文章编号:1674-2974(2025)03-0094-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025030

台风气候下低矮建筑屋面实测风压的分形特征

崔炳唱 ,黄鹏 †
（同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室 上海 200092）

摘 要:在中国东南沿海地区,台风造成的损失主要是由于低矮建筑的破坏,台风期间屋面风压的特性具有重要的工程价值.基于物理学的分形理论,对风压脉冲信号的分形特征展开研究.依托同济大学浦东实测基地,以2011年台风“梅花”期间低矮双坡实测房屋面风压数据和近地面风速数据为样本,采用盒子计数法估计风压时程序列的分形维数.论证了分形维数值和风压脉动强弱的正相关性.分析了屋盖全区域的分形特征以及屋盖坡角和来流方向等对分形特征的影响.结果表明,台风气候下屋面风压是反持久性时间序列,全屋面区域测点风压分形维数的平均值是1.700.建筑坡角和来流方向对屋面风压的分形特征影响较大,分形维数的峰值出现在远离来流的向风面山墙区域,局部低值出现在屋脊的中心区域.对分形特征和非高斯性的相关性进行了分析,分形维数与峰度系数之间负相关性较强,在0°坡角下二者负相关系数为-0.509.

关键词:建筑屋盖;现场实测;分形特征;反持久性;台风
中图分类号:TU311.3 **文献标志码**:A

Fractal Characteristics of Measured Wind Pressures on Roof Surface of Low-rise Buildings under Typhoon Climate

CUI Bingchang,HUANG Peng†
(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract:The loss of life and property caused by typhoons in the southeastern coastal regions of China is mainly attributed to the destruction of low-rise buildings. Therefore, analyzing the wind pressure characteristics on the roof surface under strong winds is of practical value in wind engineering. Based on the fractal theory of physics, this study conducts the fractal analysis of wind pressure pulse signals. The wind pressure and referenced wind velocity data were collected during Typhoon “Muifa” in 2011 from the Pudong experimental base of Tongji University. In the fractal analysis, the box-counting method was used to estimate the fractal dimension value for each wind pressure sample. In the result section, an example is given to demonstrate the positive correlation between fractal dimension values and the fluctuation strength of wind pressure. Then, the fractal characteristics of wind pressures on the entire roof region and the influence of roof pitches and inflow directions on the fractal dimension were investigated. Firstly, the results indicate that the wind pressures under typhoon climate are anti-persistent time series, and the mean

* **收稿日期**:2024-02-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178500),National Natural Science Foundation of China (52178500)
作者简介:崔炳唱(1997—),男,河南信阳人,同济大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: huangtju@tongji.edu.cn

fractal dimension for wind pressures on the entire roof region is 1.700. Secondly, the roof pitch and inflow direction affect the fractal characteristics significantly. Thirdly, the peak region of the fractal dimension appears in the area far away from the incoming flow and close to the mountain wall, while local low values occur in the central area of the roof ridge. An analysis is carried out on the correlation between the fractal characteristics and the Non-Gaussian features. The negative correlation between fractal dimension and kurtosis coefficient is strong, with a negative correlation coefficient of −0.509 under case A-00.

Key words: building roof; field measurement; fractal characteristics; anti-persistent; typhoon

我国的东南沿海地区是世界上台风高发区域之一[1]. 在东南沿海地区,台风造成的人员伤亡和财产损失通常是由低矮建筑的破坏引起. 现场灾害调查表明,极端风暴下低矮建筑的破坏通常起始于屋盖结构,尤其是角部区域[2]. 在现阶段,由于台风与良态风在微观结构和宏观湍流上的差异,无法通过风洞试验或者数值手段准确模拟台风. 因此,现场实测已成为研究台风特性和台风气候下建筑表面风荷载特性最直接、最有效的手段[3]. 台风气候下低矮建筑屋面风荷载场特征可为低矮建筑的抗风设计提供重要参考.

近年来基于现场实测,风工程领域的学者对强风作用下低矮建筑屋面风压场的特征展开了许多研究[4-6]. 国内学者也基于中国极端风环境概况,开展低矮建筑屋盖表面风荷载特性实测研究. 比较有代表性的是湖南大学追风房[7]和同济大学浦东实测基地[8]. 现场实测研究结果表明,斜向强风作用下会在低矮建筑屋面产生较大的峰值负压,峰值负压出现区域为屋盖角部区域,该荷载通常是引起低矮建筑屋盖结构破坏的直接原因.

已有的低矮建筑风荷载实测研究主要围绕风压的时域特性和频域特性展开. 包括概率分布特性、平稳性、谱特性以及极值估计. Xie 等[9]对屋面风压时程的非高斯非平稳性展开了系统研究,发现在特征湍流和漩涡脱落区域的风压不符合高斯分布. 实测风压数据库的丰富对基于零值穿越理论、经典极值理论和超越阈值模型的极值估计方法的完善提供了重要的数据支撑. 例如,黄鹏等[10]利用2016年台风“马勒卡”期间低矮建筑屋面风压时程数据,验证了基于超越阈值模型的极值估计方法的合理性. 但是,风压样本的本质是一种时域上的脉冲信号,对于风压脉冲信号的物理特征的认识还远不足.

物理特征如尖峰分布特征和分形特征等是风压脉冲信号的重要表征. 现有针对风压的时程模拟方法直接使用风压数据的时频特征,忽略风压脉冲信号的物理特征,难以进一步提高模拟精度. Seong 等[11]系统总结了湍流时间序列的尖峰特征与频域上的谱相位之间的关系,并基于此完善了非高斯风压系数时程信号的傅里叶生成方法. 已有学者将脉动风压时程信号的分形特征考虑进风压的时程模拟中,大大提高了风压模拟效率和精度[12]. 在分形分析中,分形维数是一个关键的定量分析参数,用于评价时程信号的波动强度和变化趋势的持续性. Cui 等[13]基于三次强台风期间采集的近地面 100 m 内风速数据,对近地面台风风速的分形特征进行了全面分析. 当前,基于现场实测风压数据,开展风压时程信号的分形特征的分析较少.

本文利用同济大学浦东实测基地采集到的台风“梅花”期间低矮建筑屋面风压数据和邻近测风塔的参考风速数据,采用盒子计数法估计风压系数时程样本的分形维数值. 分形维数是分形理论分析中的一个重要的定量参数,用于评估脉冲信号波动的复杂性和持续性[14]. 本文论证了风压分形维数值和风压脉动程度的正相关性,并对全屋面风压的分形特征、屋盖坡角和来流方向对分形维数分布的影响以及分形特征和非高斯性之间相关性进行了系统的研究. 研究成果既加深了对台风气候下低矮建筑屋面风压物理特征的认识,也为相同地貌下低矮建筑屋盖的抗风设计和风荷载场模拟提供了重要的参考.

1　分形理论和风压数据

1.1　分形理论

分形特征是时程信号的一项重要的物理特征.

分形理论最早由 Mandelbrot[15]提出. 随后,分形分析工具被应用在湍流领域. 基于分形理论的分形维数是一个定量参数,用于评估对象时程信号的波动强弱和持续性的复杂强度[16]. 典型湍流时间序列信号的分形维数在 1.3~1.8 之间变化,分形维数数值可用于评估湍流的复杂性. 根据分形维数 D 的取值范围,湍流信号时间序列分为表 1 所列的三种类型.

表 1 分形维数值与时间序列类型的对应关系

Tab.1 The precise correspondence between fractal dimension values and types of time series

分形维数 D 取值区间	时间序列类型
$1.0< D <1.5$	持久性时间序列
$1.5< D <2.0$	反持久性时间序列
$D=1.5$	随机时间序列

在(1.0,1.5)区间内的分形维数 D 对应持久性时间序列. 持久性时间序列的前后变化趋势存在正相关的关系,这意味着先前区域序列数据的变化趋势会在后续的数据序列中继续保持. 当 D 值越接近 1.0 时,这种自保持性越强. 相反,反持久性时间序列的分形维数值在 1.5~2.0 之间变化,前后的变化趋势之间存在负相关性,并且,当 D 值越接近 2.0 时,这种负相关性越强[17].

研究人员基于图像处理和几何工具,提出了一系列分形维数估计方法,主要有方差法[18]、谱法[19]和盒子计数法[20]. 在时程信号的分形分析中,功率谱分析法和盒子计数法有着严谨的理论基础. 但谱法的计算过程过于复杂且耗时较长. 盒子计数法操作简单且易于被编辑成计算机语言来批量处理数据[21],因此本研究采用盒子计数法来开展风压系数时程样本数据的分形维数估计. 图 1 为盒子计数法求解时程信号的分形维数的过程[22].

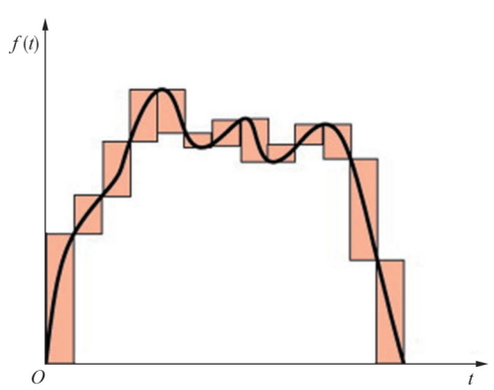


图 1 盒子计数法求解时间序列曲线的分形维数的过程

Fig. 1 Solution process of fractal dimension for the time series curve using box-counting method

盒子计数法求解时程信号曲线的分形维数的过程详见 Cui 等[13]的分形分析章节. 求解公式如下:

$$D=-\lim_{L\to 0}\frac{\log_2 N(L)}{\log_2 L} \tag{1}$$

式中:$N(L)$ 为覆盖时程曲线的小方格的数目;L 为小方格的宽度. 通过取双对数和线性拟合获得对应时程曲线的分形维数值.

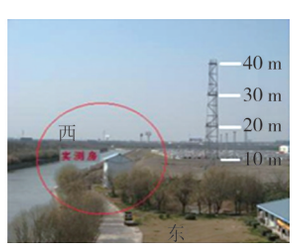
1.2 现场实测概况和数据处理

本课题组依托同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室,搭建了同济大学浦东实测基地. 实测基地包含一间低矮双坡实测房和一座格构式钢塔架,分别监测台风期间低矮建筑屋面的风压数据和周围风场的近地面台风数据. 其中,低矮双坡实测房长约 10 m,宽和高分别约为 6 m 和 8 m. 该低矮双坡实测房的坡角可以实现在 0°~30°区间内连续调节. 同济大学浦东实测基地位于长江入海口的平坦地区(北纬 31°11′46.36″;东经 121°47′8.29″). 已有的现场实测和风洞研究结果表明,当来流是斜风向时,屋盖表面角部区域的风荷载效应对双坡低矮建筑来说是最危险的[23]. 因此,测量点密集地布置在屋顶迎风面和背风面的角落区域. 实测基地现场图和屋盖表面风压传感器布置见图 2.

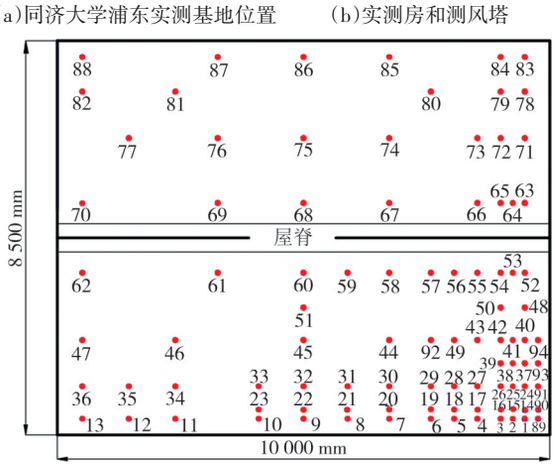
在风工程领域,通常对实测风压数据进行无量纲化处理. 本研究以低矮建筑屋脊高度处的台风 10 min



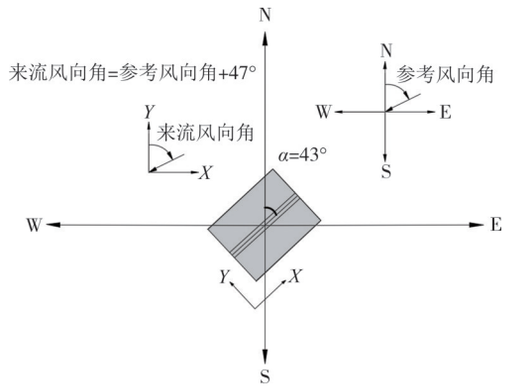
(a)同济大学浦东实测基地位置



(b)实测房和测风塔



(c)屋盖表面测点布置图



(d)参考风向和实测房的相对位置(俯视视角)

图 2　同济大学浦东实测基地和屋面测点布置图

Fig.2　Pudong experimental base of Tongji University and layout for pressure measurement system on the roof

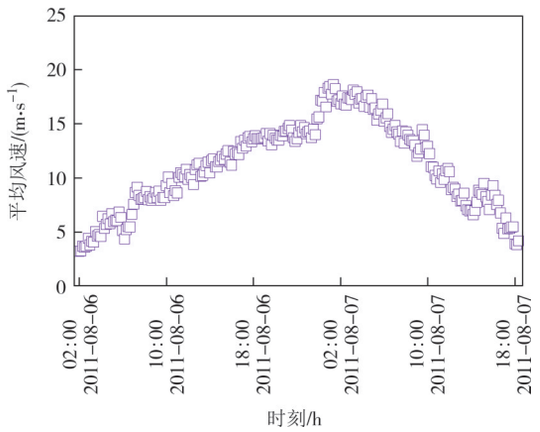
水平风速均值作为每段风压时程样本的参考风速,即 10 m 高度处的台风实测风速数据. 风速数据来自附近格构式钢塔架上 10 m 高度处安装的三维超声风速仪. 超声风速仪的采样频率为 20 Hz,可同步测量三维风速和风向. 在野外工作中,采集到的风速数据和风压数据很容易受到雨滴、灰尘、闪电和飞虫的影响. 噪声、仪器故障和环境变化也会影响采集数据的质量. 因此,收集的数据中可能会出现一些无效数据. 在计算风压系数之前消除采集到的无效数据点,同时运用五点插值法来填补缺失数据.

2011 年 8 月 6 日,台风“梅花”在中国浙江省东部海岸登陆,次日,其在上海南部登陆,登陆上海时中心最大风速达到 12 级. 如图 3 所示,采集到 10 min 平均风速的最大值为 18.42 m/s(10 m 高度处). 图 3 显示了参考高度处的 10 min 平均风速和 10 min 平均风向角随时间的变化. 本文选取台风“梅花”影响最强烈的 40 h 期间的 7 个工况下的风压数据,工况的详细情况见 1.3 小节. 风压的采样持续时间和采样频率分别设置为 10 min(标准时距下)和 20 Hz. 即本文分析的每个风压系数时程样本包含 12 000 个数据点.

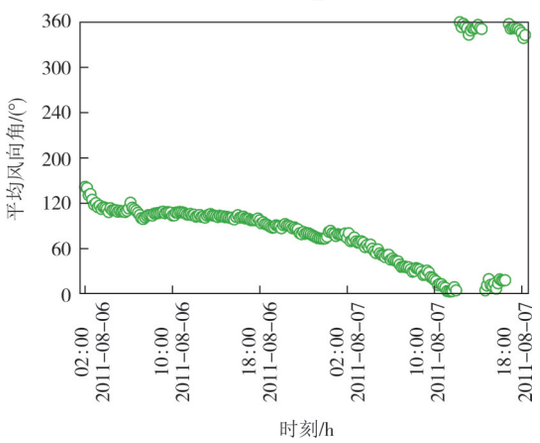
实测房的俯视图和相对方位如图 2(d)所示. 本文以测风塔 10 m 高度处测得的 10 min 平均风向角作为参考风向角,规定正北方向为 0°,按俯视顺时针方向递增. 同时,以实测房长度方向为 X 轴,以宽度方向为 Y 轴,建立俯视图的平面直角坐标系. 来流风向角定义为与 Y 轴正向的顺时针夹角,根据图示几何关系,来流风向角即在参考风向角的基础上增加 47°. 具体工况的来流风向角详见表 2.

1.3　研究工况

选取了台风“梅花”高风速期间的 7 个具有代表性



(a)平均风速



(b)平均风向角

图 3　台风“梅花”期间参考高度处 10 min 平均风速和 10 min 平均风向角随时间的变化

Fig.3　Variations of 10 min mean wind speeds and mean wind directions angle with time at the reference height during Typhoon “Muifa”

表 2　台风“梅花”期间分析工况

Tab.2　Summary of measured cases during Typhoon“Muifa”

工况编号	屋面坡角/(°)	参考风速/(m·s⁻¹)	参考风向角/(°)	来流风向角/(°)
A-00	00	17.18	28.8	75.8
A-05	05	16.81	22.9	69.9
A-15	15	15.45	26.1	73.1
A-25	25	18. 43	29.8	76.8
A-30	30	16.53	21.1	68.1
B-15	15	13.61	45.6	92.6
B-30	30	15.56	0.10	47.1

的工况. 在每个工况下,单个测点风压样本的采集持续时间均为标准时距[24],即 10 min. 工况的具体参数见表 2,包括屋盖坡角、参考风速、参考风向角和来流风向角. 为分析屋盖坡度对于屋盖全区域风压分形维数平均水平和分布情况的影响,本文选取了 A-00、A-05、A-15 和 A-25 这 4 种工况,这 4 种工况下来流的

条件相似,参考风速的变化范围为15.45~18.43 m/s,来流风向角的变化范围为69.9°~76.8°.工况A-30、B-15、B-30主要针对特定来流条件开展屋面风压场的分形特征分析.工况B-15和B-30的来流风向角分别为92.6°(接近90°)和47.1°(接近45°),A-30工况是作为B-30工况的对比工况,因为斜向风作用下低矮建筑屋面的风荷载往往是引起低矮建筑屋盖结构破坏的最直接原因.

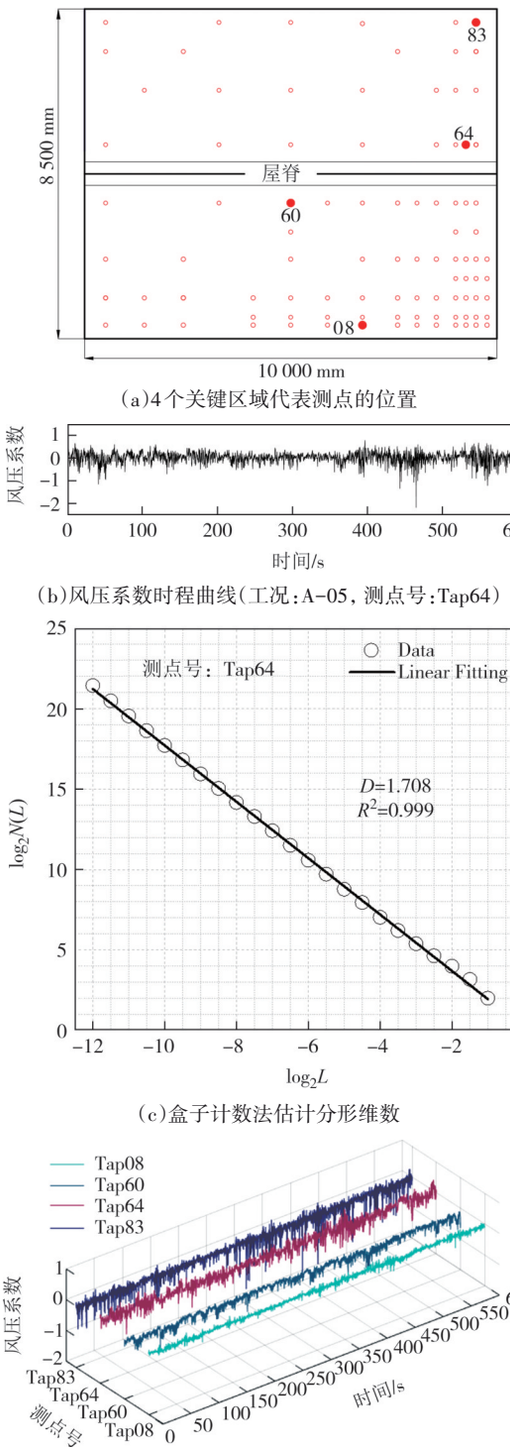
2 屋面风压场的分形特征分析

2.1 同步采集风压样本的分形维数

在极端风气候下,低矮建筑屋盖结构的薄弱区域为迎风面角部区域和靠近屋脊的区域,以及受湍流和漩涡脱落影响较严重的区域.为了对比研究这些区域风压时程的物理特征(本文主要指分形特征),以4个测点同步采集到的风压时程样本为分析对象.测点Tap83在迎风面角部区域,测点Tap64和Tap60分别在迎风面和背风面的屋脊边缘区域,测点Tap08则代表背风面屋檐边缘中心区域.具体位置见图4(a).

分形维数是定量描述时程信号的参数,被用来评估湍流的复杂度,其值大小与时间序列的脉动强弱成正相关.图4(a)为4个关键区域代表测点在屋盖上的准确位置.作为示例,图4(b)绘制了工况A-05下测点Tap64处风压时程的时间序列,图4(c)表示采用盒子计数法估计Tap64处风压时程样本分形维数的线性拟合过程.4个测点处的风压时程样本的分形维数估计值、标准差和线性拟合过程的相关系数见表3.从表3可知,4个风压时程样本拟合曲线的相关系数均在0.990以上.同时,本文分析的所有风压时程样本的拟合相关系数均大于0.990.这个结果说明了盒子计数法估计风压时程曲线分形维数的合理性.

由表3给出的分形维数可见,测点Tap64处风压的分形维数最大,为1.708,测点Tap60和Tap83处风压的分形维数值居中.测点Tap08处风压的分形维数最小,为1.603.分形维数数值的大小可以从时间序列的波动强度和变化趋势的持续性两个方面来解释.根据表3给出风压系数时程样本的标准差,测点Tap64处风压样本的标准差为0.208,为4段风压样本中最大值.测点Tap60和Tap83风压的标准差均接近0.170,而测点Tap08处的标准差远小于0.100.这说明分形维数的数值大小和风压样本的波动强度保持一致.另一方面,在图4(d)中,从测点Tap08处风压时程曲线的局部最小值到局部最大值的平均持续时间最短.相反地,测点Tap64处对应的平均持续时



(a)4个关键区域代表测点的位置

(b)风压系数时程曲线(工况:A-05,测点号:Tap64)

(c)盒子计数法估计分形维数

(d)同步采集4个测点处风压系数时程曲线

图4 关键区域代表测点位置、风压系数时程曲线和估计分形维数的详细过程

Fig.4 Locations of representative measurement points in crucial regions, wind pressure coefficient time history curves and detailed estimation process of fractal dimension

间最长.这反映了测点Tap64处风压的持续性最强,测点Tap08处最弱.风压时程变化趋势的持续性强弱程度可对后续强风作用下建筑表面风压场的数值模拟提供重要参考.风压脉动强度与分形维数基本成正相关,即脉动强度越大,分形维数的值越接近2.0,对应风压的反持久性越强.

表3　标准时距下风压系数样本的分形维数值、标准差和线性拟合的相关系数

Tab.3　Estimated fractal dimension, standard deviation and correlation coefficient of linear fitting for wind pressure coefficient samples under standard time interval

测点号	分形维数D	标准差	线性拟合相关系数R^2
Tap08	1.603	0.081	0.997
Tap60	1.661	0.172	0.998
Tap64	1.708	0.208	0.999
Tap83	1.628	0.168	0.998

2.2　屋盖全区域的分形特征

分形维数是量化不同区域风压时间序列的持续性的重要参数.表4给出了低矮房屋屋面全区域分形维数的统计特征,包括变化范围、5%分位值区间和平均值.

结果表明,风压的分形维数均处于(1.550,1.850)区间,即所有风压样本的分形维数值均大于1.500. 因此,台风气候下的实测风压时程均为反持久性序列,但反持久性强弱因区域而有所变化.5%分位值分布区间是屋盖区域风压时程信号分形维数的主要分布区间,排除了极端值的影响,更适用于工程参考和采用.5%分位值分布区间上限和下限分别是1.600和1.750,这一结果证实了实测风压的反持久性程度较弱.

表4给出了屋面全区域风压时程分形维数的平均值,除了B-30工况,其他6个工况下的分形维数平均水平差别较小,均接近1.700. 从整体上来看,台风期间风压时程呈现较弱的反持久性,即风压时间序列前后变化趋势具有一定程度的负相关性. 在风压时间序列的时域模型中,这些分形特征可作为参考的数据结构来完善风压场的数值模型.

表4　屋面全区域分形维数的统计特征

Tab.4　Statistics of fractal dimension on the entire roof region

工况编号	A-00	A-05	A-15	A-25	A-30	B-15	B-30
变化范围	1.574~1.814	1.645~1.836	1.632~1.831	1.639~1.828	1.604~1.808	1.620~1.836	1.593~1.718
5%分位值区间(5%~95%)	1.659~1.729	1.664~1.749	1.653~1.741	1.651~1.727	1.628~1.735	1.649~1.721	1.610~1.691
平均值	1.694	1.713	1.705	1.696	1.679	1.686	1.640

本文选取了同年良态风下的分析工况作对比分析,良态风下分析工况和屋面风压分形维数统计特征详见表5. 来流风向角以台风下的主要风向角范围作为参考. 结果表明,良态风下的风压分形维数的变化区间整体更接近1.500,均值也低于类似来流风向角下的台风工况(A-15). 这反映了良态风下屋面风压的整体反持久性较弱,更偏向于随机时间序列.

表5　良态风下分析工况和屋面风压分形维数的统计特征

Tab.5　Measured cases and statistics for fractal dimension of wind pressures under normal wind

良态风下分析工况			分形维数统计特征		
屋面坡角/(°)	参考风速/(m·s^{-1})	参考风向角/(°)	来流风向角/(°)	变化范围	平均值
15	8.49	29.9	76.9	1.533~1.765	1.672
15	8.88	30.1	77.1	1.529~1.761	1.674

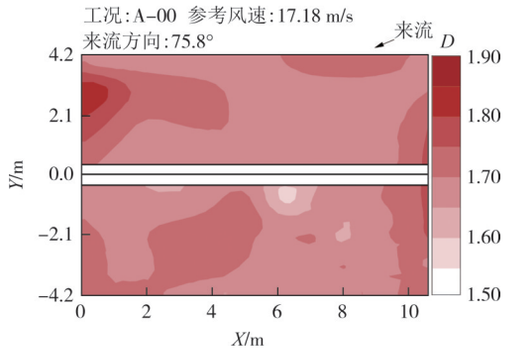
2.3　屋盖坡角和来流方向对分形特征的影响

2.3.1　不同坡角下的分形特征分析

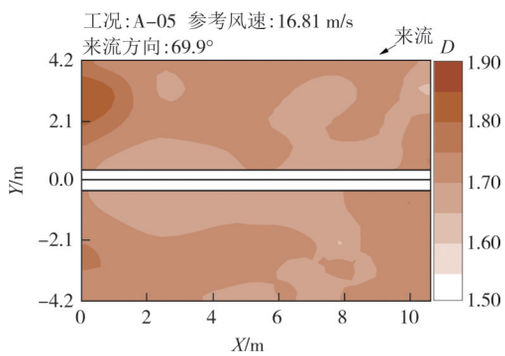
图5表示在相近的来流工况下,不同坡角下低矮建筑屋面风压的分形维数的分布情况.由图5可知,分形维数的峰值区域出现在远离来流的向风面山墙区域,即图5的西北角山墙中部区域. 当坡角从0°开始增加时,背风面靠近屋脊中部区域的局部低值区域消失,在25°坡角下,该区域出现局部峰值,数值高达1.750.从表4可以看出,0°和25°坡角下的分形维数平均水平比5°和15°坡角下的高,且0°坡角(平屋面)下区域之间差异性大. 这是因为平屋面局部区域受特征湍流影响明显.

2.3.2　考虑来流方向对风压场分形特征的影响

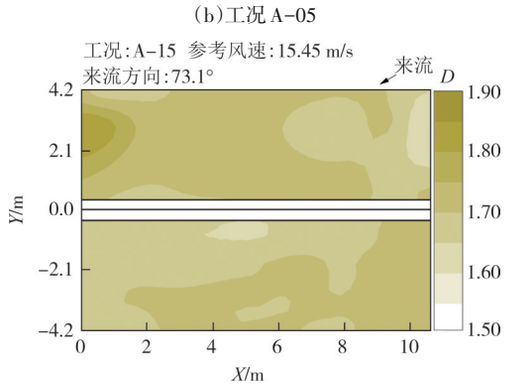
针对性分析特定来流方向下风压的分形维数分



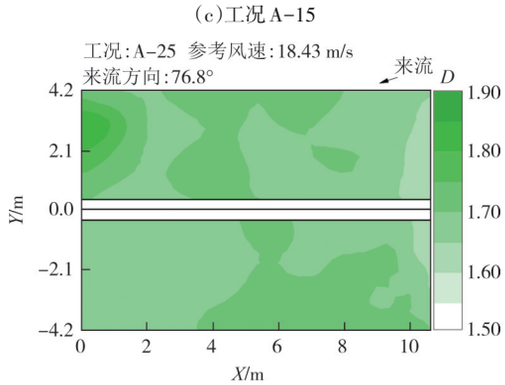
(a)工况 A-00



(b)工况 A-05



(c)工况 A-15

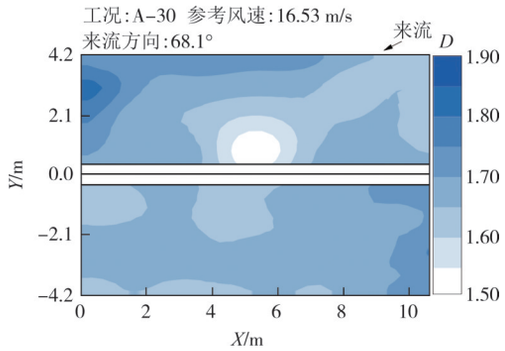


(d)工况 A-25

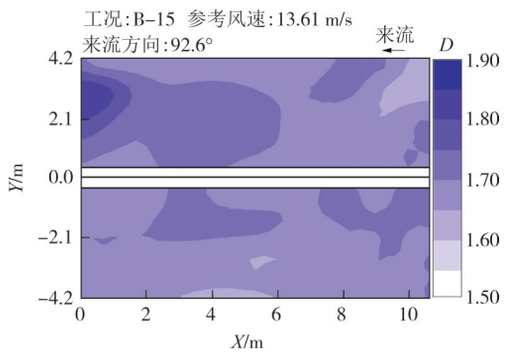
图 5 不同坡角下分形维数 D 等值线图

Fig.5 Contour map of fractal dimension D at different slope angles

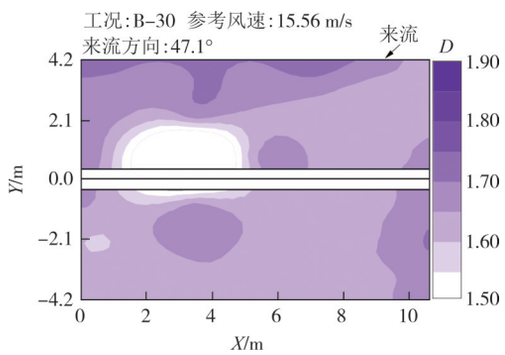
布特性,本文分别估计了来流方向为 47.1°(工况 B-30)、92.6°(工况 B-15)和 68.1°(工况 A-30)时的屋面全部测点实测风压时程的分形维数值,并绘制了等值线图,见图 6.



(a)工况 A-30



(b)工况 B-15



(c)工况 B-30

图 6 不同来流方向下的分形维数等值线图

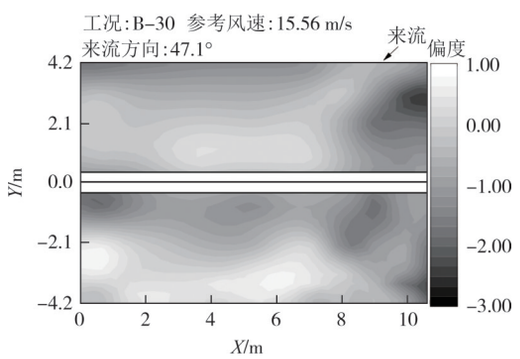
Fig.6 Contour of fractal dimension under different inflow directions

根据图 6 可知,三种典型工况下迎风屋面和背风屋面分形维数分布存在明显差异. 迎风面不同区域间分形维数的变化剧烈,迎风面分形维数的统计标准差高于背风面的标准差. 在 B-30 工况中,迎风面的标准差为 0.101,背风面标准差为 0.026. A-30 和 B-15 工况下,迎风面分形维数标准差与背风面的比值分别为 1.80 和 2.25. 在斜向风作用下,分形维数的低值区域出现在接近屋脊的中心区域. 当来流方向转变为 92.6°(工况 B-15)时,分形维数的低值区域消失,其分布更趋于均匀. 在斜向风作用下,屋盖不同区域间的风压脉动差异性较大,与这些时刻的高湍流强度有关,低矮房屋破坏的直接原因往往是斜向强风作用下角部脆弱区域的极值负压,因此,这些工

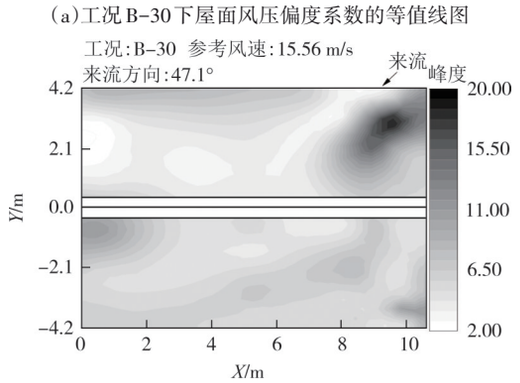
况下风压场的分形等物理特征需要给予更多的研究和分析.

2.4　分形特征与非高斯性的相关性分析

现场实测结果表明,受湍流和漩涡脱落影响较强的区域采集到的低矮建筑屋盖表面风压存在明显的非高斯性[25]. 特别是迎风面的角部区域,这也是屋盖结构在极端风作用下的脆弱区域. 为了提高这些区域风压模拟的精度,有必要研究分形特征和非高斯性的相关特性. 本文选取了工况 B-30 下采集的风压时程数据,计算每个测点风压样本的偏度和峰度,偏度系数和峰度系数的分布情况如图 7.



(a)工况 B-30 下屋面风压偏度系数的等值线图



(b)工况 B-30 下屋面风压峰度系数的等值线图

图 7　工况 B-30 下偏度和峰度的等值线图

Fig.7　Contour of skewness and kurtosis under case B-30

图 7(a)和图 7(b)分别绘制了工况 B-30 下偏度和峰度的等值线图. 偏度和峰度均在迎风面靠近来流的角部区域出现峰值区域,偏度峰值达-2.93,峰度的最高值为 19.56,非高斯性较强. 其他区域如背风面靠近屋脊区域的风压概率分布也明显偏离高斯分布.

为了定量分析分形特征与非高斯性的相关性,分别求解屋面全区域分形维数与偏度系数和峰度系数的相关系数. 分析数据来自 A 类下的 5 种工况,相关系数随屋盖坡角变化如图 8 所示. 图 8 中分形维数与偏度的相关性较弱,只在 30° 坡角下出现峰值-0.369,说明分形维数与偏度系数在此工况下具有一定负相关性. 分形维数与峰度系数的相关系数均在-0.250 以下,具有强烈的负相关性. 且二者的负相关性随坡角逐渐减弱,在 0° 坡角下分形维数与峰度的负相关性最强,此工况下二者的相关系数为-0.509. 总体上,风压的分形维数与偏度没有明显的相关性,风压的分形维数与峰度在 0° 坡角下具有显著的负相关性.

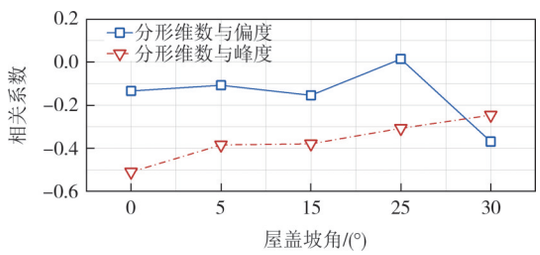


图 8　分形维数与偏度、峰度的相关性随屋盖坡角变化

Fig.8　The correlation between fractal dimension and skewness, kurtosis with roof pitches

3　结论与展望

本文基于台风“梅花”期间同济大学浦东实测基地低矮实测房屋面风压数据,参考格构式塔架在屋檐高度处的风速实测数据,获得风压系数时程样本. 采用盒子计数法,合理估计台风气候下低矮建筑屋面实测风压的分形维数数值,并对风压的分形特征和影响因素展开了分析,得到以下结论:

1) 运用盒子计数法对每个风压时程样本进行分形维数数值的估计,每个样本线性拟合的相关系数均超过 0.990, 这论证了分形行为存在于实测风压时间序列中.

2) 同步采集 4 个典型位置测点风压的分形维数估计结果,论证了分形维数值和脉动强弱的正相关性. 分形维数较大的风压时程信号与强脉动对应.

3) 整个屋面风压的分形维数在 1.550~1.850 之间变化,5% 分位值分布区间上限和下限分别是 1.600 和 1.750,除 B-30 工况外,其他工况下所有测点的平均值接近 1.700. 根据时间序列的分类,说明台风气候下低矮建筑屋面风压是反持久性的. 类似来流风向下,台风气候下屋面风压的反持久性强于良态风气候下的工况.

4) 建筑坡角和来流方向对屋面风压的分形特征影响较大. 分形维数的峰值区域出现在远离来流的向风面山墙区域,低值区域出现在接近屋脊的中心区域. 在 30° 坡角下,迎风面分形维数的离散程度

比背风面强,说明迎风面不同区域间风压脉动差异大.这与迎风面特征湍流的影响有关.

5)风压的分形维数与峰度在0°坡角下具有显著的负相关性.分形维数与峰度系数的负相关性较强,且负相关性随屋面坡角增加而减弱,在0°坡角下负相关系数为-0.509,二者为强负相关的耦合关系.分形维数与偏度系数相关性较弱,在30°坡角下最小的负相关系数为-0.369.

台风气候下低矮建筑屋面风荷载场的特征对于低矮建筑屋盖结构的抗风设计至关重要,本文对风压的分形特征展开了系统性分析.分析得到,全屋盖风压为反持久性时间序列且分形维数均值为1.700,将为风压时程样本的时域模拟提供重要的参考,并从物理角度提高风荷载场数值模型的精确度.同时考虑了分形特征与非高斯性的相关性,以保证风压数值模拟的物理特征和时域统计特征的互保持性.

参考文献

[1] LI Q S, HU S Y, DAI Y M, et al. Field measurements of extreme pressures on a flat roof of a low-rise building during typhoons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 111: 14-29.

[2] YANG Q S, GAO R, BAI F, et al. Damage to buildings and structures due to recent devastating wind hazards in East Asia[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1321-1353.

[3] 顾明.土木结构抗风研究进展及基础科学问题[R].成都:第七届全国风工程和空气动力学学术会议,2006.
GU M. The research process and basic scientific issues about civil structure [R]. Chengdu: The 7th National Conference on Wind Engineering and Aerodynamics, 2006. (in Chinese)

[4] EATON K J, MAYNE J R. The measurement of wind pressures on two-storey houses at Aylesbury [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975, 1: 67-109.

[5] 李秋胜,李建成. 热带气旋中竖向风攻角对双坡低矮房屋屋面风压的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(7): 1-7.
LI Q S, LI J C. Influences of vertical wind angles on roof pressures of low-rise gable roof building during tropical cyclone[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 1-7. (in Chinese)

[6] CARACOGLIA L, JONES N P. Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(5/6): 157-173.

[7] 戴益民,李秋胜,李正农.低矮房屋屋面风压特性的实测研究[J].土木工程学报, 2008, 41(6): 9-13.
DAI Y M, LI Q S, LI Z N. Experimental study of wind pressures on a low-rise full-scall building [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 9-13. (in Chinese)

[8] 王旭,黄鹏,顾明.海边坡角可调试验房风荷载现场实测研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 176-182.
WANG X, HUANG P, GU M. Field investigation on wind loads of a low building with adjustable roof pitch near sea[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 176-182. (in Chinese)

[9] XIE W, HUANG P, GU M. A maximum entropy model with fractional moments for probability density function estimation of wind pressures on low-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 208: 104461.

[10] 黄鹏,蓝鑫玥,钟奇. 基于超越阈值模型的低矮房屋实测风压极值估计方法[J]. 振动与冲击,2019,38(2):33-40.
HUANG P, LAN X Y, ZHONG Q. Extreme value estimation method for measured wind pressures on low-rise buildings based on the peaks over threshold model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 33-40. (in Chinese)

[11] SEONG S H, PETERKA J A. Experiments on Fourier phases for synthesis of non-Gaussian spikes in turbulence time series[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(5): 421-443.

[12] 吴红华,米慧敏. 非高斯脉动风压的分形模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):59-68.
WU H H, MI H M. Research on fractal simulation of non-Gaussian fluctuating wind pressure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7): 59-68. (in Chinese)

[13] CUI B C, HUANG P, XIE W. Fractal dimension characteristics of wind speed time series under typhoon climate [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 229: 105144.

[14] MARVASTI M A, STRAHLE W C. Fractal geometry analysis of turbulent data[J]. Signal Processing, 1995, 41(2): 191-201.

[15] MANDELBROT B B. Fractal geometry: what is it, and what does it do?[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences, 1989, 423(1864): 3-16.

[16] CADENAS E, CAMPOS-AMEZCUA R, RIVERA W, et al. Wind speed variability study based on the Hurst coefficient and fractal dimensional analysis[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(2): 361-378.

[17] SHU Z R, CHAN P W, LI Q S, et al. Characterization of vertical wind velocity variability based on fractal dimension analysis[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 213: 104608.

[18] BURROUGH P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data[J]. Nature, 1981, 294: 240-242.

[19] FOX C G. Empirically derived relationships between fractal dimension and power law form frequency spectra[J]. Pure and Applied Geophysics, 1989, 131(1): 211-239.

[20] THEILER J. Estimating fractal dimension[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(6): 1055.

[21] LI J, DU Q, SUN C X. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2460-2469.

[22] CHANG T P, KO H H, LIU F J, et al. Fractal dimension of wind speed time series[J]. Applied Energy, 2012, 93: 742-749.

[23] ENDO M, BIENKIEWICZ B, HAM H J. Wind-tunnel investigation of point pressure on TTU test building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(7): 553-578.

[24] 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 Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[25] 王旭,黄鹏,刘海明,等. 超强台风作用下低矮建筑屋盖风压非高斯特性研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(10):132-139.
WANG X, HUANG P, LIU H M, et al. Non-Gaussian features of wind pressures on low-rise building's roof during a super typhoon[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 132-139. (in Chinese)