

## 海边坡角可调试验房风荷载现场实测研究

王旭, 黄鹏, 顾明

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在东海边上海浦东国际机场附近建造了一栋坡角可调的低矮房屋及测风塔, 以对海边附近的风场特性及低矮建筑屋盖表面风压特性进行研究。该变坡房最大特点是屋盖坡角可以在  $0^\circ \sim 30^\circ$  之间自由调节, 以便分析坡角变化对屋盖表面风压的影响。首先分别对  $0^\circ$ 、 $10^\circ$  及  $20^\circ$  屋盖坡角下选取的 10 分钟风压时程信号进行了分析, 并与 1:30 刚性测压风洞试验相应结果进行了对比, 表明屋盖表面平均及脉动风压分布与风洞试验结果吻合较好。其次, 对风速、风向角的平稳性及其之间的相关性进行了分析, 说明风速与风向角之间耦合作用明显, 尤其竖向风向角对风速脉动影响较大, 时间滞后为 0 时两者之间相关系数接近  $-0.5$ 。最后, 对屋盖表面风压信号的非高斯特性进行了研究, 发现偏度与峰度之间具有较好的线性关系, 并给出了  $0^\circ$ 、 $10^\circ$  及  $20^\circ$  屋盖坡角下偏度与峰度的线性拟合公式。

**关键词:** 变坡房; 低矮建筑; 风压系数; 现场实测; 风洞试验; 非高斯

中图分类号: TU312.1 文献标识码: A

### Field investigation on wind loads of a low building with adjustable roof pitch near sea

WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A low building and a tower were constructed near Shanghai Pudong International Airport by east china sea in order to investigate characteristic of wind field and wind pressure on the roof surface of the low building. The remarkable feature of the low building was that its roof pitch can be adjusted between  $0^\circ$  and  $30^\circ$ , so that the impact of different roof pitches on the wind pressure of the roof can be analyzed. Firstly, three ten-minute wind pressure time-histories with different roof pitches of  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  and  $20^\circ$  were analyzed, respectively. And then comparison was made with the wind tunnel test data of a rigid model with 1:30 scale. It was shown that the distributions of the mean pressure and the fluctuating one agree well with the wind tunnel test results. Next, the stationarity of wind velocity and wind direction angle and the correlation between them were analyzed. It was discovered that the coupling effect between them is evident; the impact of the vertical wind direction angle on fluctuating wind velocity is large; the correlation coefficient is about  $-0.5$  without time delay. Finally, the non-Gaussian characteristic of the wind pressure was investigated. It was shown that there exists a linear relation between skewness and kurtosis, and the fitting formulas for skewness and kurtosis are presented with  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ , and  $30^\circ$  roof pitches.

**Key words:** test building with adjustable roof pitch; low building; pressure coefficients; field investigation; wind tunnel test; non-Gaussian

虽然风在绝大多数情况下对人类的生活是有益的, 但是在极端情况下会对地球表面建筑物造成严重的破坏<sup>[1]</sup>。根据各国风灾调查, 造成人员伤亡和财产损失的最主要的根源是村镇低矮房屋的损坏和倒塌, 在我国尤其如此。因此, 进行低矮建筑的风荷载现场

实测研究是十分必要的。

随着电子仪器以及计算机技术的迅速发展, 从上世纪 70 年代开始, 国内外学者对低矮建筑上的风荷载进行了大量的现场实测研究, 为风洞试验的改进及发展提供了重要的帮助。20 世纪 70 年代中期, 英国建筑研究所率先进行了一项低矮建筑的现场实测研究, 该项目设立在艾尔斯伯里<sup>[2]</sup> (Aylesbury), 建筑平面尺寸  $13.3 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ , 设计为两层, 特殊之处在于屋盖坡角在  $5^\circ \sim 45^\circ$  之间任意可调。但可惜的是该建筑在两年后被拆除, 即便如此仍有众多学者通过缩尺模型风洞试验结果与仅有的实测数据进行了对比性研究。到了 80

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (90715040); 国家自然科学基金面上项目 (51178352); 上海市浦江人才计划资助

收稿日期: 2011-08-30 修改稿收到日期: 2011-08-30

第一作者 王旭男, 博士生, 1982 年生

通讯作者 黄鹏男, 博士, 副研究员, 1974 年生

年代后期 英国和美国又各自启动了一项低矮建筑现场实测研究项目, 根据其所在地点被命名为 Silsoe 试验<sup>[3-4]</sup>和 Lubbock 试验<sup>[5-6]</sup>(TTU 试验)。Silsoe 建筑为长 24 m, 跨径 12.9 m, 檐高 4 m, 带有 10°坡角的门式钢架结构。建筑特点是檐口可以根据需要装配成弧形或锐角形, 目的是研究檐口类型对结构表面风荷载的影响。TTU 建筑建立在德州理工大学校园内, 是一座平面尺寸 9.1 m × 13.7 m, 高 4 m 的钢结构小屋, 其独特之处是其安装在一转盘上, 可以通过调整转盘采集各个方向的风荷载数据。本世纪初, Silsoe 研究所建立了 1 座 6 m × 6 m 的正方体实测房<sup>[7-8]</sup>, 此建筑设计是根据一座建筑原型缩尺而成, 特点是可以调节结构的倾斜度。此后在国内, 湖南大学的研究人员提出了追风屋设想, 并成功研制了一套同低矮建筑物原型尺寸基本相同, 可长距离移动至台风登陆地区的低矮建筑物风效应实测系统(追风屋)<sup>[9-10]</sup>。其主要特点是可以根据台风登陆的实际状况将该追风房系统布设在台风登陆地区开展实测研究, 变被动等待台风登陆为主动的寻找台风, 创造更多的机会开展现场实测研究。本文中现场实测建筑设立在上海浦东国际机场附近(以下均称“变坡房”), 是国内首个固定式低矮建筑现场实测研究项目。该建筑平面尺寸 10 m × 6 m, 屋檐处高 8 m, 屋盖可以通过升降装置在 0°~30°之间任意调节。其建筑外形参考了众多中国南方村镇房屋的普遍特点, 因此研究结果对我国村镇低矮建筑抗风研究具有重要意义。

### 1 试验仪器及设备

#### 1.1 变坡房介绍

上海浦东机场附近周边地势平坦, 临近长江入海口, 遭遇强风的频率较高。因此, 同济大学土木工程防灾国家重点实验室和上海机场建设指挥部合作建设风速及风压特性现场实测项目, 实地测量浦东机场地区的强风特性以及足尺建筑模型上的风压分布。实测建筑位于图 1 中圈标定处的位置(北纬: 31°11'46.36"; 东经: 121°47'8.29"), 紧邻临海泵站入海口处, 占用浦东机场范围内一块面积约 2100 平方米的土地, 地块四周



图 1 实测建筑位置  
Fig. 1 Location of test building

空旷, 并已在该地块上建造一个高约 40 米的测风格构塔以及一栋屋面坡角可调的低矮建筑。



图 2 周边场地环境  
Fig. 2 Landform around test building

浦东变坡房建筑长约 10 m, 宽约 6 m, 屋檐处高度为 8 m, 分 3 层, 总建筑面积 162.25 m<sup>2</sup>。根据试验需要, 屋盖坡角可以在 0°~30°之间连续调节。图 3 和图 4 分别给出了该变坡房外形示意图以及 0°、30°坡角下建筑实物图。

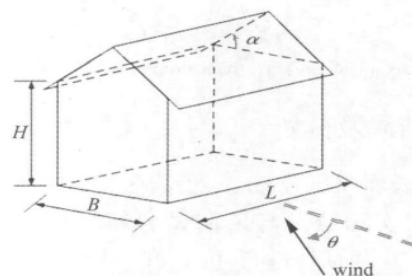


图 3 外形示意图  
Fig. 3 Outside drawing of test building

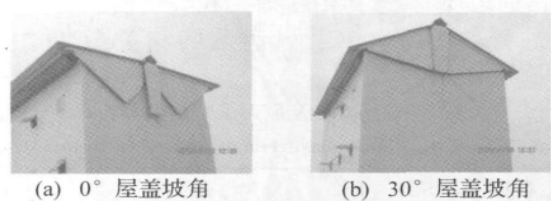


图 4 变坡房实物图  
Fig. 4 A full-scale low-rise experimental building

#### 1.2 测试仪器

根据试验目的, 将 R. M. Young 81000 型超声波和 R. M. Young 05305V 型机械式风速仪安装于距变坡房偏东 30 m 处的测风塔处(安装高度 10 m), 用以采集来流风速数据, 仪器的相关参数见表 1 所示。同时在变坡房屋盖上布置了 94 个量程在 ±1 kPa 之间的微差压传感器, 用以采集屋盖表面风压信号。

#### 1.3 测点布置

本文试验主要研究低矮建筑屋盖表面风荷载特性, 因此 94 个测点全部布置于屋面(见图 5)。由于上海多以东南风为主, 故在东南角部测点布置较为密集。

表1 风速测试仪器相关参数  
Tab.1 Instrumentation specifications

仪器名称	R. M. Young 05305V	R. M. Young 81000
风速信号	测程: 0 ~ 50m/s 精度: 0.2m/s 水平测程: 0.0° ~ 359.9°	测程: 0 ~ 40m/s 精度: 1% rms 0.05 m/s(0 ~ 30 m/s) 3% rms (30 ~ 40 m/s) 水平测程: 0.0° ~ 359.9°
风向信号	竖向测程: None 精度: 0.3°	竖向测程: -60° ~ +60° 精度: 2°(1 ~ 30 m/s) 5°(30 ~ 40 m/s)

注: 以上仪器均已在同济大学 TJ-1 及 TJ-4 风洞中进行过标定与修正。

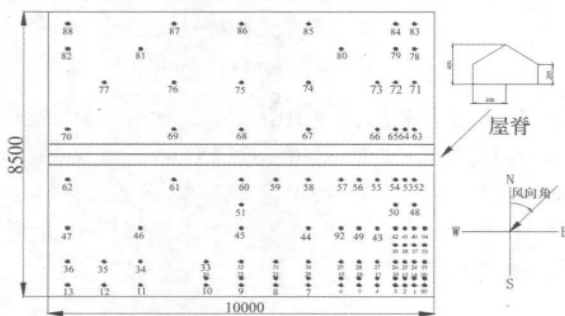


图5 测点布置

Fig. 5 Layout of pressure measurements on test building

## 2 试验结果及分析

### 2.1 屋盖表面风压分布

为了将实测结果与风洞试验结果进行对比性研究,以变坡房为原型进行了 1:30 刚性模型的风洞试验。试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室的 TJ-2 大气边界层风洞中进行的。根据变坡房周边环境,选择用粗糙元和尖塔模拟的 B 类风场中进行。现场实测及风洞试验相关参数如表 2 所示。

表2 现场实测及风洞试验相关参数

Tab.2 Cases of field measurement and wind tunnel test

相关参数	FS1	FS2	FS3	WT1	WT2	WT3
试验类型	实测	实测	实测	风洞	风洞	风洞
缩尺比例	1:1	1:1	1:1	1:30	1:30	1:30
屋面坡度	0°	10°	20°	0°	10°	20°
屋檐高度 平均风速	8.58 m/s	9.95 m/s	9.97 m/s	9.02 m/s	9.02 m/s	9.02 m/s
平均风向角	41°	34°	43°	40°	35°	45°
湍流度	0.233	0.158	0.221	0.247	0.245	0.241
采样频率/Hz	20	20	20	312.5	312.5	312.5
采样时间 及数据长度	10min 12000	10min 12000	10min 12000	38.4s 12000	38.4s 12000	38.4s 12000
风速平稳性 指数 $Z^{[11-12]}$	28.648	28.105	29.427	34.597	33.256	33.021

注: FS 和 WT 表示实测及风洞试验数据集。

在结构风工程中,常采用量纲为 1 的压力系数  $C_{p_i}$  表征结构表面的风荷载特性。风压系数为风在建筑表面引起的实际压力与来流风压的比值<sup>[13]</sup>,本文中计算风压系数的公式如下:

$$C_{p_i} = \frac{p_i - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \quad (1)$$

其中  $C_{p_i}$  为测点  $i$  处的压力系数,本文中取实测房屋檐高度,即屋檐高度处的来流风压为参考风压;  $p_i$  为测点  $i$  处的压力;  $p_0$  和  $p_\infty$  分别是试验时参考高度处的总压和静压。

为了进行比较性分析,图 6 和图 7 分别给出了实测及风洞试验屋盖表面的平均及脉动风压系数分布等值线图。从图中可以看出,由于屋脊的存在,无论实测还是风洞试验均在屋脊的背部区域再次产生一对锥形涡,使得个别工况下此区域附近负压值较大。实测及风洞试验平均及脉动风压的分布趋势完全一致,只是在迎风前缘形成的锥形涡区域内测点的平均负压稍大,这可能是由于风洞中模拟的风场与实测风场之间差异或模型制作误差造成的。综上可知,实测结果非常令人满意,进一步验证本文实测试验方法的可靠性及有效性。

### 2.2 横向轴线风压系数

利用表 2 中实测工况 FS1、FS2 和 FS3,对屋盖横向轴线 9 个测点的风压系数进行了分析,以研究屋盖坡角对其风压的影响。图 8 给出了轴线上平均、脉动及极值风压随屋盖坡角的变化曲线。首先,从图 8(a) 中可知,在迎风区域 0°坡角下平均负压最大而 20°下负压最小,但在背风区域结果相反。图 8(b) 与图 8(a) 结果类似,在迎风区域脉动风压随坡角增大而减小,在背风区域结论相反。从图 8(c) 中可明显看出 20°坡角下得到的风压最大值明显小于另外两个坡角下的结果,而图 8(d) 表明 0°坡角下的最小风压值最小。综上说明屋盖坡角对屋盖表面风压影响较大,不仅影响平均风压而且对脉动及极值风压均有不同程度的影响。这是由于屋盖坡度的变化改变了屋盖表面空气的流动方式及漩涡内部结构特性,从而使屋盖表面风压产生较为明显的变化。

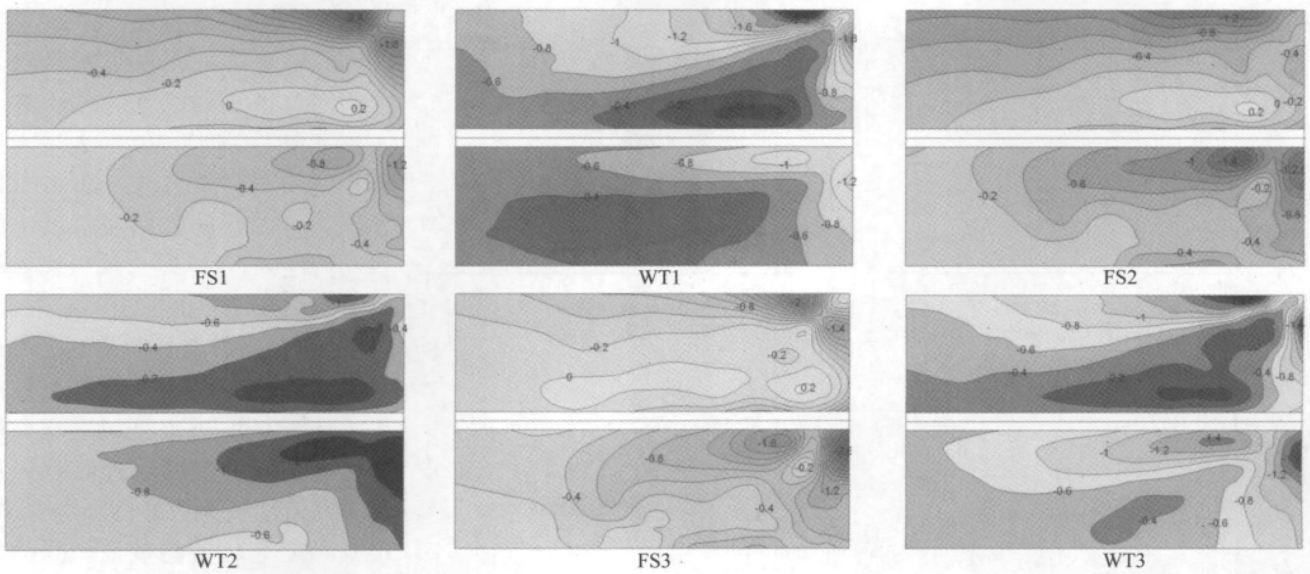


图 6 平均风压等值线图

Fig. 6 Contours of mean wind pressure coefficients

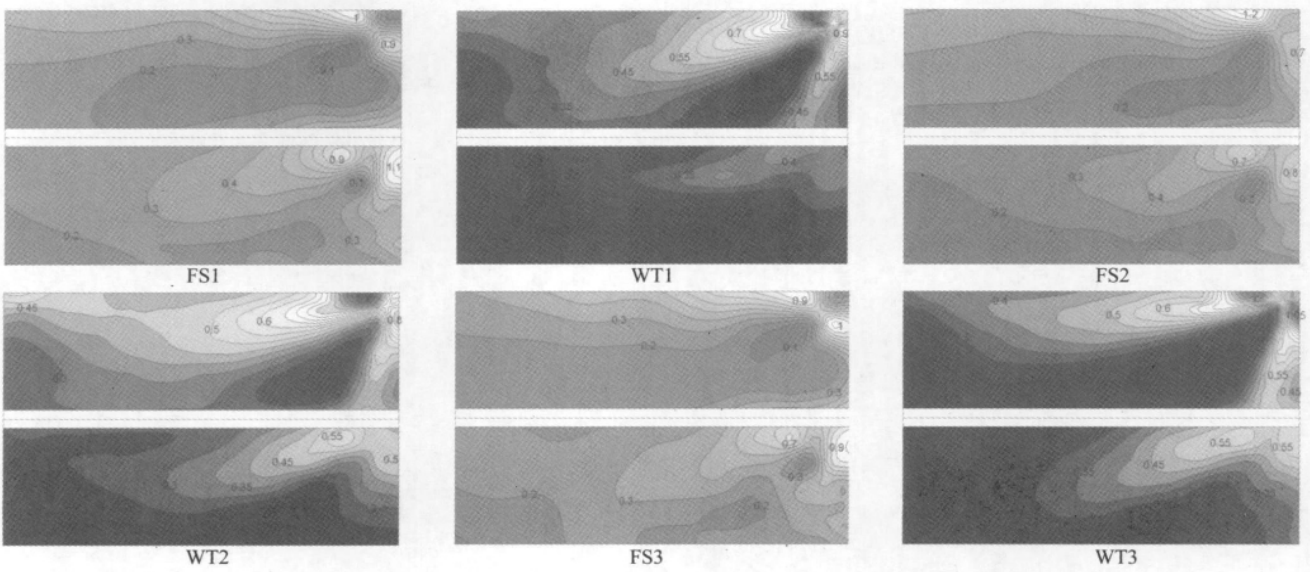


图 7 脉动风压等值线图

Fig. 7 Contours of rms wind pressure coefficients

### 2.3 风速、风向相关性分析

众多相关研究表明<sup>[14-16]</sup>,风向角脉动对风速特性影响较大,往往风速的间歇脉动是由风向的间歇脉动引起的,因此研究风速、风向耦合及相关特性具有重要意义。为便于定量分析,本文首先选取了1分钟同步采集的风速及风向时程进行分析,时程曲线如图9(a)所示(图中圆圈标注区域为间歇极值点)。图9(b)和图9(c)分别给出了风速与水平风向角及风速与竖向风向角之间的相关曲线。图9(b)中在时间迟滞在-0.3 min附近出现相关系数最大值为0.2,说明风速与水平风向角在此时间迟滞下具有一定正相关性,但相关性不强。图9(c)中,在时间迟滞为0时,出现明显的峰

值,达到-0.5,表明风速与竖向风向角呈现为较强的负相关特性,耦合作用较为明显,可以推断竖向风向角的脉动是导致风向脉动的主要原因之一。为了对不同时段风速、风向之间相关性进行统计分析,文中随机选取了60段10分钟风速风向同步采集数据进行研究,如图10所示。可以看出时间迟滞为0时,风速与竖向风向角之间的相关性明显大于风速与水平风向角之间的相关性。风速与水平风向角之间相关系数在0附近脉动,说明此迟滞下两者关联度很小;而风速与竖向风向角之间的相关性系数在-0.2~-0.6之间脉动,均值为-0.43,进一步验证了前面的结论。

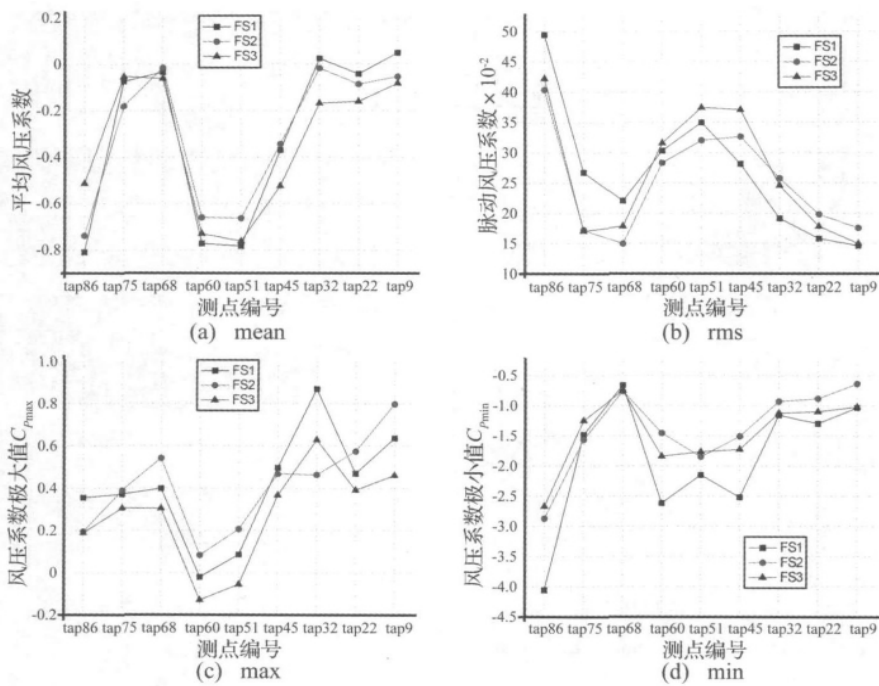


图8 横向轴线平均及极值风压系数

Fig. 8 Mean and peak wind pressure coefficients along middle line

### 2.4 风压非高斯特性

低矮建筑研究表明屋盖表面分离泡及锥形涡区域的风压时程不再呈现为高斯分布,而表现为不同类型的非高斯分布。非高斯特性研究可以帮助我们理解风压的脉动特性,而且可以为风压极值的计算提供帮助。由于篇幅有限,本文在图 11 只给出了 FS1 工况下几种典型测点的风压系数概率分布图。从图中可知,在迎风区域和屋脊区域两对锥形涡附近测点风压的非高斯性较为明显,此时测点偏度及峰度绝对值均较高。同时发现当偏度值大于 -0.5 时,测点压力时程服从 Gauss 分布,当偏度值大于 -1 而小于 -0.5 时服从 Gamma 分布<sup>[17]</sup>较好。但当偏度值小于 -1 时,两种分布均不适合。

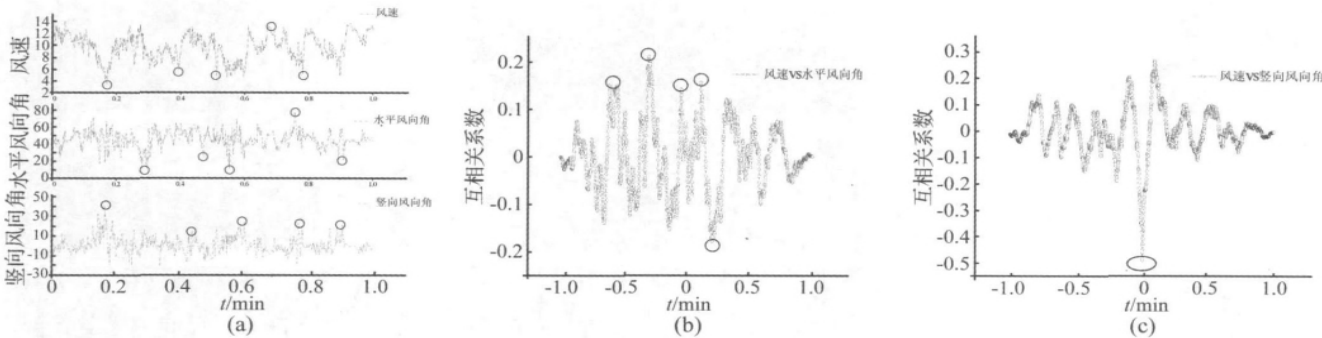


图9 风速、风向时程及相关性

Fig. 9 Time-histories of wind speed and directions and correlation between them

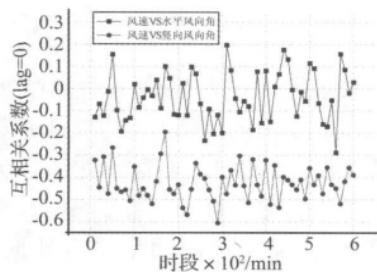


图10 不同时段风速、风向之间相关性  
Fig. 10 Correlation between wind speed and directions with different 10min time

以上分析可知,偏度及峰度对风压的非高斯分布影响较大,研究两者之间的内在联系显得极为重要<sup>[18]</sup>。为了研究偏度和峰度之间的联系,图 12 给出了 FS1、FS2 及 FS3 工况下屋盖各测点偏度与峰度的关系曲线

及拟合公式。可以明显看出,偏度与峰度呈现线性关系。在 0°和 10°坡角下,线性关联度较好,而 20°坡角下,关联度略差。说明屋盖坡角会对偏度与峰度的相关特性产生一定影响。为方便工程应用,特给出了偏度与峰度的线性拟合公式,并对峰度的实测值与拟合值进行了比较,结果令人满意。

### 3 结论

本文对浦东变坡房附近风场特性及低矮建筑屋盖表面风压特性进行了研究,主要结论如下:

- (1) 浦东机场实测项目是国内首个固定式低矮建筑现场实测研究项目。试验房最大特点是屋盖坡角可以在 0°~30°之间自由调节,以便可以对屋盖坡角对其表面风压的影响进行分析。

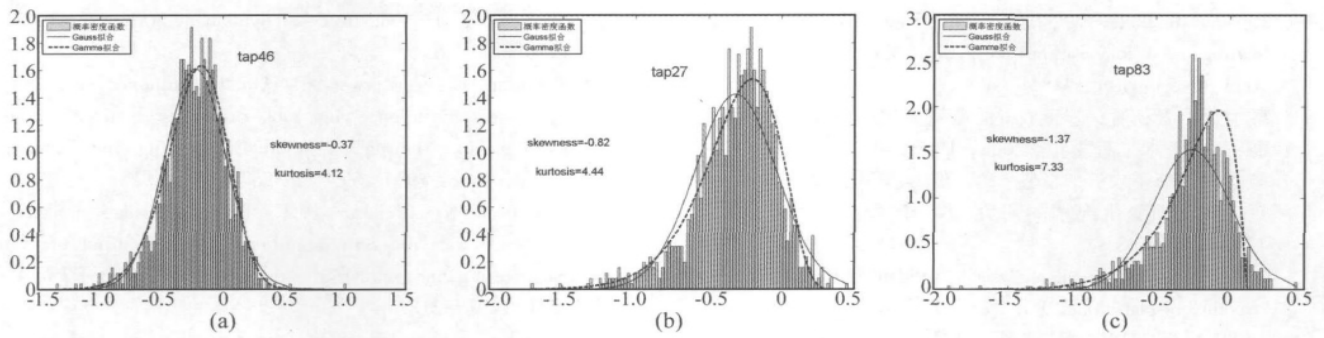


图 11 风压概率分布图

Fig. 11 Probability distribution of wind pressure

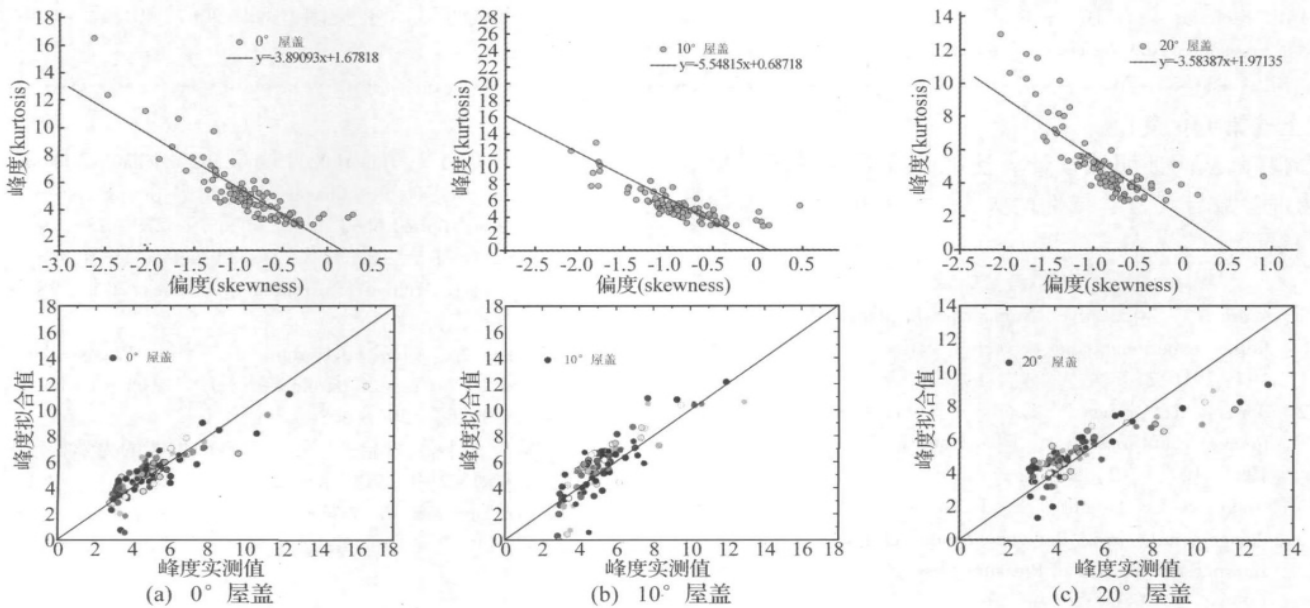


图 12 偏度与峰度关系曲线

Fig. 12 Variation of skewness with kurtosis

(2) 通过对实测及风洞试验屋盖表面的平均及脉动风压系数分布等值线图进行比较分析,表明实测及风洞试验平均及脉动风压的分布趋势完全一致,验证了本文实测试验方法的可靠性及有效性。

(3) 对风速、风向角的平稳性及其之间的相关性进行了分析,表明风速与风向角之间耦合作用明显。时间迟滞为 0 时,风速与竖向风向角之间的相关性接近 -0.5,明显大于风速与水平风向角之间的相关性,说明竖向风向角对风速脉动影响较大。

(4) 对屋盖表面风压信号的非高斯特性进行了研究,表明偏度与峰度之间呈现较好的线性关系,并给出了 0°、10°及 20°屋盖下偏度与峰度的线性拟合公式,从而为风压极值的计算提供帮助。

参考文献

[ 1 ] Zhao Z S. Wind Flow Characteristics and their effects on low-rise buildings [D]. Texas Tech University, 1997.  
 [ 2 ] Eaton K J, Mayne J R. The measurement of wind pressures on two-story houses at Aylesbury [J]. Journal of Wind

Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975 ( 1 ) : 67 - 109.

[ 3 ] Hoxey R P, Richards P J. Full-scale wind load measurements point the way forward [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57: 215 - 224.  
 [ 4 ] Richards P J, Hoxey R P, Wanigaratne B S. The effect of directional variations on the observed mean and rms pressure coefficients [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 54/55: 359 - 367.  
 [ 5 ] Levitan M L, Mehta K C. Texas tech field experiments for wind loads: Part I. Building and pressure measuring system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43: 1565 - 1576.  
 [ 6 ] Levitan M L, Mehta K C. Texas tech field experiments for wind loads: Part II. Meteorological instrumentation and terrain parameters [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43: 1577 - 1588.  
 [ 7 ] Richards P J, Hoxey R P. Flow reattachment on the roof of a 6m cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94: 77 - 99.

- [8] Sterling M, Baker C J, Hoxey R P. Short term unsteady wind loading on a low-rise building [J]. *Wind and Structures*, 2003, 6(5): 403-418.
- [9] 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.
- [10] 戴益民, 李正农, 李秋胜, 等. 低矮房屋的风载特性——近地风剖面变化规律的研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(3): 42-48.
- [11] Levitan M L. Statistical analysis to validate full scale wind and structure response data [D]. Texas Tech University, 1988.
- [12] 何迎晖, 钱伟民, 著. 随机过程简明教程 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [13] 王旭, 黄鹏, 顾明. 半球形屋面结构风荷载特性试验研究[J]. *中国工程机械学报*, 2009, 7(3): 351-355.
- [14] Richards P J, Hoxey R P. Quasi-steady theory and point pressures on a cubic building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92: 1173-1190.
- [15] Letchford C W, Marwood R. On the influence of v and w component turbulence on roof pressures beneath conical vortices [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 69-71: 567-577.
- [16] Sharma R N, Richards P J. The multi-stage process of windward wall pressure admittance [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(14-15): 1191-218.
- [17] 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.
- [18] 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, 40(4): 1-6.

(上接第160页)

合很好, 从而证明该设计方法能够准确地描述阻尼器物理参数与其力学特性的关系, 可以用于阻尼器的结构设计。

#### 参考文献

- [1] Ware A G, Nitzil M E, Nuclear power plant hydraulic snubber failure experience and corrective active [J]. *PVP*, 1990, 197: 201-214.
- [2] Jonczyk J, Gruner P. Loads of piping systems due to malfunctions of snubbers [J]. *Nuclear Engineering Design*, 1991, 107(1-2): 205-213.
- [3] Bakre S V, Jangid R S, Reddy G R. Optimum X-plate dampers for seismic response control of piping systems [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(9): 672-685.
- [4] Jia J H, Du J Y, Hua H X. Design and mechanical characteristics analysis of a new viscous damper for piping system [J]. *Archive of Applied Mechanics* 2009, 79: 279-286.
- [5] Jia J H, Du J Y, Hua H X. Design method for fluid viscous dampers [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2008, 78(9), 737-746.
- [6] Rittweger A, Albus J, Hornung E, et al. Passive damping devices for aerospace structures [J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(10): 597-608.
- [7] 贾九红, 沈小要, 杜俭业, 等. 粘弹性阻尼器的力学特性分析 [J]. *振动与冲击*, 2007, 26(10): 101-103.
- [8] Lee D, Taylor D P. Viscous damper development and future trends [J]. *The structural design of tall buildings*, 2001, 10: 311-320.