

引用本文:叶 涛,李兰兰.一种非高斯风压峰值因子快速求解算法[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):116-128.

YE Tao, LI Lanlan. A fast algorithm for solving non-Gaussian wind pressure peak factor[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 116-128.

DOI:10.19815/j.jace.2021.04080

一种非高斯风压峰值因子快速求解算法

叶 涛^{1,2}, 李兰兰³

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092;
3. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要:为了计算非高斯风压峰值因子,基于双边保证率模型提出了计算非高斯风压时程峰值因子的快速快速搜索法和用于峰值提取的逐级分段法。通过某超高层建筑刚性模型测压风洞试验对常用的几种建筑覆面非高斯风压的峰值因子计算方法进行比较分析,对比各种方法得到峰值因子的大小及其与观察平均峰值的误差率。基于算法结果,研究了脉动风压概率特性,分析了偏度、峰度和峰值因子间的变化关系及其内在变化机理。结果表明:基于可靠度理论,用数值手段无限接近风压时程真实分布的快速搜索法总体精确性和适用性比经典的 Sadek-Simiu 法有所提高; 极大值序列的峰值因子及其误差率随风向角变化而变化的总趋势和极小值序列是一致的; 侧风面的前缘气流分离区、背风面及迎风面切角区、方形截面 45°风向角下两背风面交接处是强非高斯区; 风压时程概率密度分布是否具有绝对值较大的超越峰度与样本对称出现在均值线附近的集中程度相关。

关键词:超高层建筑; 非高斯风压; 峰值因子; 快速求解算法

中图分类号:TU312

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)02-0116-13

A fast algorithm for solving non-Gaussian wind pressure peak factor

YE Tao^{1,2}, LI Lanlan³

(1. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, Hubei, China; 2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, Jiangsu, China)

Abstract: In order to calculate the non-Gaussian wind pressure peak factor, a fast stepwise search method for calculating peak factor of non-Gaussian wind pressure time history and a gradual piecewise method for extracting peak value based on the model of bilateral guarantee rate were proposed. Through a rigid model wind tunnel test data of pressure measurement of a super high-rise building, several typical calculation methods of peak factor of non-Gaussian wind pressure on claddings were compared and analyzed. The value of peak factor and its error rate calculated by several methods were compared with observed average peak value. Based on the algorithm results, the probability characteristics of fluctuating wind pressure were studied, and the variation relationship and internal variation mechanism among skewness, kurtosis and peak factor were discussed. The results show that based on the reliability theory, the overall accuracy and

applicability of the stepwise search method, which is infinitely close to the true distribution of wind pressure time history by numerical means, are improved compared with the classical Sadek-Simiu method. The main trend of change of peak factor and error rate of maximum sequence changing with wind direction angle is consistent with that of minimum sequence. The non-Gaussian features are prominently exhibiting at the leading edge airflow separation on the crosswind side, the leeward corner cuts, the windward corner cuts and the junction of two leeward surfaces at 45° wind direction angle of square section. Whether the absolute value of wind pressure time history probability density distribution is larger than the kurtosis is related to the concentration degree of sample symmetry near the mean line.

Key words: super high-rise building; non-Gaussian wind pressure; peak factor; fast algorithm

0 引言

风荷载是高层建筑围护结构设计的控制荷载之一。研究表明,高层建筑结构的风荷载随地形条件、建筑形状和周围建筑而变化。风洞试验测得的建筑覆面各点风压系数是随机变化的,如何根据这些随机数据准确地得到给定保证率对应的设计最大(小)风压系数,并且能够满足安全、经济的设计原则具有重要的工程意义。极值风压估计方法可以以母体分布为对象,这方面研究工作主要围绕着风压时程是否服从高斯分布^[1-2]、Hermite 多项式转换^[3-4]和累积概率函数映射^[5]等方面展开,主要有峰值因子法^[6]及其改进方法,比如 Sadek-Simiu 方法^[7]和 Kwon-Kareem 方法^[8]等。现有确定的数学模型不能很好拟合建筑物表面非高斯风压时程的概率分布,主要有两方面原因,其一,现有的概率模型大多是一种有着良好数学性质的过程(分布),但是它们在实用中都过于理想化了。围护结构的抗风设计关注点基于极值风压的概率分布给出具有一定保证率的设计风荷载^[9-10]。实际上,极值风压的极值分布不完全依赖于母体风压时程的概率分布,它只与母体风压时程分布的尾部形状有关,而与中部形状无关。因此,采用风压时程母体分布来估计极值风压的方法得到的峰值因子会出现较大的误差。其二,目前常采用的峰值因子法假定建筑物上的脉动风压服从高斯分布是不准确的,这是因为受建筑物本身复杂外形和周围建筑的干扰,来流在建筑物上的分离、再附、漩涡脱落形成特征湍流^[11-12]以及在高端流风场条件下,建筑物局部的脉动风压表现出强烈的非高斯特性,风压时程序列表现出明显的不对称分布并带有间歇性负压大幅度脉冲,基于高斯假定计算得到的峰值因子会小于实际风压极值^[13-14],使建筑覆面设计存在安全隐患。

采用极值理论的方法来估计风压极值可以有效地避免上述方法所面临的问题。极值方法直接以风压时程分段极值概率分布为研究对象,通常建筑物表面风压系数极值的概率分布符合极值Ⅰ型和极值Ⅲ型,符合极值Ⅱ型情况较少。国内外学者对脉动风压非高斯峰值因子的计算模型和确定方法提出了不同的改进,如文献[1]提出的峰值因子改进法、Sadek-Simiu 过程转换法^[6]等,但是还不能完全解决非高斯风压时程序列概率分布拟合不准确的问题。由于上述极值方法不受风压时程概率分布的影响,能够避免拟合不准确的问题。传统的逐步搜索算法可以用于求解非高斯风压峰值因子,但是存在收敛速度慢的问题。本文在此基础上提出了一种快速计算非高斯风压峰值因子的数值方法,并以上海环球金融中心表面风压时程为算例,通过与几个典型算法对比验证了算法的有效性。在本文算法结果的基础上研究了脉动风压概率特性,进行偏度系数和峰度系数与峰值因子相关性分析,并探讨了不同风向角下峰值因子的变化规律,对建筑覆面极值风压的设计提供相关参考借鉴。

1 方法的建立

1.1 快速搜索法求解非高斯风压时程峰值因子

高层建筑围护结构表面的风压时程多为非高斯分布,对于某指定保证率和其对应的峰值因子存在一一对应的关系,因此可以根据风压时程极大值序列 \hat{C}_P 和极小值序列 \check{C}_P 确定双边保证率模型,模型的建立过程见图 1,模型可用公式(1)表示。

$$f(K) = P\{C_{P\text{mean}} + KC_{P\text{rms}}\} - P\{C_{P\text{mean}} - KC_{P\text{rms}}\} - P_{\text{fix}} = 0 \quad (1)$$

式中: K 为峰值因子; $C_{P\text{mean}}$ 和 $C_{P\text{rms}}$ 分别为风压系数的均值和方差; P_{fix} 为关于均值对称的正负极值风压系数间的保证率。

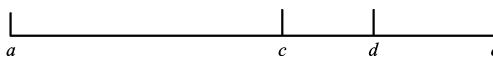


图 1 采用黄金分割法确定求解区间

Fig. 1 Determining solution interval with golden section method

本文针对公式(1)提出了计算非高斯风压时程峰值因子的数值解法。令 $x=k$, 用快速搜索法求解方程 $f(x)=0$ 的数值解。本文对传统的求解算法进行改进, 在数据解可能存在的数值范围内通过黄金分割法确定一个较小的求解区间, 再采用灵活的快速搜索算法搜索更小的存根区间, 在传统求解过程中把求解区间分为若干个固定小区间, 通过区间两端函数值符号判断逐步搜寻到较小的存根区间, 本文算法可以采用更加灵活的区间划分方法, 从而快速求得模型(1)的解。黄金分割法简单介绍如下:

(1) 对于初始区间 $[a, e]$, 精度要求权值 $\omega > 1$, 黄金分割系数 $T=0.618, k=1$ 。

(2) 令 $c=a+(1-T)(e-a), d=e-(1-T)\cdot(e-a)$, 计算 $f_c=f(c_1), f_d=f(d_1)$ 。

(3) 若 $e(k+1)-a(k+1) > \omega$, 转到步骤(4), 否则停止搜索, 得到的结果为 $[a(k+1)+e(k+1)]/2$ 。

(4) 若 $f_c < f_d$, 转到(5), 否则转到(6)。

(5) $a(k+1)=a(k), e(k+1)=d(k), d(k+1)=c(k), f_d=f_c, c(k+1)=a(k+1)+(1-T)[e(k+1)-a(k+1)]$, 计算 $f_c=f[c(k+1)]$, 转到(7)。

(6) $a(k+1)=c(k), c(k+1)=d(k), e(k+1)=e(k), f_e=f_d, d(k+1)=e(k+1)+(1-T)[e(k+1)-a(k+1)]$, 计算 $f_d=f[d(k+1)]$, 转到(7)。

(7) 令 $k=k+1$, 返回(3)。

本文提出的快速搜索法示意图参见图 2。

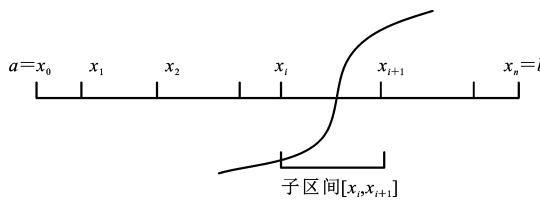


图 2 快速搜索法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fast search method

以下是用快速搜索法求解方程 $f(x)=0$ 的主要步骤:

(1) 在整体的求解区间上采用黄金分割法确定较小的求解区间 $[a, b]$, 本文采用二分法的迭代次数为 2。本文取为 $[0, 100]$, 把 $[a, b]$ 随机分为 n 份, 分位点为 x_i , 给循环变量赋初值 $i=0$, 给定精度 $\epsilon=1\times 10^{-5}$ 。

(2) 令区间端点 $a_0=x_i, b=x_{i+1}$ 。

(3) 如 $f(a)f(b)=0$, 则 a, b 其中之一为 $f(x)$ 的根。

(4) 若 $f(a)f(b)>0$, 则说明本子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 无解, 搜索下一个子区间 $[x_{i+1}, x_{i+2}]$ 。下一个子区间的长度根据 $f(a)$ 和 $f(b)$ 的值计算得到, 权值 ω 调整为 $\omega|x_{i+1}-x_i|$, 而不是采用原始的等分方式。

本文中权值 $\omega=1-\text{sign}[f(b)]\frac{f(a)-f(b)}{|f(a)|+|f(b)|}$ 。

(5) 若 $f(a)f(b)<0$, 则说明本子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 有解, 舍弃其他子区间, 在区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 继续应用快速搜索法。

(6) 判断是否达到精度 ϵ , 若 $|a-b|<\epsilon$, 则得到零点近似值 a (或 b), 否则循环变量 $i=i+1$, 重复(2)~(6)步。搜索过程中步长 h 选择的足够小就能得到满足期望精度的解。

快速搜索法是基于可靠度理论给定某保证率下算出的峰值因子和风压极值, 其特点是:①以极值分布为研究对象, 不依赖于风压时程序列母体分布, 避开了第一类方法的不足, 能适应任何非高斯分布;②用基于快速搜索法的数值手段可以无限接近风压时程的真实分布, 比采用固定的概率模型计算更加灵活, 不拘泥于概率分布模型的具体数学解析表达式, 用数值方法建立样本极值概率模型, 因此计算结果误差比后者小得多;③快速搜索法采用了灵活的搜索分段长度, 比传统的搜索算法收敛更快。

1.2 基于重标极差分析的分段方法

经典极值理论是以独立同分布为前提, 用快速搜索法估计峰值因子之前, 需要根据风压时程建立独立样本极值序列。水力学中的重标极差分析法可以用来检测风压时程的长期记忆性, 判定长期记忆性行为消失点, 并以该节点作为分段时长, 以保证分段风压时程的独立性。“重标极差分析法”的基本原理在本文中不再赘述, 仅对算法用到的数学表达进行描述。在研究中用观察值的标准差 S 去除极差 R 得到一个量纲一的比率, 称为 R/S 统计量。假设 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ 为风压时程, 时程长度为 W , 对应时间为 T' 。把 C 划分为 $m=T'/t$ 个相邻的分段, $C=\{C^{(1)}, C^{(2)}, \dots, C^{(m)}\}$, 则每个分段 $C^{(k)}(n)=\{c_{(k-1)\cdot n+1}, \dots, c_{k\cdot n}\}$, $k=1, 2, \dots, m$, 对应容量为 $n=W/m$ 。那么对于风压时程 C 而言, 分段长度为 n 时, 第 k 个分段的 $R/S^{(k)}(n)$ 统计量为

$$R/S^{(k)}(n)=R^{(k)}(n)/S^{(k)}(n) \quad (2)$$

式中: $R^{(k)}(n)$ 为第 k 个分段风压的极差; $S^{(k)}(n)$ 为

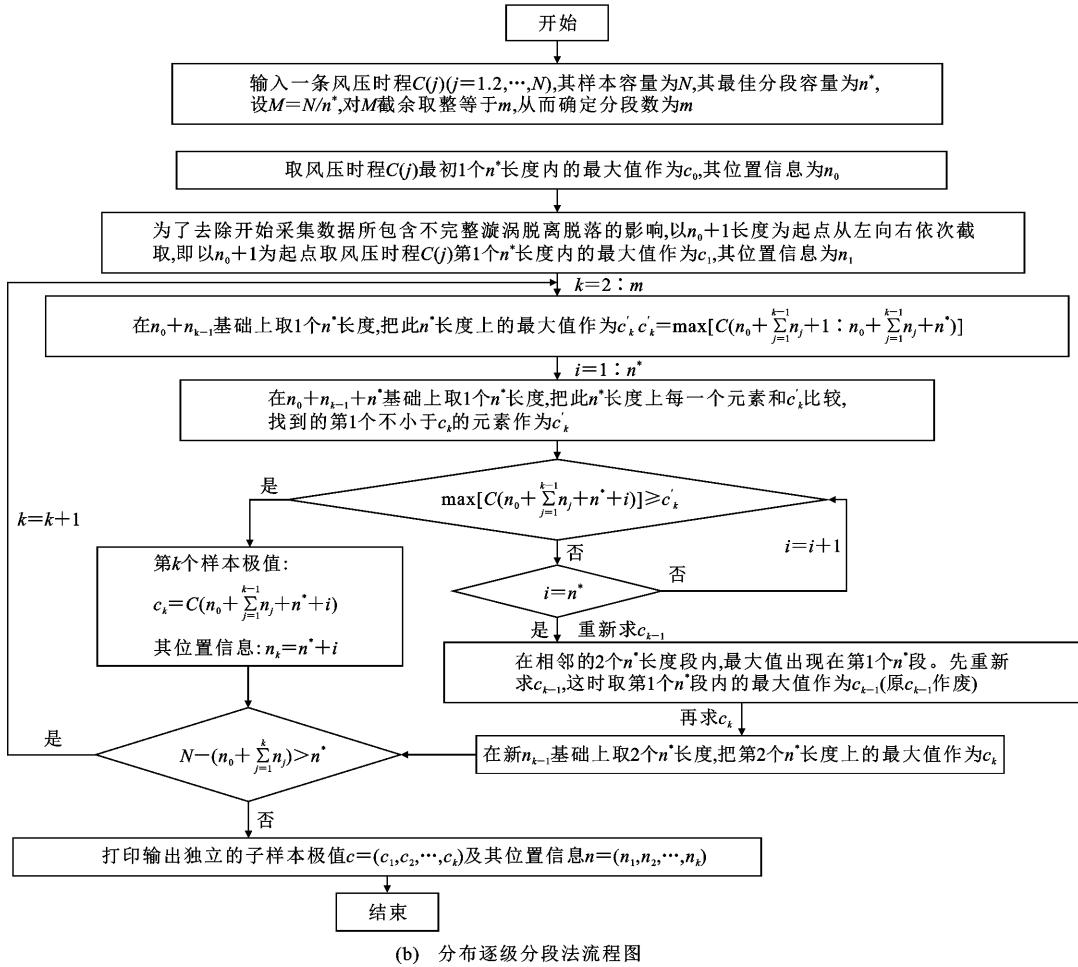
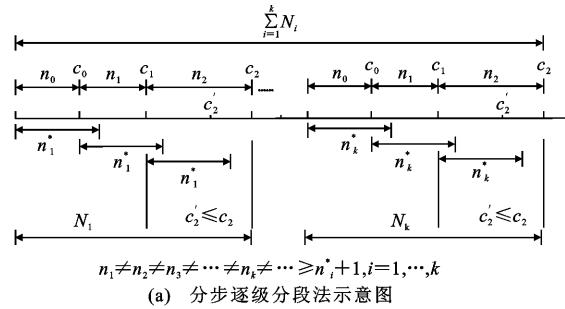


图 3 分布逐级分段法示意图和流程图

Fig. 3 Sketch map and flow chart of distributed gradual piecewise method

第 k 个分段风压的标准差。

分段长度为 n 时, 风压时程 C 的 $R/S(n)$ 统计量为

$$R/S(n) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R/S^{(k)}(n) \quad (3)$$

通过统计量 $Q(n) = (R/S)_n / \sqrt{n}$ 和 $\lg(n)$ 的关系曲线上 $Q(n)$ 的值由上升转为下降或保持不变时确定的 n 值^[15-16] 确定为样本容量 n^* , 将 n^* 作为子样本的风压时程分段长度。本文基于重标极差法, 根据风压时程序列非线性波动的特点提出了分布逐级分段法。

1.3 用于峰值提取的逐级分段法

采用逐级分段法(图 4)将风压时程序列按最佳分段容量 n^* 等分为若干子区间, 从每个子区间中选取最大值或最小值(统称为极值)构成极大值时间序列或极小值时间序列(统称为极值风压时间序列)。逐级分段法的思想是源于统计学中的时间间隔法(intervals method)^[17-18], 由于每个分段极值出现的位置是随机的, 故相邻子样本间的数据间隔有可能小于最佳分段容量 n^* , 通过合理选择子样本能够保证提取的峰值具有统计独立性^[19-20]。

传统上, R/S 分析是对整个时间序列进行的拟

合分析,上述逐级分段法中的最佳分段容量也是由整个时间序列求得。由于风压时程序列时间序列波动呈现非线性,同时极易受到各种因素的影响,呈现出明显的非高斯特性,所反映的实际系统的特征往往具有复杂性,在跨越较长的时间之后,数据许多特征都可能发生变化。因此根据模型(3)求解最佳分段容量可以进一步优化为

$$\left. \begin{array}{l} R/S(1:t_1)=C_1 t_1^{H_1} \\ R/S(t_1+1:t_2)=C_2 (t_1-t_2)^{H_2} \\ \vdots \\ R/S(t_{k-1}+1:t_k)=C_k (t_k-t_{k-1})^{H_k} \end{array} \right\} \quad (4)$$

可以将整个风压时程序列分为 k 分段, t_i ($i=1, 2, \dots, k$) 为分段节点, 在每段内用逐级分段法, 相应在每段 t_i 内得到一个最佳分段容量 n_i^* 和 Hurst 指数 H_i ($i=1, 2, \dots, k$)。在不同的分段内采用逐级分段法, 这里称为分布逐级分段法。设有风压时程 $C(j)$ ($j=1, 2, \dots, N$), 其样本容量为 N , 最佳分段容量为 n^* 。从风压时程 $C(j)$ 左端开始依次逐步向右截取, 见图 3(a), 技术路线图参见图 3(b)。按照同样的步骤取最小值就可得到独立极小值序列。

分布逐级分段法要满足以下几个条件:

(1) 在每个分段内, 使子样本极值 c_k ($k=1, 2, \dots, m$) 为每个分段区间的极大值或极小值, m 为 N/n^* 截余取整后的最大正整数。

(2) 在每个分段内, 为了去除样本数据受不完整漩涡脱落的影响, 把最初 1 个 n^* 长度段最大值(或最小值)和其之前的数据去除。

(3) 在每个分段内, 对数据时程内部信息提取越详细, 所估计的极值就越能体现原始时程数据的内在特性。在满足条件(1)的前提下, 使间距尽量小, 以获得尽量多的子样本。

(4) 由于起控制作用的风压极值绝大多数为负, 故以极小值时间序列为对象的计算更具控制性。

2 风洞试验

2.1 风场模拟

本文以上海环球金融中心为研究对象, 其刚性模型分组同步测压风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行, 该风洞试验段尺寸为宽 3 m、高 2.5 m、长 15 m, 试验风速范围为 $0.5 \sim 68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 连续可调, 湍流度小于 0.5%, 按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)中的规定模拟了 C 类地貌的平均风速剖面(图 4, 其中 Z/H_G 为相对高度, Z 为绝对高度, I_u 为

湍流强度, U_z/U_G 为相对风速, $nS_u(n)/u^2$ 为功率谱密度, $nZ/U(Z)$ 为相对频率), 按日本建筑规范(AIJ)中的规定模拟了 C 类地貌的顺风向湍流度剖面。

2.2 试验模型

刚体测压模型如图 4(a)所示, 测压信号采样频率为 312.5 Hz, 采样时间间隔为 3.2×10^{-3} s, 每个测点一次采集 6 000 个数据, 每次采样时间为 19.2 s, 本试验对同一工况模型上 1 530 个测点采集了 3 组共 9 个标准样本(一个标准样本对应实际时距 10 min, 换算为试验时距为 6.40 s)。由于电子扫描阀上的通道数有限, 不能所有测点同步进行采集, 因此分 A、B、C、D 四组进行, 分组情况、模型截面的特征尺寸以及表面压力测点布置情况如图 5 所示。

试验总共有 1 530 个测点, 分为 41 层。计算分析选 A、C 组共 808 个测点, 为其中的 23 层。由于随高度每层 28~40 个测点不等, 测点排序顺序一致。在后文中以 $L-i$ 表示各测点($L=1, 2, \dots, 41$, $i=1, 2, \dots, 40$), 其中 L 表示层数, i 表示该层的第 i 个测点, 例如 41-13 表示第 41 层第 13 个测点。

2.3 试验条件

模型总高度为 1.4 m, 几何缩尺比 $\lambda_L = 1/350$, 相当于实际建筑 492 m 高。参考点试验风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 参考高度为 1.2 m(位于梯度高度之上, 相当于实际 420 m 高度), 距风洞侧壁约 1.0 m。参考点处对应的实际风速若根据重现期 50 年上海的 C 类地貌基本风压转换则为 $52.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风速比 $\lambda_v = 0.2645$, 根据量纲分析法导出时间比 $\lambda_t = \lambda_L/\lambda_v = 0.0108$ 。本文刚性模型同步测压风洞试验的模型方位、风向角及坐标轴定义如图 4(b)所示。

3 结果分析与验证

3.1 脉动风压的概率特性

非高斯信号通常采用信号的高阶矩(特别是三阶和四阶统计量)对概率密度函数的特征进行描述^[21]。三阶和四阶中心矩分别称为偏度和峰度。本文采用第 5 测点层的测点为例说明算例中脉动风压的概率特性, 第 5 测点层的测点布置及风向角关系见图 6。图 7 给出了 90°风向角下有代表性的几个测点风压时程概率特性图, 其中的概率密度分布图增加一条红色曲线, 该曲线是利用原始曲线数据的平均值和标准差生成的正态分布曲线, 以方便和非高斯的原始数据曲线比较; 蓝色线为直线 $y=0$ 。由图 7(a)、(c)、(d)可知: 侧风面、背风面、背风面的

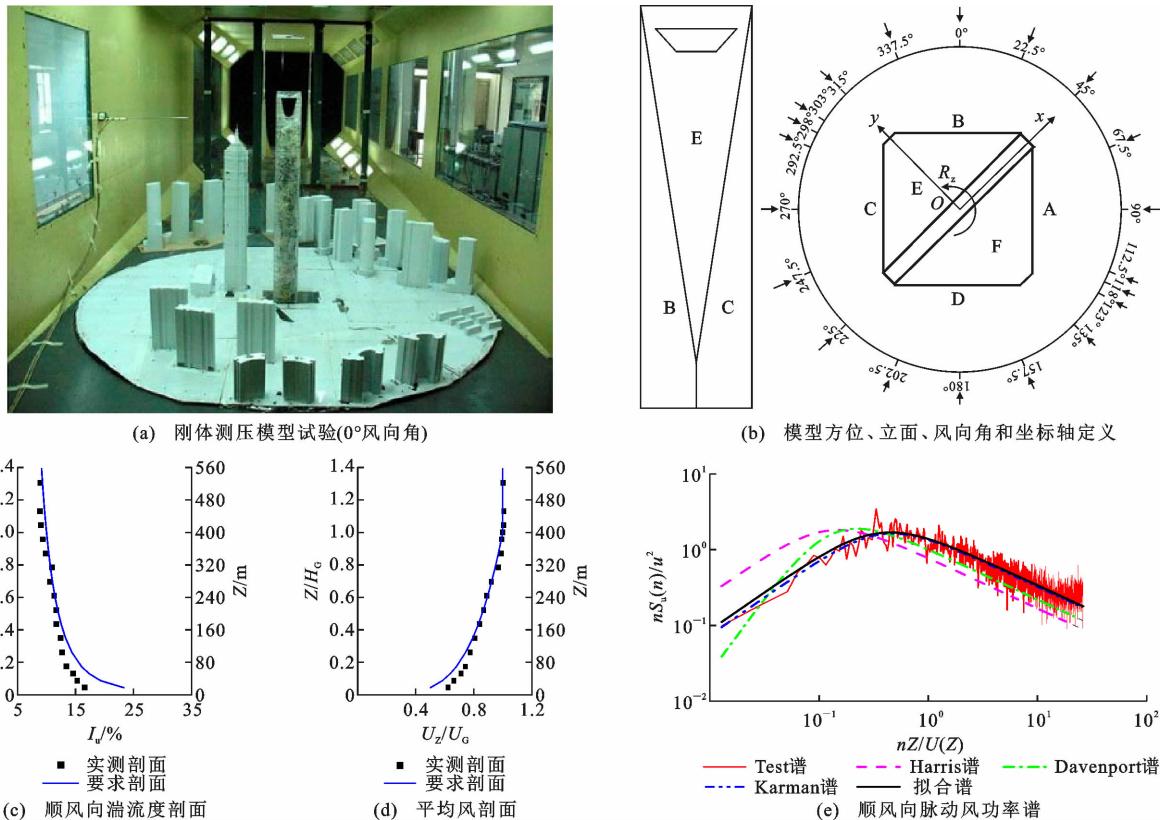


图4 试验模型

Fig. 4 Experimental mode

切角区负压脉冲明显,存在明显的非高斯特性。在时域上的表现为:脉动风压关于均值线呈不对称分布且有间歇出现的大幅度负压脉冲。在幅域上表现为:概率密度函数在横轴负区,明显偏离了高斯分布,曲线衰减比高斯分布曲线慢,存在明显的“拖尾”现象,在横轴正区与高斯分布近似吻合或者也不吻合。由图7(b)可知,迎风面的切角区正压脉冲明显,存在明显的非高斯特性。在时域上的表现为:脉动风压关于均值线呈不对称分布,且有间歇出现的大幅度正压脉冲。在幅域上表现为:概率密度函数在横轴正区,明显偏离了高斯分布,曲线衰减比高斯分布曲线慢,存在明显的“拖尾”现象,在横轴负区与高斯分布也不吻合。以上概率密度曲线横轴负区或者正区存在的“拖尾”现象主要是因局部构件破坏的大幅度脉冲造成的,这种“拖尾”形成的局部偏导致出现了比高斯分布更大的极值。图7(e)中迎风面状态近似高斯状态,即时域上脉动风压关于均值线对称分布,幅域上概率密度曲线与均值方差的正态分布几乎重合。风压非高斯特性的强弱随着风向角、测点位置的不同而不同。当测点处于来流区时往往呈高斯分布,如在90°风向角下的测点5-13;当测点处于气流分离区时表现出明显的非高斯特性,

如在90°风向角下的测点5-17。由于风压时程中严重不对称的高尖刺使得风压的概率曲线严重偏离了高斯分布,这是使风压呈现非高斯特性的主要原因。集中于均值两侧对称取值的样本出现较多,峰度高;远离均值两侧对称取值的样本出现也较多,峰度低。测点5-4的峰度值为5.659,测点5-13的峰度值为3.773,从图7(a)、(e)中可以看出测点5-4的概率密度曲线更加“尖峭”。概率密度分布是否具有绝对值较大的超越峰度(标准峰度系数减去3)与风压时程中样本对称出现在均值线附近的集中程度相关。偏度系数用以刻画概率密度分布曲线相对于平均值的不对称程度。

3.2 峰值因子及其误差率随风向角的变化

本文算例建筑形体较复杂,测点较多,为了抓住主要矛盾突显趋势性规律,选择测点5-17为研究对象。主要因为:第5测点层(高度212 mm,对应实体建筑高度74.5 m)截面为规则的近四边形;5-17测点是比较典型的测点,第5测点层的横截面及风向角关系见图6(a),在90°风向角下其处于分离点位置,而在225°风向角下其处于尾流中心位置(侧风面受分离流影响,背风面受尾流影响)。为了从总体上评价不同方法的峰值因子与观察值的接近程

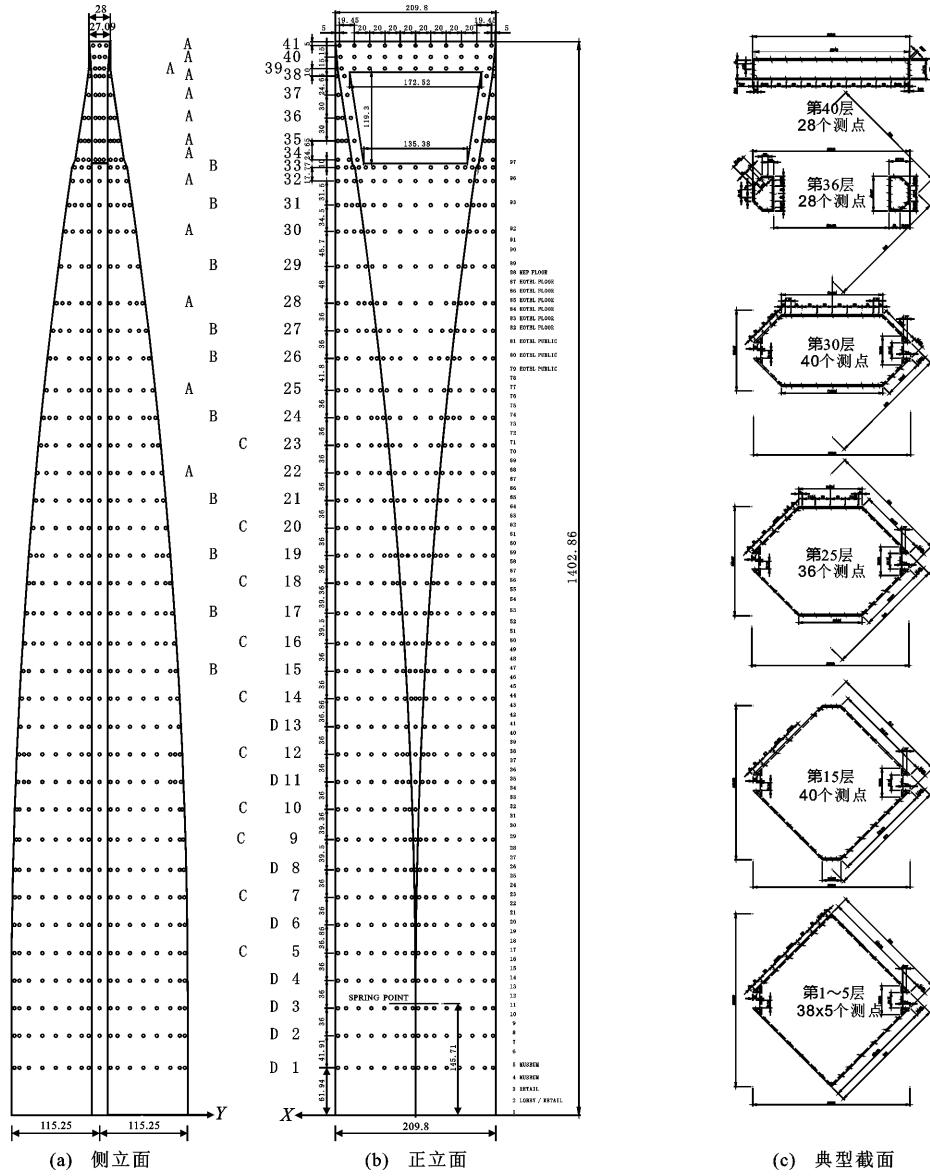


图 5 上海环球金融中心测压模型测点布置(单位:m)

Fig. 5 Layout of measuring points of pressure measurement model of Shanghai Global Financial Center (unit:m)

度,首先定义测点 i 的误差率 ϵ_i 为

$$\epsilon_i = \frac{K^p(i) - K^o(i)}{K^o(i)} \quad (5)$$

式中: $K^p(i)$ 为用方法 m 计算的测点 i 的峰值因子; $K^o(i)$ 为测点 i 的观察峰值因子。

公式(5)一般用于单个测点,对于多个测点的总体误差率的评价使用平均误差率,定义为一批测点误差率平方和的均值再开平方。

图 8 给出了 5-17 测点各方法峰值因子及其误差率随风向角的变化情况,先以极小值序列的图 8(c)、(d)进行讨论。 $0^\circ \sim 67.5^\circ$ 风向角时测点 5-17 处于迎风面,由于风压近似服从高斯分布,峰值因子法与观察值相当,误差较小,快速搜索法、Ka-

reem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法能很好地计算其峰值因子; $90^\circ \sim 315^\circ$ 风向角时测点 5-17 位于侧风面以及背风面时,风压不再满足高斯分布,峰值因子法计算的结果与观察值差别较大,快速搜索法、Kareem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法却能很好地适应这些非高斯区的峰值因子计算,尤其是快速搜索法、Sadek-Simiu 法更准确。另外快速搜索法、Kareem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法计算的峰值因子在 $4.5 \sim 7.3$,而峰值因子法计算的峰值因子约为 3.5。如图 8(d)所示,快速搜索法误差率最小且结果为正,是偏安全的。与其他方法相比,基于高斯分布假定的传统峰值因子法计算得到的峰值因子偏低,峰值因子随风向角的变化很小。 90° 风向角对应的快速搜索法、

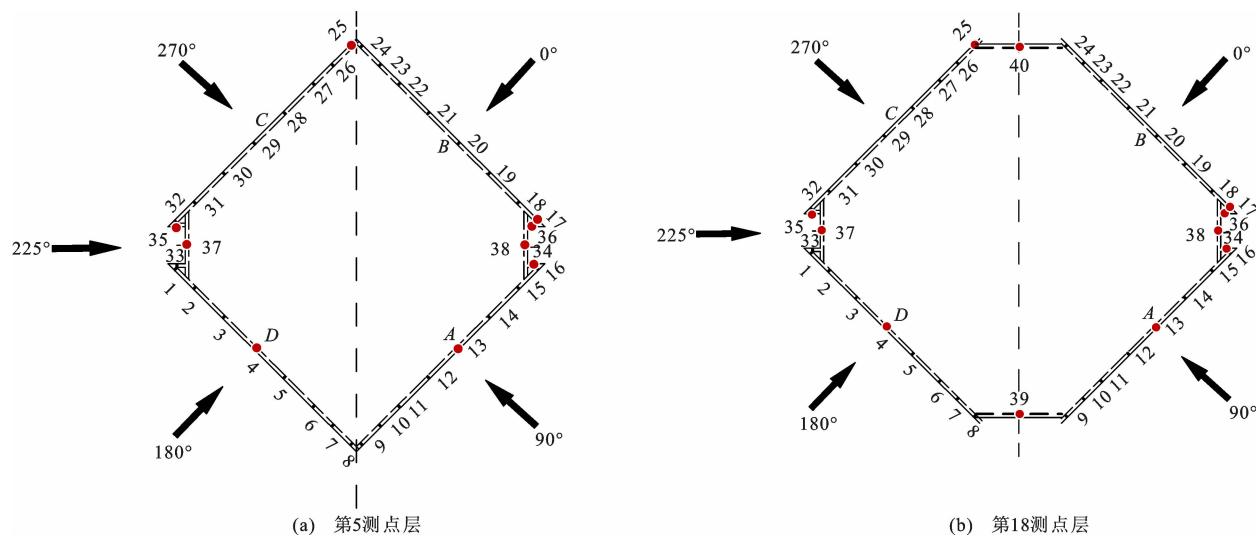


图 6 第 5、18 测点层的横截面及风向角关系

Fig. 6 Cross-section and relationship of wind direction angle of the 5th and 18th measuring point layers

Kareem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法计算的峰值因子最高达 7.3 左右, 均比较大[如图 8(c)中左侧圈起来的部分], 此时测点 5-17 位于侧风面分离点附近位置, 处于侧风面漩涡脱落区测压点的时程数据偏离均值较大, 负压极值较大, 表现出较强的非高斯性。此工况的峰值因子法结果偏离观察值较远, 误差率中出现尖峰[图 8(d)中左侧圈起来的部分]。225°风向角对应的快速搜索法、Kareem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法计算的峰值因子最高达约 7.2, 均比较大[图 8(c)中右侧圈起来的部分], 此时测点 5-17 位于背风面尾流中心, 此处负压脉冲明显, 变化较快, 非高斯特性显著。测点 5-17 在 225°风向角时的峰值因子在 6.6~7.4 之间, 在 270°风向角时的峰值因子为 4.8~6.0, 因此 2 个背风面交界处 45°风向角测点的峰值因子大于 2 个背风面交界处 0°风向角高斯特征最强测点的峰值因子。此工况下峰值因子法的结果偏离观察值较远, 误差率中出现尖峰[图 8(d)中右侧圈起来的部分]。180°风向角对应的快速搜索法、Kareem-Zhao 法和 Sadek-Simiu 法计算的峰值因子也相对相邻的两工况出现局部尖峰[图 8(c)中间圈起来的部分], 此时测点 5-17 位于背风面, 受尾流影响较大, 同 225°风向角下处于背风面的测点 5-17 具有较强非高斯性的规律类似。225°风向角下中测点 5-17 恰恰处于尾流中心, 180°风向角下测点 5-17 只是受尾流影响, 前者非高斯性强过后者, 这两种风向角下的风压极值需特别关注。本文提出的快速搜索法能够得到和 Sadek-Simiu 法比较一致的峰值因子, 平均相对误差小于 10%。峰值因子随风向角的变化规律也和 Sadek-Simiu 法有

很好的一致性, 表现出对风向角的敏感性。综合以上分析可以发现, 不同风向角下, 同一位置测点峰值因子及其误差率与 Davenport 峰值因子法相比表现出不同的偏离程度, 即同一位置测点脉动风压极值是否符合高斯分布与来流风向角密切相关。

对于分段后提取的独立极值序列, 会分别得到极大值风压时程和极小值风压时程。通过极大值风压时程计算出测点风压系数极大值期望值(或其他分位点对应的极大值); 通过极小值风压时程计算出测点风压系数极小值期望值(或其他分位点对应的极小值)。取两者中绝对值较大的极值期望值(或极值)作为最不利风压系数极值估计结果。对比极大、极小值序列的误差率可以看出, 极大值序列结果总的变化趋势和极小值序列是一致的, 极小值风压时程(最不利负压系数时程)对应结果的非高斯性特性比极大值风压时程(最不利正压系数时程)更强。一般情况下, 对于同一保证率, 极小值风压时程负极值的绝对值比极大值风压时程正极值的绝对值要更大些。一般情况下, 设计极值由极小值风压时程控制。虽然给定保证率的正、负极值(除与峰值因子有关外)与均值、均方差都有关, 极大值序列和极小值序列的正、负极值共 4 个, 也对应有 4 个或 2 个峰值因子; 一般情况下, 极小值序列的负极值对应的峰值因子会比极大值序列的正极值对应的峰值因子要大些。一般情况下, 极小值序列结果的离散性(波动性)比极大值序列对应工况的离散性要大。极小值序列结果误差率均值的绝对值比极大值序列对应工况的要大。

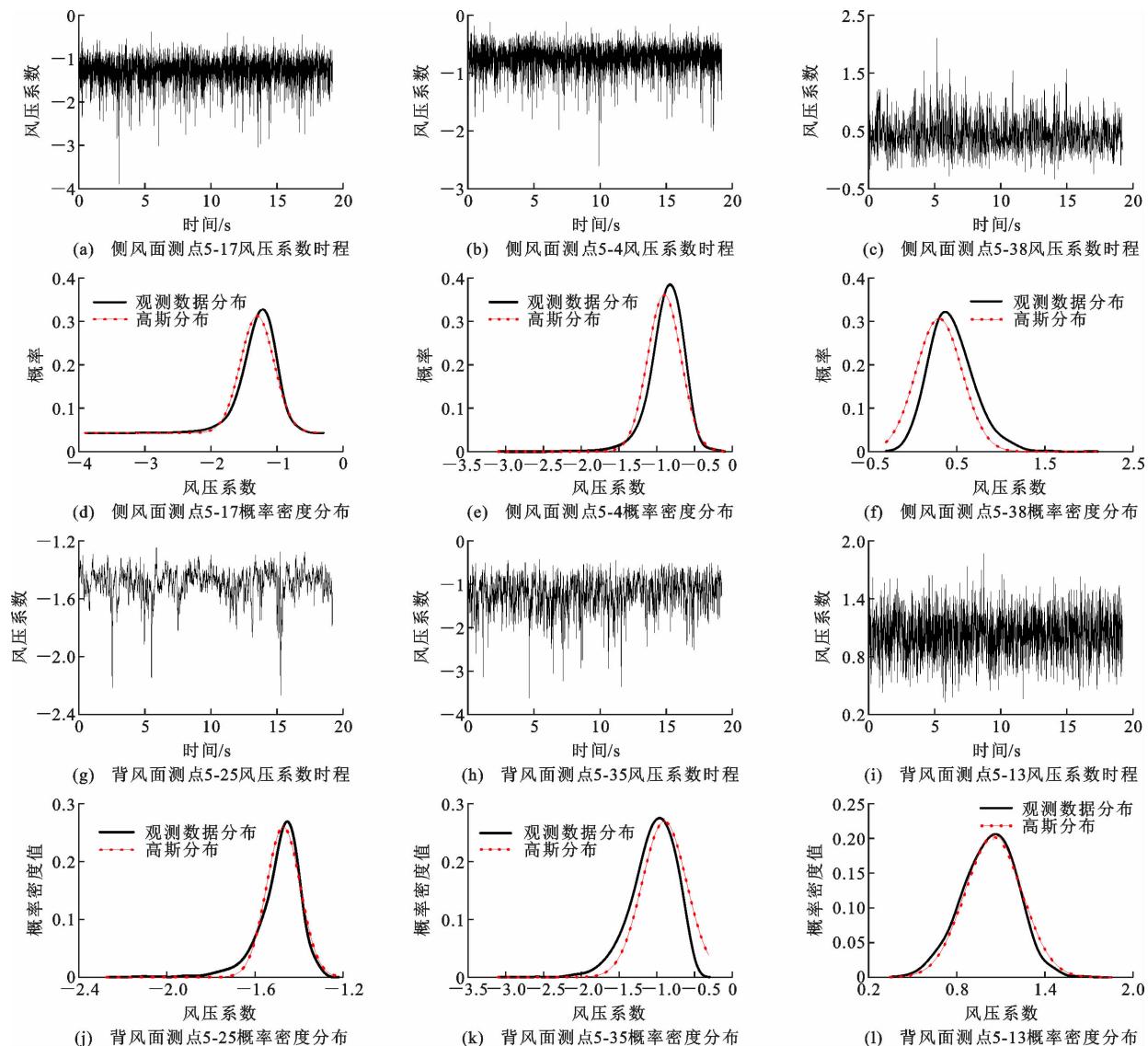


图 7 90°风向角下第 5 测点层典型测点风压系数时程和概率密度分布

Fig. 7 Time history and probability density distribution of wind pressure coefficient of typical measuring points of the 5th measuring point layer at 90° wind direction angle

3.3 各计算模型峰值因子比较

本文选取 90°风向角下第 5、18 测点层的试验数据进行分析比较,其横截面及风向角关系如图 6 所示。第 18 测点层共有 40 个测点,前 38 个测点位置和第 5 测点层位置一致,取前 38 个测点进行计算比较。图 9 给出了第 5 测点层和第 18 测点层各计算峰值因子与观察峰值因子的比较,图 10 给出了各计算方法下所有 808 个测点的峰值因子对观察值的偏离图。从图 9、10 可以看出:各方法的结果均明显大于基于 Davenport 理论的计算结果,其值约等于 3.5,这与规范的建议结果非常一致,图 9(a)中左下侧圈起来的部分为迎风面(测点 9~16),是各方法估计结果最为接近的区域;总体而言,快速搜索法、

Kareem-Zhao 法、Sadek-Simiu 法的估计值比观察值大,本文快速搜索法是最接近观察值的;对于大部分测点,在侧风面的非高斯区域,快速搜索法和 Sadek-Simiu 法计算得到的峰值因子相对其他方法更靠近观察值;基于可靠度理论的快速搜索法所估计的峰值因子和 Sadek-Simiu 法得出的期望峰值因子有较好的可比性。Kareem-Zhao 法大多数测点高估了峰值因子,相当于峰值因子的上包络,偏差的原因有两点:其一是基于高斯空间到非高斯空间的 Hermite 多项式转换模型存在误差;其二是基于母体分布的估计方法受样本不确定性影响,此影响随其统计阶数的增加而增大,因而考虑统计阶数越多的估计方法其结果误差性也会越大,而基于 Her-

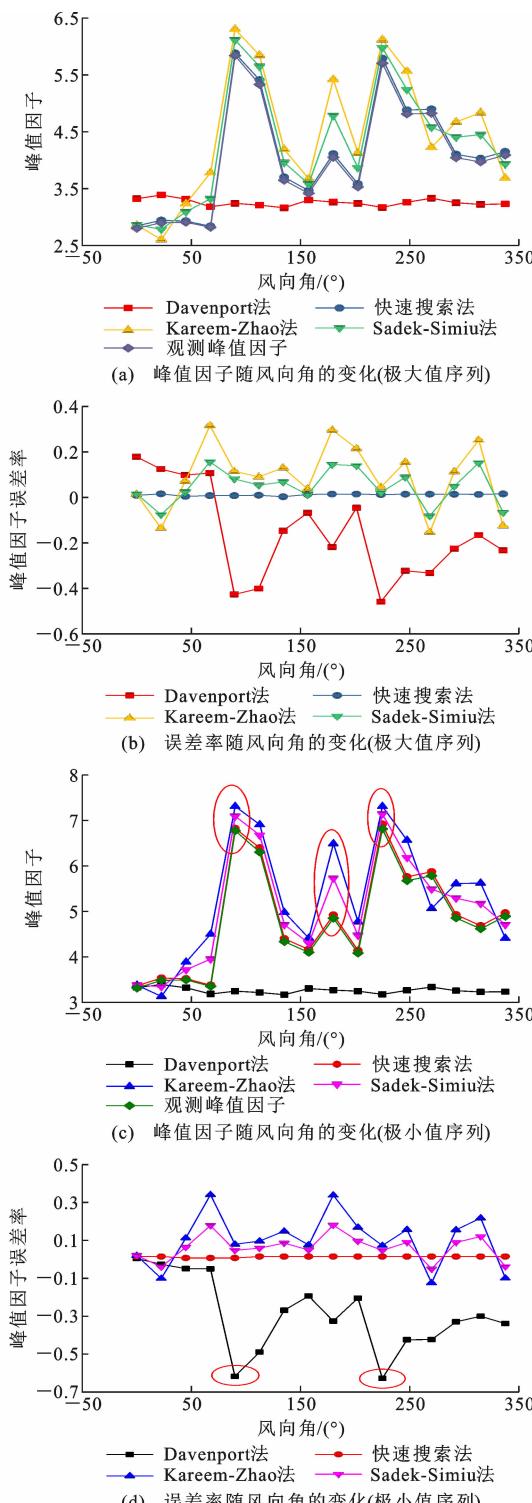


图8 测点5-17各方法峰值因子及其误差率随风向角的变化

Fig. 8 Variation of peak factor and error rate of each method of measurement point 5-17 with wind direction angle

多项式的峰值因子计算方法(如Kareem-Zhao方法)与非高斯过程的高阶矩密切相关。侧风面(测点1~8, 17~24)、背风面(测点24~32)各方法峰值因子明显比迎风面(测点9~16)高斯区域估计值

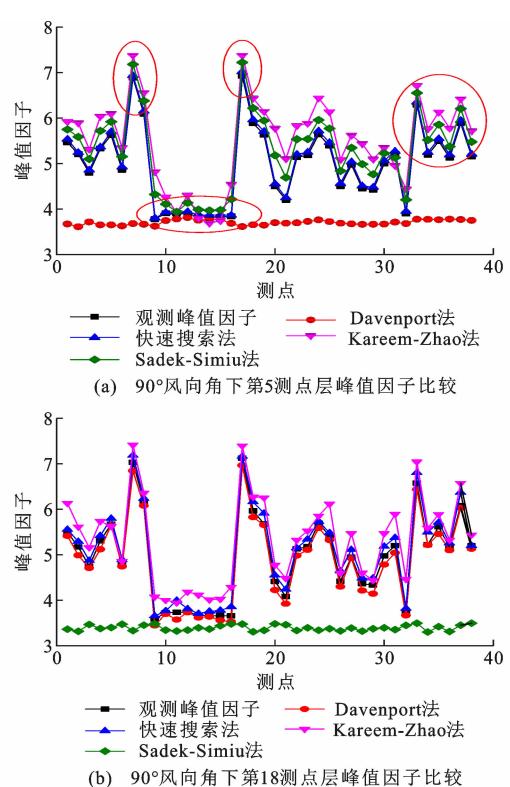


图9 90°风向角下峰值因子比较

Fig. 9 Comparison of peak factor at 90° wind direction angle

大,这是由于背风面受尾流影响存在复杂的尾流中心,此处负压脉冲明显,极值较大,变化较快,非高斯特性显著;侧风面受来流分离、再附、漩涡脱落的影响均表现为极强的非高斯特性;对迎风面而言,风向与测点覆面法线夹角变小,测点受风面增大,风压效应均匀化,负压极值减小,表现出高斯特性或近高斯特性。90°风向角时,第5测点层的33、35、37测点在背风侧的切角凹区,沿侧壁滚动向前脱落的漩涡进入切角凹区形成尾流区,此处偏度、峰度变化跨度大,负压脉冲明显,吸力大,非高斯特性显著;34、36、38测点在迎风侧的切角凹区,形成兜风区,在切角前缘分离的气流在切角的下边缘受到阻碍,同时受到后续来流的干扰作用,使前后来流出现挤压效应和高速回旋,高阶统计量变化梯度大,湍流强度较大,正压脉冲明显,处于强非高斯状态(图9(a)中最右侧圈起来的部分)。从图9(b)可以看出,本文算法应用于第18测点层的结果中,几种算法的峰值因子和观测峰值因子偏差顺序和图9(a)一致,由于测点排序位置相同,相同测点受到的风压情况类似,结果分析和第5测点层类似,这里不做赘述。以上结果说明本文算法对低层和200 m以上的高层位置测点是同样有效的。

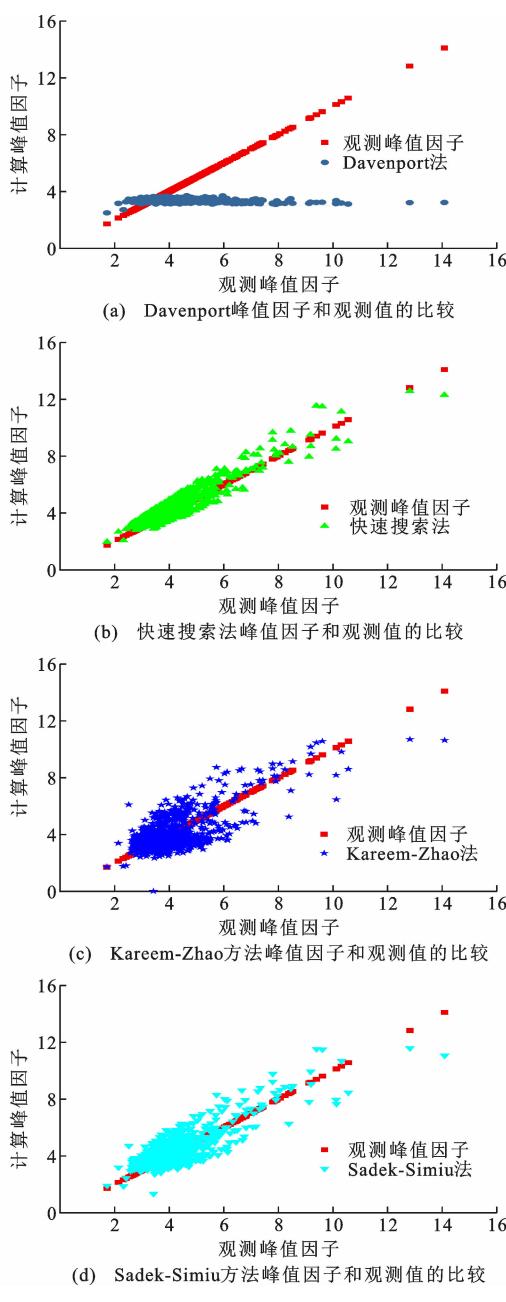


图 10 90°风向角下 808 个测点不同方法计算的峰值因子

Fig. 10 Peak factor of 808 measurement points calculated by different methods at 90° wind direction angle

3.4 平均误差率分析

根据测点误差率的定义,表 1 给出了不同计算方法峰值因子的平均误差率。估计值结果落点在观测值上方,则误差率为正,说明计算值比观察值大,偏保守,不经济;估计值结果落点在观测值下方,则误差率为负,说明计算值比观察值小,偏危险,不安全。快速搜索法的峰值因子误差较其他几种方法都小,对于不同样本其与观测值均较为接近,且大致分布于观测值两侧,离散程度较小;离散性由小到大的

排序为快速搜索法、Sadek-Simiu 法、Kareem-Zhao 法、Davenport 法。基于 Davenport 理论的计算峰值因子对绝大部分测点偏于不安全;采用 Davenport 法给出的估计结果误差率普遍要比 Kareem-Zhao 法大,这主要是由于 Kareem-Zhao 法是在 Davenport 法的基础上改进获得的,通过引入高阶矩降低了建筑表面风压时程的非高斯特性对计算结果的影响,Davenport 法仅仅是 Kareem-Zhao 法的特例。如表 1 所示,90°风向角时,各种方法的峰值因子误差普遍较大,原因是此时 2 个迎风面正负 45°,使其测点受风较 0°时非均匀化,负压极值增大;2 个背风面正负 135°,来流与 135°背风面的分离角近似 45°。135°背风面比侧风面具有更强的非高斯特性,这是因为 135°背风面和来流的夹角更好地迎合了来流的分离、旋涡脱落、再附这一运动趋势,使旋涡运动在 135°背风面上的一致性作用更强烈,故非高斯特性更强烈。快速搜索法的平均误差率基本控制在 10% 之内,其他几种方法峰值因子的平均误差率基本在 20% 以内。总体而言,Davenport 法和 Kareem-Zhao 法平均误差率相对较大。从表 1 的计算值和图 10 的测点散布程度都可看出,平均误差率递增排序为快速搜索法、Sadek-Simiu 法、Kareem-Zhao 法、Davenport 法。需要指出的是,峰值因子法及其改进方法(如 Kareem-Zhao 法)的估计精度与样本是否服从高斯分布密切相关,当脉动风压表现出明显的非高斯特性时,这类方法的估计误差率将大幅增加。

3.5 分段长度与误差分析

极值统计方法是以大量样本为基础的,样本量越大,得到的计算结果越精确。在计算过程中,分段数 n 越大,参与计算的峰值数目则越多,对数据时程内部信息提取越详细,所估计出来的极值结果就越能体现原始时程数据的内在特性。分段数大于某个值时,分段容量小于最佳分段容量 n^* ,导致极值序列独立性受到破坏,在本文提出的逐级分段法中,首先采用基于重标极差分析的分段方法确定最佳分段容量 n^* 。

为了说明分段长度和计算精度之间的关系,本文通过试验验证当分段长度和分段容量 n^* 偏差较大时会造成计算结果误差较大。仍然以测点 5-17 为例,分段长度和误差率的关系见图 11。

4 结语

(1) 风压时程概率密度分布是否具有绝对值较

表 1 90°风向角峰值因子平均误差率

Table 1 Average error rates of peak factor at 90° wind direction angle

方法	Davenport 法	快速搜索法	Kareem-Zhao 法	Sadek-Simiu 法
D 面(左侧风面)峰值因子平均误差率/%	18.36	9.72	16.94	13.92
A 面(迎风面)峰值因子平均误差率/%	14.59	7.71	13.55	11.30
B 面(右侧风面)峰值因子平均误差率/%	18.08	9.88	17.69	13.72
C 面(背风面)峰值因子平均误差率/%	22.48	8.08	19.65	16.78
误差率平均值/%	18.38	8.85	16.96	13.56

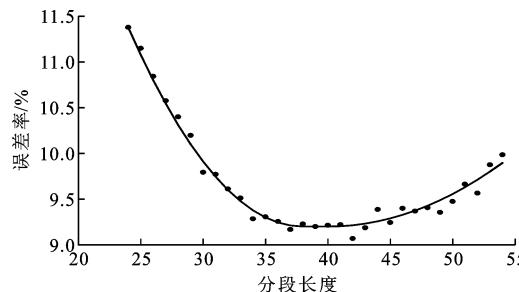


图 11 分段长度和误差率关系

Fig. 11 Relationship between segment length and error rate

大的超越峰度与样本对称出现在均值线附近的集中程度相关。概率密度分布曲线的偏度与所取时距上的风压时程中偏离均值一侧的不对称高尖刺的突起程度相关。在给定时距内,测点高尖刺出现越频繁则偏度绝对值越大。风压时程的非高斯特征强弱与风压时程长度相关。概率密度曲线中的“拖尾”现象导致了比高斯分布更大的极值。

(2)各峰值因子计算方法精度由大到小排序为快速搜索法、Sadek-Simiu 法、Kareem-Zhao 法、Davenport 法。快速搜索法估计值和经典的 Sadek-Simiu 法估计值有较好的可比性,其峰值因子随风向角的变化规律和 Sadek-Simiu 法有很好的一致性,表现出对风向角的敏感性。快速搜索法结果对测点时程的高斯特性与非高斯特性敏感。Kareem-Zhao 法大多数测点高估了峰值因子,相当于峰值因子的上包络。在非高斯区,快速搜索法和 Sadek-Simiu 法有较好的适应性,Kareem-Zhao 法计算得到的结果偏小,误差率最大。

参考文献:

References:

- [1] KAREEM A, ZHAO J. Analysis of non-Gaussian surge response of tension leg platforms under wind loads[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1994, 116(3):137-144.
- [2] PILLAI S N, TAMURA Y. Generalized peak factor and its application to stationary random processes in wind engineering applications[J]. Journal of Wind
- [3] KWON D, KAREEM A. Peak factors for non-Gaussian load effects revisited[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12):1611-1619.
- [4] HUANG M F, LOU W J, CHAN C M, et al. Peak factors of non-Gaussian wind forces on a complex-shaped tall building[J]. Structure Design of Tall and Special Building, 2013, 22(14):1105-1118.
- [5] GRIGORIU M. Applied non-Gaussian process [M]. Englewood: Prentice Hall, 1995.
- [6] SADEK F, SIMIU E. Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128 (5): 530-539.
- [7] HUANG M F, LOU W J, CHAN C M, et al. Peak distributions and peak factors of wind-induced pressure processes on tall building[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(12):1744-1756.
- [8] KWON D K, KAREEM A. Peak factors for non-Gaussian load effects revisited[J]. Journal Structural Engineering, 2011, 137(12):1611-1619.
- [9] KAREEM A, HU L, GUO Y, et al. Generalized wind loading chain: time-frequency modeling framework for nonstationary wind effects on structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145 (10): 4019092.
- [10] 全 涌,姚 博,顾 明.高层建筑结构抗风可靠性研究进展[J].同济大学学报(自然科学版),2015, 43(6):807-815.
QUAN Yong, YAO Bo, GU Ming. Research progress of wind reliability of high-rise buildings[J]. Journal of Tongji university (Natural Science), 2015, 43(6): 807-815.
- [11] KUMAR K S, STATHOPOULOS T. Wind loads on low building roofs:a stochastic perspective[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126 (8): 944-956.
- [12] KAWAI H. Local peak pressure and conical vortex on building[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(4):251-263.

- [13] HOLMES J D. Wind action on glass and brown's integral[J]. Engineering Structure, 1985, 7 (4): 226-230.
- [14] GIOFFRE M, GUSELLA V. Damage accumulation in glass plates[J]. Journal of Engineer Mechanics, 2002, 128(7):801-805.
- [15] PETERS E E. Fractal market analysis: applying chaos theory to investment and economics [M]. New York:John Wiley & Sons,1994.
- [16] 徐龙炳,陆 蓉. R/S 分析探索中国股票市场的非线性[J]. 预测,1999(2):59-62.
XU Longbing, LU Rong. R/S Analysis to explore the nonlinearity of Chinese stock market[J]. Forecasting, 1999(2):59-62.
- [17] FERRO C A T,SEGERS J. Inference for clusters of extreme values[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 2003, 65(2):545-556.
- [18] 罗 颖. 极值理论及其在结构风荷载和响应上的应用[D]. 成都:西南交通大学,2018.
LUO Ying. Extreme value theory and its application on wind load and response of structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [19] 姚 博,全 涌,顾 明. 基于概率分析的高层建筑风荷载组合方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016,44(7):1032-1037,1083.
YAO Bo, QUAN Yong, GU Ming. Combination method of wind load about high-rise buildings based on probability analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016 , 44 (7): 1032-1037, 1083.
- [20] 罗 颖,黄国庆,杨庆山,等. 基于高阶矩的非高斯风压极值计算[J]. 建筑结构学报,2018,39 (2) : 146-152.
LUO Ying, HUANG Guoqing, YANG Qingshan, et al. Calculation of peak non-Gaussian wind pressures based on high-order moments[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(2):146-152.
- [21] 叶 涛. 考虑风向效应的围护结构等保证率分布极值风压计算方法[D]. 上海:同济大学,2017.
YE Tao. Calculation method for distributed extreme wind pressure on building envelope with an identical guarantee rate by considering wind directional effects [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.