

文章编号: 1001-4888(2023)06-0771-10

# 湍流参数影响下高层建筑风压的不确定性研究<sup>\*</sup>

胡阳<sup>1,2</sup>, 李永贵<sup>1,2</sup>, 严佳慧<sup>1,2</sup>, 全嘉<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201)

**摘要:** 极值风压是高层建筑围护结构抗风设计的依据, 本文利用挡板和粗糙元模拟出《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)规定的 C 类风场, 以此为基准, 保持湍流度基本不变, 减小湍流积分尺度得到 CL1、CL2 风场; 保持湍流积分尺度基本不变, 增大湍流度得到 CI 风场。在 4 类风场下对高层建筑模型均进行了 500 次重复采样试验, 通过试验研究了湍流参数影响下高层建筑风压不确定性的基本规律, 并确定了满足工程应用的极值风压所需的采用次数。结果表明, 湍流度的增大导致高层建筑极值风压的变异系数增大, 而湍流积分尺度对极值风压的变异系数的影响基本可以忽略; 风压的变异系数达到稳定所需的样本数量主要取决于采样顺序, 与湍流参数没有关联性; 按《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)的规定, 活荷载的分项系数取 1.5, 以 1.5 作为目标分项系数, 4 类风场下均只需单次采样即可获得稳定的极值风压。

**关键词:** 高层建筑; 湍流度; 湍流积分尺度; 多次独立采样; 变异系数

**中图分类号:** TU312.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-240

## 0 引言

随着高层建筑高度的增加, 风荷载已经成为对高层建筑影响最大的水平荷载之一。迄今为止, 高层建筑受风灾影响导致的围护结构破损等情况时有发生, 因此有必要对高层建筑结构进行更精细的抗风设计。Davenport<sup>[1]</sup>提出的风荷载链(wind loading chain)概念中, 气候、场地条件、气动力效应、结构静动力效应等因素均不同程度地存在不确定性, 从而导致风荷载也具有强烈的不确定性。从理论上来说, 对高层建筑模型进行多次重复采样试验可得到较为稳定的风压, 但随着采样次数的增加, 试验成本也会增加。考虑到样本的不确定性, 确定合理的风洞试验采样次数, 对得到稳定的样本风压有一定的研究意义。

在结构风荷载不确定性方面, 国内外学者进行了一些研究。Giofre 等<sup>[2-3]</sup>指出, 风压时程采用高斯分布会严重低估最大风荷载; Holmes 和 Cochran<sup>[4]</sup>进行了 5100 次风洞试验, 将不同形状参数的 GEV (Generalized Extreme Value) 分布与样本数据进行拟合, 发现低矮建筑屋顶和墙侧的极值风压与具有正形状参数的 GEV 分布拟合程度较高。Li 等<sup>[5]</sup>通过长时间的风洞试验, 研究了测试持续时间和峰值数量对极值分析的影响; 叶继红和侯信真<sup>[6]</sup>分析了 5 种典型的大跨屋盖结构表面局部风压高阶矩的统计量, 利用基于 K-S 检验的拟合方法进行了非高斯区域的分区; 吴迪等<sup>[7-8]</sup>进行了 1000 次重复采样风洞试验, 利用极大似然估计分析了屋盖风压的概率分布参数, 指出大部分区域为极值 III 型分布, 并用相关系数检验法建立了风压的概率模型, 获得了具有任意保证率的平均风压系数; 张雪<sup>[9]</sup>基于 500 次重复

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878271); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4302, 2020JJ5176)

通信作者: 李永贵(1981—), 男, 博士, 教授。主要研究领域为高层建筑结构抗风。Email: lyg@hnust.edu.cn

采样风洞试验,研究了大跨平屋盖结构风压的概率统计模型及不确定性,给出了大跨屋盖重复采样试验的合理采样次数。

在湍流特性对高层建筑风荷载的影响方面, Hillier 和 Cherry<sup>[10]</sup>指出,湍流度对平均风压影响很大,湍流积分尺度对平均风压没有影响,二者对脉动风压的影响都很显著; Li 等<sup>[11]</sup>通过模拟湍流度和湍流积分尺度单独变化的 6 类湍流风场,研究了湍流参数对风压系数的影响,发现湍流积分尺度在某些情况下会对风压系数产生明显的影响; 张雪莲<sup>[12]</sup>通过数值模拟的方法模拟出湍流积分尺度小于实际大气边界层的风场,研究了湍流积分尺度对脉动风压的影响,发现湍流积分尺度对脉动风压有重要影响; 张明月等<sup>[13]</sup>研究了栅板初始高度、孔隙率和格栅板宽度对格栅湍流风场的风参数的影响; 李茂杰等<sup>[14-15]</sup>研究了 2 种不同湍流度对阻塞效应的影响; 全涌等<sup>[16]</sup>模拟了 3 类不同湍流度的风场,发现当风场的湍流度变化时,峰值因子也在变化。

上述风荷载不确定性的研究主要集中在低矮大跨结构,且较少考虑来流风参数的影响。本文在不同来流风参数边界风场中,对高层建筑刚性模型进行了 500 次重复采样风洞试验,以研究风压的变异性,并提出了获得满足工程需求的稳定风压所需的采样次数。

## 1 风洞试验

### 1.1 试验模型

高层建筑模型缩尺比为 1 : 400,模型长宽高尺寸分别为 100mm、100mm、800mm。测点按高密低疏 12 层布置,每层 36 个测点,限于篇幅且考虑代表性工况,本文仅研究来流风向垂直于 1~9 号测点所在平面的风向角,测点布置及来流风向角如图 1 所示,模型 4 个面分别为迎风面、侧风面 1、背风面、侧风面 2。模型试验图如图 2 所示。

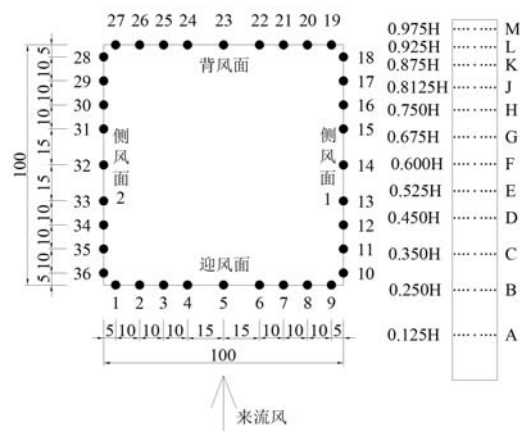


图 1 测点布置与来流风示意图(单位:mm)

Fig. 1 Pressure tap distributions and incoming flow illustration (unit: mm)



图 2 模型试验图

Fig. 2 Testing models diagram

### 1.2 试验方案

试验在湖南科技大学风工程试验研究中心进行,风洞试验段尺寸为 21m×4m×3m(长×宽×高)。采用眼镜蛇风速仪系统来测量风参数剖面和参考高度处的来流风速,其中参考高度取模型高度即 800mm(对应实际高度 320m);采用电子式压力扫描阀系统测量高层建筑模型表面风压,在每类风场下进行独立重复采样 500 次,采样频率为 333Hz,参照深圳市的基本风压 0.75kN/m<sup>2</sup><sup>[17]</sup>,取单次采样时间为 9.58s,对应实际采样时间为 10min。

### 1.3 风场模拟

风场的模拟装置包括放置在来流入口处的多排交错矩形挡板和在转盘前沿风洞底布置的粗糙元,可以通过改变矩形挡板的间距、宽度以及离转盘的距离等来调整湍流参数,具体的风场模拟方法见文献<sup>[18]</sup>。以《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[17]</sup>规定的 C 类风场为基准风场,风剖面指数为 0.22,

参考高度处湍流度  $I_u$  为 12%，湍流积分尺度  $L_x$  为 587mm，湍流积分尺度与模型截面尺寸的比值为 5.87；在此基础上保持湍流度基本不变，湍流积分尺度分别减小 166mm、272mm 得到风场 CL1 和 CL2，参考高度处湍流积分尺度  $L_x$  分别为 421mm 和 315mm，与模型截面尺寸的比值分别为 4.21 和 3.15；保持湍流积分尺度不变，湍流度增加 3% 得到风场 CI，参考高度处的湍流度  $I_u$  为 15%。各风场参考高度处来流风速  $U_H$  均为 10m/s 左右，风场参数如图 3 所示，其中试验值为 5 次测量结果的平均值， $z$  为风场高度， $U_z$  为  $z$  高度处的平均风速， $nS_u(n)/\sigma^2$  为脉动风速归一化的功率谱， $u$  与  $U_z$  含义相同；图 3(b) 中湍流积分尺度的计算基于泰勒假设的自相关函数计算方法，具体计算方法参考文献[19]。图 3 中欧洲规范与日本规范见文献[20]。

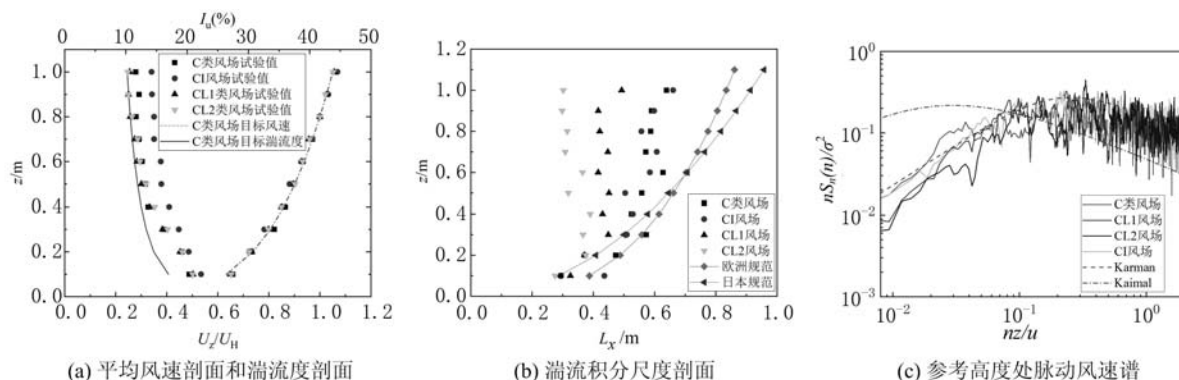


图 3 4 类风场的流场参数

Fig. 3 Flow field parameters of four wind fields

## 2 变异系数

变异系数为标准差和平均值的比值，由于方差、标准差受到量纲的影响，通常以变异系数作为确定随机变量不确定性的度量指标。变异系数越小，说明随机变量的离散程度越小，样本间差距越小。

图 4 给出了 4 类风场下，模型 G 层测点风压的变异系数散点图，其中 CV(Coefficient of Variation) 为变异系数值。在数据处理的过程中，取风压的变异系数的绝对值进行分析；极值风压的计算采用观测极值法，即在迎风面取观测极值的极大值、在侧风面和背风面取观测极值的极小值；变异系数在不同面

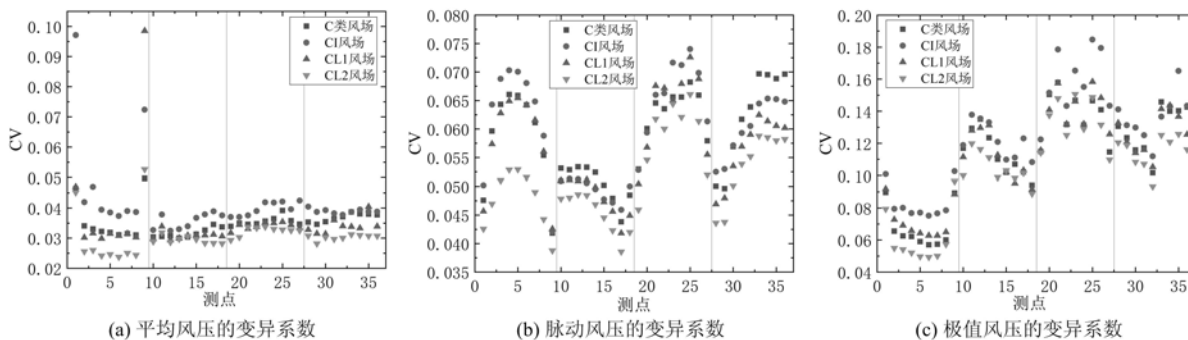


图 4 G 层测点风压的变异系数

Fig. 4 The coefficient of variation of wind pressure at layer G

上的最大值、最小值和均值见表 1。从图 4(a) 中可以看出，各风场下 1 号和 9 号测点的平均风压的变异系数明显大于其他测点，其他层的测点也有类似现象，这是由于 1 号和 9 号测点位于迎风面边缘，平均风压系数较小所导致的。由于变异系数整体数值较小，因此以变异系数的变化率为 10% 时作为界限值。对于平均风压的变异系数，C 类风场下各面的平均值分别为 0.0357、0.0316、0.0356、0.0368；CI 风场下各面的平均值分别为 0.0502、0.0357、0.0398、0.0389，与 C 类风场的变异系数相比较，变化值分别为(正值为增大，负值为减小)0.0145、0.0041、0.0043、0.0021，变化率分别为 40.7%、12.8%、12.0%、5.7%，说明随着湍流度增大，平均风压的变异系数总体上呈增大趋势。CL1 风场下各面的平均值分别

为 0.0402、0.0309、0.0341、0.0341,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 0.0045、-0.0007、-0.0015、-0.0027,变化率分别为 12.6%、-2.3%、-4.2%、-7.3%,迎风面上平均风压的变异系数增大,侧风面和背风面上影响可以忽略不计;CL2 风场下各面的平均值分别为 0.0302、0.0294、0.0324、0.0303,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 -0.0055、-0.0022、-0.0032、-0.0065,变化率分别为 -15.4%、-7.0%、-8.9%、-17.7%,迎风面和侧风面 2 的平均风压的变异系数有所减小。通过 CL1 与 CL2 风场的变异系数分别与 C 类风场下的变异系数进行比较,不难看出,湍流积分尺度的减小对平均风压的变异系数的影响没有规律性。

表 1 G 层测点风压的变异系数统计值

Tab. 1 Statistical value of the coefficient of variation of wind pressure at layer G

风场类型	平均风压的变异系数				脉动风压的变异系数				极值风压的变异系数				
	迎风面	侧风面 1	背风面	侧风面 2	迎风面	侧风面 1	背风面	侧风面 2	迎风面	侧风面 1	背风面	侧风面 2	
C 类	最大值	0.0497	0.0346	0.0392	0.0387	0.0661	0.0534	0.0682	0.0697	0.0897	0.1351	0.1580	0.1459
	最小值	0.0310	0.0300	0.0339	0.0346	0.0418	0.0438	0.0530	0.0496	0.0571	0.0942	0.1146	0.1016
	均值	0.0357	0.0316	0.0356	0.0368	0.0584	0.0506	0.0627	0.0622	0.0670	0.1133	0.1373	0.1286
CI	最大值	0.0971	0.0389	0.0424	0.0404	0.0703	0.0513	0.0740	0.0653	0.1026	0.1378	0.1848	0.1651
	最小值	0.0374	0.0325	0.0370	0.0378	0.0421	0.0459	0.0528	0.0525	0.0752	0.1083	0.1224	0.1119
	均值	0.0502	0.0357	0.0398	0.0389	0.0619	0.0494	0.0658	0.0602	0.0830	0.1220	0.1582	0.1364
CL1	最大值	0.0986	0.0339	0.0354	0.0404	0.0655	0.0511	0.0726	0.0625	0.0919	0.1314	0.1584	0.1437
	最小值	0.0299	0.0293	0.0317	0.0314	0.0426	0.0418	0.0504	0.0469	0.0628	0.0916	0.1157	0.1053
	均值	0.0402	0.0309	0.0341	0.0341	0.0579	0.0482	0.0635	0.0566	0.0715	0.1117	0.1396	0.1262
CL2	最大值	0.0526	0.0319	0.0338	0.0312	0.0529	0.0486	0.0661	0.0588	0.0966	0.1198	0.1506	0.1257
	最小值	0.0238	0.0282	0.0293	0.0282	0.0388	0.0386	0.0460	0.0136	0.0494	0.0888	0.1098	0.0934
	均值	0.0302	0.0294	0.0324	0.0303	0.0478	0.0452	0.0587	0.0533	0.0604	0.1042	0.1327	0.1151

对于脉动风压而言,C 类风场下各面脉动风压的变异系数平均值分别为 0.0584、0.0506、0.0627、0.0622;CI 风场下各面的平均值分别为 0.0619、0.0494、0.0658、0.0602,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 0.0035、-0.0012、0.0031、-0.0020,变化率分别为 6.0%、-2.4%、5.0%、-3.1%,由此可见,湍流度的增大对高层建筑脉动风压的变异系数影响可以忽略不计。CL1 风场下各面的平均值分别为 0.0579、0.0482、0.0635、0.0566,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 -0.0006、-0.0024、0.0008、-0.0056,变化率分别为 -1.0%、-4.8%、13.0%、-9.1%,其中背风面脉动风压的变异系数有所增加,对迎风面和侧风面上脉动风压的变异系数的影响可以忽略不计。CL2 风场下各面的平均值分别为 0.0478、0.0452、0.0587、0.0533,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 -0.0107、-0.0054、-0.0040、-0.0089,变化率分别为 -18.3%、-10.6%、-6.4%、-14.3%,其中迎风面和侧风面脉动风压的变异系数减小,背风面上影响可以忽略不计。通过 CL1 与 CL2 风场的变异系数分别与 C 类风场下的变异系数进行比较,说明湍流积分尺度的减小对脉动风压的变异系数的影响没有规律性。

对于极值风压而言,C 类风场下各面极值风压的变异系数的平均值分别为 0.0670、0.1133、0.1373、0.1286,CI 风场下各面极值风压的变异系数的平均值分别为 0.0830、0.1220、0.1582、0.1364,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 0.0160、0.0087、0.0210、0.0078,变化率分别为 23.9%、7.7%、15.3%、6.1%,说明随着湍流度的增大,在迎风面和背风面上极值风压的变异系数增大,侧风面上影响可以忽略不计。此外,湍流度增大时,迎风面上平均风压和极值风压的变异系数变化程度较其他面更大。CL1 风场下各面极值风压的变异系数的平均值分别为 0.0715、0.1117、0.1396、0.1262,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 0.0045、-0.0016、0.0024、-0.0023,变化率分别为 6.7%、-1.4%、1.7%、-1.8%,变化可以忽略不计;CL2 风场下各面极值风压的变异系数的平均值分别为 0.0604、0.1042、0.1327、0.1151,与 C 类风场的变异系数相比较,变化值分别为 -0.0066、-0.0091、

-0.0046、-0.0135,变化率分别为-9.8%、-8.0%、-3.3%、-10.5%,仅侧风面 2 的极值风压的变异系数略有减小,说明湍流积分尺度对极值风压的变异系数的影响基本可以忽略。此外,从总体上来看,侧风面和背风面的极值风压的变异系数较迎风面的要大,这是由于来流风撞击迎风面后,绕侧面上游角沿分离,在侧风面、背风面产生漩涡而造成极值风压系数的不确定性增大所致。

### 3 变异系数随样本数量的变化规律

围护结构风荷载的不确定性与样本数量息息相关<sup>[21]</sup>,随着样本数量的增多,风荷载的取值更加稳定。为了研究样本数量以及样本顺序对变异系数的影响规律,本文分别从迎风面、背风面、侧风面选取 G 层变异系数较大的 1 号、23 号、32 号测点,使用 5 种随机生成的样本顺序进行分析。

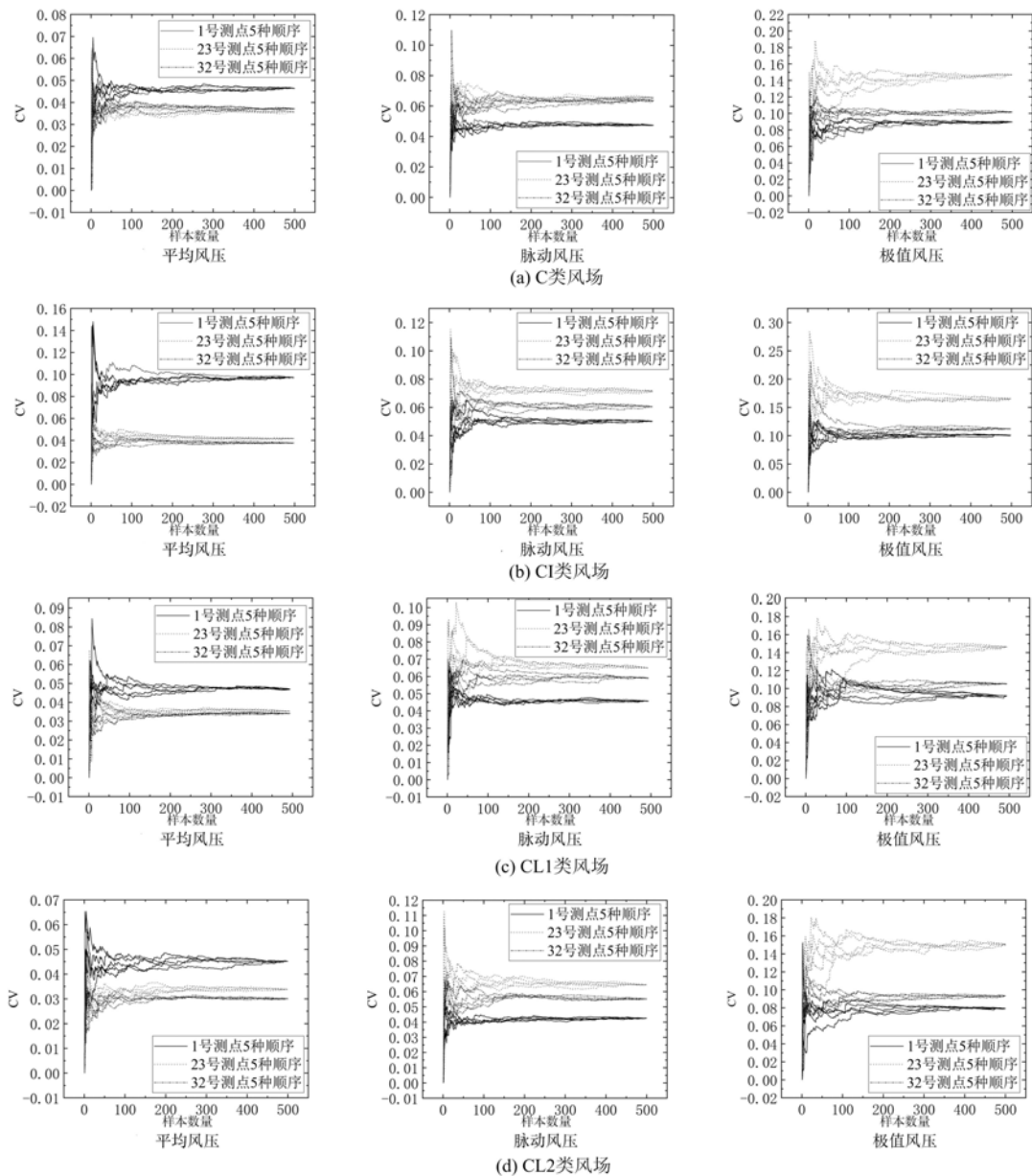


图 5 4 类风场下典型测点风压的变异系数随样本数量变化曲线

Fig. 5 Curve of coefficient of variation of wind pressure of typical pressure taps with the number of samples under four wind fields

图 5 给出了 4 类风场中 5 种样本顺序下模型风压的变异系数随样本数量的变化曲线。从图 5 可以看出,变异系数整体上随着样本次数的增加而逐渐稳定;不同顺序间变异系数的差异在样本数量少的时候

候较大,但随着样本数量增多,差异逐渐减小。这是因为当样本数量较少时,可能会有个别样本与其他样本的差距过大,这种差距会随着样本量的增多而减小。

使用二次稳定算法<sup>[22]</sup>判断变异系数何时稳定,计算过程中,2次算法的变化幅度  $A_1$  和  $A_2$  分别为 5% 和 1%, 稳定度指标  $S_1$  和  $S_2$  均取 85%, 取 5 种随机生成的样本顺序中最不利的顺序情况作为标准。对于平均风压而言, C 类风场下 1 号、23 号、32 号测点变异系数分别需要 23、26、17 个样本达到稳定。CI 风场下 3 个测点分别需要 12、52、28 个样本达到稳定, 相比较于 C 类风场, 在背风面和侧风面需要的样本数量更多, 在迎风面更少。CL1 风场下 3 个测点分别需要 39、23、40 个样本达到稳定, 相比较于 C 类风场, 在迎风面和侧风面需要的样本数量更多, 在背风面则更少; CL2 风场下 3 个测点分别需要 37、33、63 个样本达到稳定, 相比较于 C 类风场, 需要的样本量更多。通过其他 3 类风场与 C 类风场变异系数达到稳定的次数进行比较, 不难看出湍流参数与平均风压的变异系数达到稳定所需的样本数量之间没有关联性。

对于脉动风压而言, C 类风场下 1 号、23 号、32 号测点变异系数分别需要 16、19、38 个样本达到稳定。CI 风场下 3 个测点分别需要 27、22、16 个样本达到稳定, 相比较于 C 类风场, 在迎风面和背风面所需要的样本数量更多, 在侧风面所需要的样本数量更少。CL1 风场下 3 个测点分别需要 9、72、52 个样本达到稳定, 相比较于 C 类风场, 在迎风面需要的样本数量更少, 背风面和侧风面需要的样本数量更多; CL2 风场下 3 个测点分别需要 7、31、14 个样本达到稳定, 相比较 C 类风场, 在背风面需要的样本数量更多, 在迎风面和侧风面需要的更少。通过其他 3 类风场与 C 类风场达到稳定的次数进行比较, 说明湍流参数的变化与脉动风压的变异系数达到稳定所需的样本数量的影响也没有关联性。

对于极值风压而言, C 类风场下 1 号、23 号、32 号测点变异系数分别需要 54、93、16 个样本达到稳定。CI 风场下 3 个测点分别需要 35、35、43 个样本达到稳定, 与 C 类风场相比较, 在侧风面变异系数所需要的样本数量更多, 在迎风面、背风面所需要的样本数量更少。CL1 风场下 3 个测点分别需要 59、83、57 个样本达到稳定, 与 C 类风场相比较, 在迎风面和侧风面需要的样本数量更多, 背风面需要的样本数量更少; CL2 风场下 3 个测点分别需要 46、76、26 个样本达到稳定, 相比较 C 类风场, 在侧风面需要的样本数量更多, 迎风面和背风面需要的样本数量更少。同样, 湍流参数的变化与极值风压的变异系数达到稳定所需的样本数量也没有关联性。

风压的变异系数总体较小, 若要获得风洞试验最小采样次数, 则应该要从风压系数的变异性对总体荷载的影响程度进行分析<sup>[9]</sup>。

## 4 采样次数的确定

在风荷载的不确定性研究中, 采样次数是需要进行考量的对象。随着采样次数的增加, 变异系数会逐渐趋于稳定, 但同时也会导致试验成本的增加, 要想平衡结构设计中的安全性与经济性, 有必要选择合适的采样次数。

绝对可靠性是指对个体进行重复测量的程度, 可用变异系数表示<sup>[21]</sup>。本文采用验算点法和迭代法<sup>[23-25]</sup>得到了风荷载分项系数和变异系数的关系<sup>[9,26]</sup>, 见表 2。在迭代过程中, 风压的概率分布取极值 I 型分布<sup>[17]</sup>, 构件抗力均值系数  $k_R=1.13$ , 抗力的变异系数  $\delta_R=0.19$ , 荷载效应比值为 1, 目标可靠度为 3.24<sup>[23]</sup>。详细计算过程参考文献<sup>[24,26]</sup>。不同风压的变异系数与对应的荷载分项系数由表 2 给出。依据表 2 可以得到目标荷载分项系数对应的风压的变异系数, 即阈值, 随着样本数量的增加, 当达到某一样本数量时, 变异系数首次小于阈值, 且样本数量继续增加后变异系数均不大于该阈值, 这一样本数量就是达到目标荷载分项系数所需要的采样次数。在样本数量较大时, 样本顺序的不同, 对变异系数随样本数量的变化没有太大影响; 在样本数量较小时则影响较大。通过对变异系数随样本数量的变化规律进行分析可以看出, 湍流参数与风压的变异系数达到稳定所需的样本数量之间没有关联性, 但不同的采样顺序下风压的变异系数达到稳定所需的样本数量有所不同, 为了消除不同采样顺序造成的影响, 本文使用 5 种顺序所得结果的最不利情况作为达到目标分项系数所需的采样次数的依据。

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[27]</sup>将活载分项系数的取值设定为 1.5, 由表 2

可以看出,如果以 1.5 作为目标分项系数,对应的风压的变异系数上限为 0.203。4 类风场下平均风压和脉动风压的变异系数均有 99% 以上的测点在单次采样后就能达到 0.203 以内,且围护结构的设计取决于极值风压,所以本文将着重对极值风压的变异系数进行分析。

表 2 风压的变异系数对应的荷载分项系数

Tab.2 Partial safety factor of load corresponding to coefficient of variation of wind pressure

风压的变异系数	0.05	0.10	0.15	0.20	0.203	0.25	0.30
荷载分项系数	1.07	1.20	1.34	1.49	1.50	1.64	1.79

高层建筑模型各个面所需要的采样次数比例见表 3。在基准风场下用观测极值法求得高层建筑 G 层的极值风压系数见图 6,由图可以看出,在高层建筑中风压系数的极大值在迎风面,为 1.82;风压系数的极小值在侧风面,为-3.63。说明风压的极大值由迎风面起着控制性作用,极小值由侧风面起着控制性作用,所以本文以迎风面和侧风面的采样次数为高层建筑总体的采样次数的基准。从表 3 中可以看出,4 类风场下,若需要使 90% 的测点不超过目标分项系数对应的变异系数,则都只需要 1~5 次采样。

表 3 4 类风场下测点采样次数比例

Tab.3 Proportion of sampling times of pressure taps under four wind fields

	迎风面/%				侧风面 1/%				背风面/%				侧风面 2/%			
	C 类	CI	CL1	CL2	C 类	CI	CL1	CL2	C 类	CI	CL1	CL2	C 类	CI	CL1	CL2
1 次	94.4	92.6	94.4	97.2	91.7	90.8	91.7	93.6	79.6	71.3	75.9	80.6	93.5	91.6	92.6	93.5
2~5 次	0.9	1.8	0	0.9	1.8	3.6	0.9	0.9	3.7	3.7	0	2.8	1.9	2.8	0	0
6~10 次	0	0	0	0	5.6	1.8	2.8	3.7	2.7	4.6	1.9	2.8	2.8	1.9	1.9	4.6
11~20 次	0	0	0	0	0	1.9	2.8	0.9	5.6	2.8	5.5	3.7	0.9	3.7	0.9	1.9
21~50 次	0.9	0	0	0	0.9	1.9	0	0.9	4.6	7.4	6.5	3.7	0.9	0	0	0
51~100 次	0.0	0.9	0	0	0	0	1.8	0	1.9	3.7	4.7	1.8	0	0	2.8	0
101~500 次	3.8	4.7	5.6	1.9	0	0	0	0	1.9	6.5	5.5	4.6	0	0	1.8	0

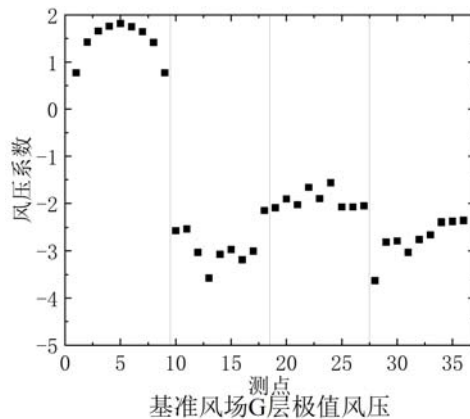


图 6 基准风场下 G 层的极值风压系数

Fig. 6 Extreme wind pressure coefficients at layer G under reference wind field

通过进一步分析,在迎风面,C、CI、CL1、CL2 风场只需 1 次采样次数的测点比例分别为 94.4%、92.6%、94.4%、97.2%;在侧风面 1,C、CI、CL1、CL2 风场只需 1 次采样次数的测点比例分别为 91.7%、90.8%、91.7%、93.6%;在侧风面 2,C、CI、CL1、CL2 风场只需 1 次采样次数的测点比例分别为 93.5%、91.6%、92.6%、93.5%。通过上述分析可以看出,从工程应用的角度,基准 C 类风场下,只需单次采样即可获得满足目标分项系数的极值风压。此外,在迎风面 101~500 次的测点比例明显大于除 1 次外的其他采样次数范围的测点比例,这是由于模型每层的 1 号和 9 号测点在迎风面边缘,风压系

数过小导致变异系数过大而引起的。

## 5 结论

本文基于多次重复采样试验结果,研究了湍流特性对高层建筑风压的不确定性的影响以及此类工况下的风洞试验所需采样次数,得出如下结论:

(1) 随着湍流度的增大,高层建筑的平均风压和极值风压的变异系数增大,脉动风压的变异系数基本没有变化。湍流积分尺度对极值风压的变异系数的影响基本可以忽略。

(2) 风压的变异系数随着样本数量的增加而逐渐稳定,不同的样本顺序下风压的变异系数达到稳定所需的样本数量有所不同;湍流参数与风压的变异系数达到稳定所需的样本数量之间没有关联性。

(3) 以 1.5 为目标分项系数,对应的风压的变异系数上限为 0.203,以实际采样 10min 为基准,4 类风场下均只需单次采样即可获得满足工程应用的极值风压。

### 参考文献:

- [1] Davenport A G. Past, present and future of wind engineering[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12-15):1371-1380.
- [2] Giofre M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. I: stochastic field[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9):981-989.
- [3] Giofre M, Gusella V, Grigoriu M. Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. II: numerical simulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9):990-995.
- [4] Holmes J D, Cochran L S. Probability distributions of extreme pressure coefficients[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(7):893-901.
- [5] Li S H, Kilpatrick J, Browne M T L, et al. Uncertainties in prediction of local peak wind pressures on mid-and high-rise buildings by considering gumbel distributed pressure coefficients[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 206:104364.
- [6] 叶继红, 侯信真. 大跨度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))
- [7] 吴迪, 武岳, 孙瑛. 大跨度屋盖结构极值风压概率分布特征研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(3):29-35 (WU Di, WU Yue, SUN Ying. Probability distribution characteristics of extreme wind pressure for large span roofs [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(3):29-35 (in Chinese))
- [8] 吴迪, 杨庆山, 武岳. 大跨度屋盖气动效应不确定性研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 17(10):147-153 (WU Di, YANG Qingshan, WU Yue. Study on aerodynamic effect uncertainty for large span roofs[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 17(10):147-153 (in Chinese))
- [9] 张雪. 大跨屋盖围护结构风荷载极值及其不确定性[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2019 (ZHANG Xue. Extreme value of wind load and its uncertainty in the large span roof cladding and components[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019 (in Chinese))
- [10] Hillier R, Cherry N J. The effects of stream turbulence on separation bubbles[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 8(1-2):49-58.
- [11] Li Y G, Yan J H, Chen X Z, et al. Investigation of surface pressures on CAARC tall building concerning effects of turbulence[J]. *Wind and Structures*, 2020, 31(4):287-298.
- [12] 张雪莲. 湍流积分尺度对高层建筑风压分布及风致响应影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019 (ZHANG Xuelian. Study on the influence of turbulence integral scale on the wind pressure distribution and wind induced response of high-rise buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese))
- [13] 张明月, 李永贵, 谭文俊, 等. 格栅湍流风场风参数变化规律的风洞试验研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(3):427-433 (ZHANG Mingyue, LI Yonggui, TAN Wenjun, et al. Wind tunnel experimental study of the variation of wind parameters in grid turbulent wind field[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(3):427-433 (in Chinese))



- [14] 李茂杰,李永贵,谭文俊,等.高层建筑标准模型平均风力的阻塞效应研究[J].实验力学,2019,34(2):321—331 (LI Maojie, LI Yonggui, TAN Wenjun, et al. Experimental investigation on blockage effect of mean wind forces of standard high-rise building model[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2):321—331 (in Chinese))
- [15] 李茂杰,李永贵,谭文俊,等.高层建筑脉动风力频域特性的阻塞效应试验研究[J].实验力学,2020,35(6):1071—1080 (LI Maojie, LI Yonggui, TAN Wenjun, et al. Experimental investigation of blockage effects on frequency domain characteristics of fluctuating wind forces on tall buildings [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1071—1080 (in Chinese))
- [16] 全涌,侯方超,顾明.超高层建筑横风向风致响应的非高斯性及峰值因子研究[J].振动与冲击,2020,39(17):171—176 (QUAN Yong, HOU Fangchao, GU Ming. Study on the non-Gaussian characteristic and peak factor of across-wind response for super high-rise buildings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17):171—176 (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 李永贵,全嘉,严佳慧,等.一种风洞试验风场布置装置[P].中国:CN 214224482 U,2021-09-17 (LI Yonggui, QUAN Jia, YAN Jiahui, et al. A wind field layout for wind tunnel test [P]. China: CN 214224482 U, 2021-09-17 (in Chinese))
- [19] Flay R G J, Stevenson D C. Integral length scales in strong winds below 20m[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 28(1-3):21—30.
- [20] 李永贵.高层建筑风荷载与风致弯扭耦合响应研究[D].长沙:湖南大学,2013 (LI Yonggui. Wind loads and wind-induced lateral-torsional coupled response of tall bulidings [D]. Changsha: Hunan university, 2013 (in Chinese))
- [21] 冯雯蕾.低矮房屋围护结构风荷载极值的不确定性分析[D].北京:北京交通大学,2021 (FENG Wenlei. Uncertainty analysis of the extreme wind load on the claddings and components of low-rise buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021 (in Chinese))
- [22] 李娜,黄孝彬,田志强,等.生产过程数据稳定性判断的一种方法[J].华电技术,2010,32(1):32—34,38,80 (LI Na, HUANG Xiaobin, TIAN Zhiqiang, el al. A method for judging the stability of production process data [J]. Huadian Technology, 2010, 32(1):32—34, 38, 80 (in Chinese))
- [23] 李继华,林忠民,李明顺,等.建筑结构概率极限状态设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1990 (LI Jihua, LIN Zhongmin, LI Mingshun, et al. Probabilistic limit state design of building structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990 (in Chinese))
- [24] 李国强,黄宏伟,吴讯,等.工程结构荷载与可靠度设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2005 (LI Guoqiang, HUANG Hongwei, WU Xun, et al. Design principle of load and reliability of engineering structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005 (in Chinese))
- [25] 许成祥,何培玲.荷载与结构设计方法[M].北京:北京大学出版社,2006 (XU Chengxiang, HE Peiling. Load and structure design method[M]. Beijing: Peking University Press, 2006 (in Chinese))
- [26] 何衍萍,闫俊月,周磊.塑料大棚恒载与风荷载组合的荷载分项系数计算分析[J].农业工程学报,2016,32(4):179—184 (HE Yanping, YAN Junyue, ZHOU Lei. Analyzing plastic greenhouse's partial coefficient for loads in combination of dead loads and wind loads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4):179—184 (in Chinese))
- [27] 建筑结构可靠度设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018 (Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese))

## Study on the uncertainty of wind pressure of high-rise buildings under the influence of turbulence parameters

HU Yang<sup>1,2</sup>, LI Yonggui<sup>1,2</sup>, YAN Jiahui<sup>1,2</sup>, QUAN Jia<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Structures for Wind Resistance and Vibration Control, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

**Abstract:** The extreme wind pressure forms the foundation for wind-resistant design of high-rise building envelopes. This study employs rough elements and baffle plates to imitate the class C wind field, in “Load code for the design of building structures” (GB 50009—2012). The class C wind field is taken as a benchmark against which the turbulence intensity (TI) is held while the turbulence integral scale (TIS) is decreased to simulate the CL1 and CL2 wind fields and TIS remains as TI is increased to simulate the CI wind field. Under the four wind field categories, the high-rise building model was subjected to 500 repetitive sampling tests to study the fundamental principles of wind pressure uncertainty in high-rise structures under turbulent conditions. The findings indicate that a rise in TI leads to an increase in the coefficient of variation (CV) of extreme wind pressure for high-rise structures, while the influence of TI on the CV of extreme wind pressure is minimal. The number of samples required to stabilize wind pressure’s CV depends on the order of sampling. According to “Unified standard for reliability design of building structures” (GB 50068—2018), the partial safety factor of wind load is set at 1.5 and used as the target partial safety factor. A single sampling is all that is required to obtain the stable extreme wind pressure for all four types of wind fields.

**Keywords:** high-rise building; turbulence intensity; turbulence integral scale; multiple independent sampling; coefficient of variation