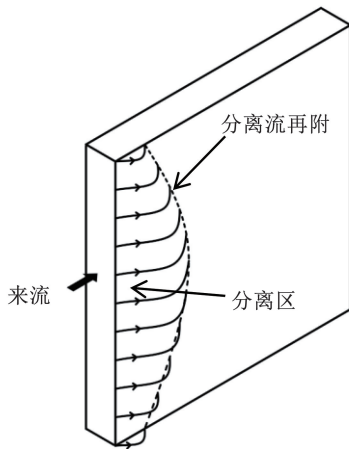


图 14 $D/B \geq 3$ 的建筑侧风面气流分离与再附示意

Fig. 14 The sketch of separation and reattachment on the side wall with $D/B \geq 3$

4 结 论

本文以深宽比为 $1/9 \sim 9$ 的建筑表面风压数据为对象,分析和讨论了风压的高阶统计矩特性,划分了不同深宽比矩形高层建筑的高斯区和非高斯区;基于风压空间相关性分析,提出了一种新的估算建筑侧风面平均再附长度的计算方法。得出以下结论:

1) 高斯模型不能准确地描述建筑表面不同位置的风压特性。除了侧风面前缘分离区和背风面外,再附区后方的风压也表现出非高斯性。

2) 在侧风面上,风压呈现高斯还是非高斯性取决于到建筑前缘的距离。在分离和再附区之间的弧形区域内,风压基本呈现高斯特性;在弧形区域之外,风压大都呈现非高斯特性。

3) 以建筑前缘或者后缘测点风压为参考点,风压的相关系数在再附点附近达到最小值。利用相关系数法获得了矩形高层建筑侧风面的平均再附长度沿高度的变化呈抛物线形状。

参考文献

- [1] STATHOPOULOS T. PDF of wind pressures on low-rise buildings [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1980, 106 (5): 973. DOI: 10.1061/JSDEAG.0005443
- [2] KUMAR K S, STATHOPOULOS T. Non-Gaussian wind pressure fluctuations on roofs [C]// Proceedings of 12th Engineering Mechanics Conference. San Diego: [s. n.], 1998: 1423
- [3] KO N H, YOU K P, KIM Y M. The effect of non-Gaussian local wind pressures on a side face of a square building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(5): 383. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.03.001
- [4] GIOFFRE M, GUSELLA V, GRIGORIU M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. I: stochastic field [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127 (9): 981. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:9(981)
- [5] 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
LOU Wenjuan, LI Xiaojin, 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. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2012.04.017
- [6] 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
HAN Ning, GU Ming. Analysis on non-Gaussian features of fluctuating wind pressures on square tall buildings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(7): 971. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.002
- [7] 庄翔, 董欣, 丁洁民, 等. 矩形高层建筑表面风压脉动的非高斯特性研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 13
ZHUANG Xiang, DONG Xin, DING Jiemin, et al. Non-Gaussian features of wind pressure fluctuations on a rectangular high-rise building [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 13. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.S1.002
- [8] 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
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. DOI: 10.11918/201912146
- [9] 杜晓庆, 靳晓雨, 许汉林, 等. 均匀来流下方柱表面风压非高斯特性的流场机理 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 191
DU Xiaoqing, JIN Xiaoyu, XU Hanlin, et al. Uniform flow mechanism of non-Gaussian features of pressure on square cylinder [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(2): 191. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19176
- [10] 刘奕. 板式高层建筑风荷载研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019
LIU Yi. Wind loads on slab-type high-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019

- [11] Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere): ESDU-85020[S]. London: Engineering Sciences Data Unit, 1985
- [12] Strong winds in the atmospheric boundary layer. Part I: hourly-mean wind speeds: ESDU-82026 [S]. London: Engineering Sciences Data Unit, 1982
- [13] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012
- [14] Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere): ESDU-74031[S]. London: Engineering Sciences Data Unit, 1974
- [15] LIU Yi, KOPP G A, CHEN Shuifu. Effects of plan dimensions on gust wind loads for high-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 194: 103980. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.103980
- [16] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. London: CRC press, 2015: 74
- [17] KUMAR K S, STATHOPOULOS T. Wind loads on low building roofs: a stochastic perspective [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 944
- [18] PRATT R N, KOPP G A. Velocity field measurements above the roof of a low-rise building during peak suction[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 234. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.06.009
- [19] 孙虎跃, 叶继红. 基于 PIV 技术的平屋盖表面分离泡流动结构研究[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 121
- SUN Huyue, YE Jijong. 3D characteristics of separation bubbles around flat roofs by piv technique [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(11): 121. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.03.0245
- [20] 董欣, 丁洁民. 分离泡诱导下平屋盖表面风压特性研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 41
DONG Xin, DING Jiemin. Wind pressure characteristics on a flat roof induced by separation bubble [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.05.003
- [21] AKON A F, KOPP G A. Mean pressure distributions and reattachment lengths for roof-separation bubbles on low-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 155: 115. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.05.008
- [22] MONTGOMERY D C, RUNGER G C. Applied statistics and probability for engineers[M]. New York: John Wiley & Sons, 2010: 235
- [23] LIN Ning, LETCHFORD C, TAMURA Y, et al. Characteristics of wind forces acting on tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(3): 217. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.12.001
- [24] 袁家辉, 陈水福, 刘奕. 矩形高层建筑气动基底力矩系数研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 54
YUAN Jiahui, CHEN Shuifu, LIU Yi. Aerodynamic base moment coefficients of rectangular high-rise buildings[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(9): 54. DOI: 10.11918/202203088
- [25] ROSHKO A. Some observations on transition and reattachment of a free shear layer in incompressible flow [C]//Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Los Angeles: Stanford University Press, 1965: 157

(编辑 赵丽莹)