

# 不同风场下开、闭鞍型屋盖脉动风压特性分析

顾明<sup>1</sup>, 李方慧<sup>1,2</sup>, 潘钧俊<sup>1,3</sup>, 张爱社<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 上海 200041)

**摘要:** 在B类和D类风场条件下, 对底部开敞和封闭的鞍型索网屋盖刚性模型进行了风洞测压试验. 根据同步测量的风压数据, 分析了不同风场条件下这两类鞍型索网屋盖上的脉动风压的分布规律及相互关系; 通过对开敞和封闭的鞍型屋盖表面脉动风压功率谱及风压时程的对比分析, 考察底部开敞对鞍型屋盖脉动风压分布特性的影响规律. 风场对脉动风压系数分布有较大影响; 脉动风压的分布类似于平均风压场的分布规律; 底部封闭鞍型索网屋盖的脉动风压能量主要集中在折减频率小于0.3范围内, 而底部开敞鞍型屋盖脉动风压的高频段能量高于底部封闭情况.

**关键词:** 鞍型屋盖; 风洞试验; 脉动风压; 功率谱

**中图分类号:** TU 312.1

**文献标识码:** A

on the saddle roof model with and without the enclosed walls. The results indicate that the wind field category has significant effects on the fluctuating wind coefficients; the fluctuating wind distribution characteristics are similar to mean wind pressure distribution; the fluctuating wind pressure energy of saddle-shape cable roof with enclosed wall mainly distributes in the reduced frequency range lower than 0.3 Hz, but fluctuating wind pressure energy in high frequency range of saddle-shape cable roof without enclosed wall is higher than that of saddle-shape with enclosed wall.

**Key words:** saddle roof; wind tunnel test; fluctuating wind pressure; power spectra

## Fluctuating Wind Pressure Characteristics on Saddle Roof with and Without Enclosed Wall Under Different Terrain Conditions

GU Ming<sup>1</sup>, LI Fanghui<sup>1,2</sup>, PAN Junjun<sup>1,3</sup>, ZHANG Aishe<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Architectural Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150086, China; 3. Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

**Abstract:** The wind tunnel tests on rigid models of saddle-shape cable roofs with and without enclosed wall were carried out in exposure categories B and D. The distribution characteristics of the fluctuating wind pressures in the two wind fields and their relationships were investigated based on the wind pressure data obtained from the tests. Besides, the influences of the enclosed walls on fluctuating wind pressure distribution characteristics were also discussed in detail by comparing the power spectra and time series of wind pressures

脉动风荷载可能导致结构振动并造成疲劳破坏, 也可能产生很大的吸力导致屋面板的倾覆破坏, 因此, 脉动风压场的分析对结构的设计非常重要. 低矮屋盖由于流动分离及再附等复杂湍流特征的影响, 其表面的脉动风压分布特征非常复杂. 由于屋盖风荷载具有明显非定常性, 目前的数值模拟方法难以获得令人满意的结果, 而风洞试验是较为有效的手段.

K. Suresh Kumar 等人研究了在A类和B类两种风场条件下低矮建筑在不同位置的风压谱分布特征, 主要是为了确定它们的形状特征并给出合适的分析模型. 研究表明, 虽然不同条件下风压谱不同, 但是, 经过规格化处理后风压谱在很多情况下具有一致性<sup>[1]</sup>. F. Wu 等人利用原型建筑实测确定风作用下平屋盖角部表面脉动压力<sup>[2]</sup>. H. He 等人利用试验测量的数据, 研究了屋盖角部区域的漩涡特征, 提取出与漩涡特征紧密联系的压力模态<sup>[3]</sup>. Kawai 指出, 平屋盖角部区域可能产生很大的吸力破坏局部结构, 并通过锥形涡研究, 明确了局部峰

收稿日期: 2009-04-11

基金项目: 国家创新研究群体科学基金资助项目(50621062); 上海市科委科技支撑计划资助项目(08dz0580300); 国家自然科学基金资助项目(50678122); 国家自然科学基金青年基金资助项目(50908077)

作者简介: 顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风、数值风洞及结构振动控制.

E-mail: minggu@tongji.edu.cn

值吸力特征及产生原因,提供了一些有效控制措施<sup>[4]</sup>.但这些工作主要针对体型比较规则的低层建筑(包括民居、厂房等),对体型更加复杂的鞍型索网结构的脉动风压场研究较少,欠缺细致的分析.

文献[5]分析了典型鞍型索网结构表面平均风压分布特性,主要集中研究鞍型屋盖脉动风压特性,利用风洞试验同步测量的风压数据,分别考察B类和D类风场条件下底部开敞和封闭的鞍型屋盖脉动风压分布特性,主要分析脉动风压系数分布特征及风压时程、功率谱.

## 1 风洞试验

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 大气边界层风洞中进行.鞍型索网屋盖原型尺寸为:对角线长度为 40 m,鞍型屋盖低点高度为 6 m,高点高度为 16 m.鞍型屋盖风洞试验模型分为底部开敞和封闭两种.模型几何缩尺比为 1/50.在模型内外表面上,各布置 81 个对应的测压点,测点布置如图 1 所示.图中,L 和 H 分别表示鞍型曲面的低点和高点.在我国规范规定的代表两类地面粗糙度类别的 B 类和 D 类风场条件下,分别对缩尺模型进行风洞试验.图 2 为 B 类风场条件下底部开敞鞍型屋盖风洞试验模型. B 类和 D 类风场条件下的风速剖面 and 湍流度  $I_u$  分布如图 3 所示.图中对风速  $U$ 、高度  $z$  均作了量纲一化处理.采用 DSM3000 同步多点电子扫描系统,同步测量内外表面的风压时程,试验采样频率为 312.5 Hz;测压管路长度 0.8 m,采用文献[6]的方法,修正测压管路风压.

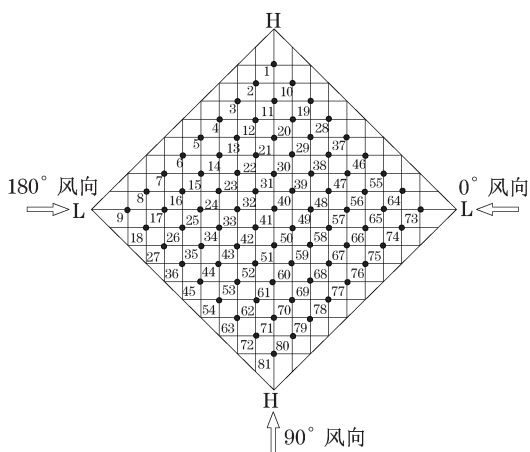


图 1 测压点布置图

Fig.1 Arrangement of pressure taps



图 2 风洞试验模型

Fig.2 Wind tunnel model

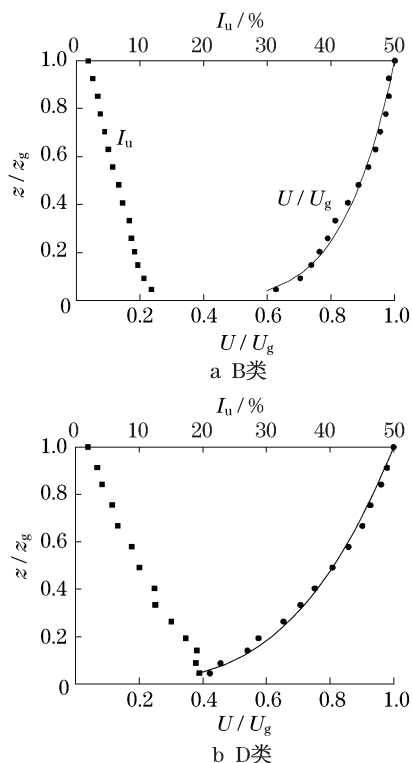


图 3 B 类和 D 类地貌风速剖面 and 湍流度分布

Fig.3 Profiles of the turbulence intensity and mean wind speed in terrain category B and D

## 2 脉动风压系数分布特征

利用刚性模型风洞实验,同步测量鞍型屋盖上下表面的风压时程数据,获得 B 类和 D 类风场条件下鞍型屋盖脉动风压系数分布.分析过程中考虑了上下表面脉动风压的共同作用,研究上下表面合成脉动风压系数分布的影响规律.

定义第  $i$  点的脉动风压系数为

$$C_{pi,rms} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (C_{pij} - \bar{C}_{pi})^2 / N} \quad (1)$$

式中: $N$  为样本数; $\bar{C}_{pi}$  为  $i$  点风压系数的平均值,计算  $j$  个样本点的风压系数  $C_{pij}$  时,考虑了上下表面的风压差.

## 2.1 底部封闭结构脉动风压系数分布特征

通过对比分析 B 类和 D 类地貌风场条件下底部闭合鞍型索网结构的脉动风压系数,明确脉动风压分

布特征.图 4 给出在 B 类风场条件、 $0^\circ$  和  $90^\circ$  风向角下脉动风压系数分布图,图 5 给出了几个典型风向分区脉动风压系数分布,图 6 和图 7 分别给出了 D 类风

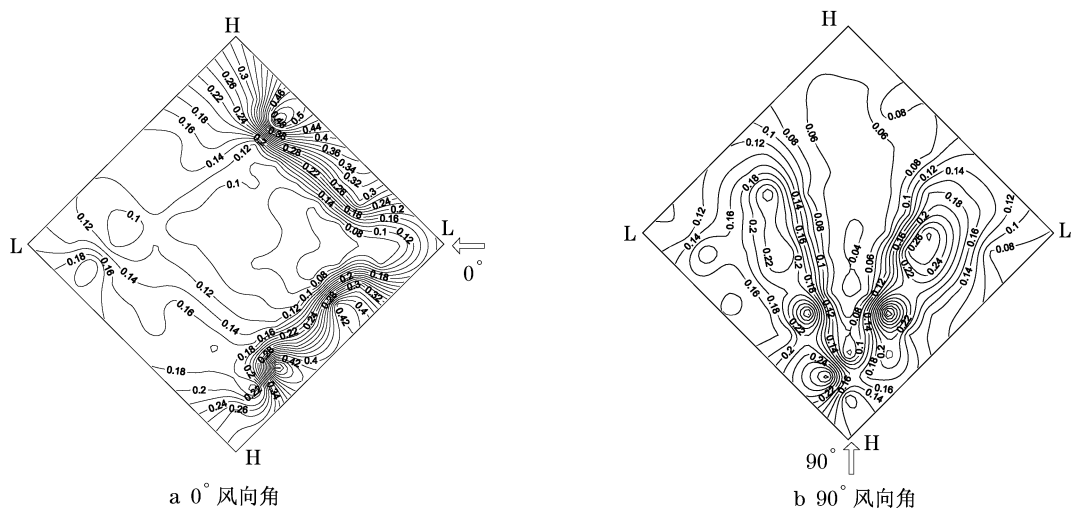


图 4 B 类地貌底部封闭鞍型结构脉动风压系数分布

Fig. 4 Distributions of fluctuating pressure coefficient on saddle roof with enclosed wall in exposure category B

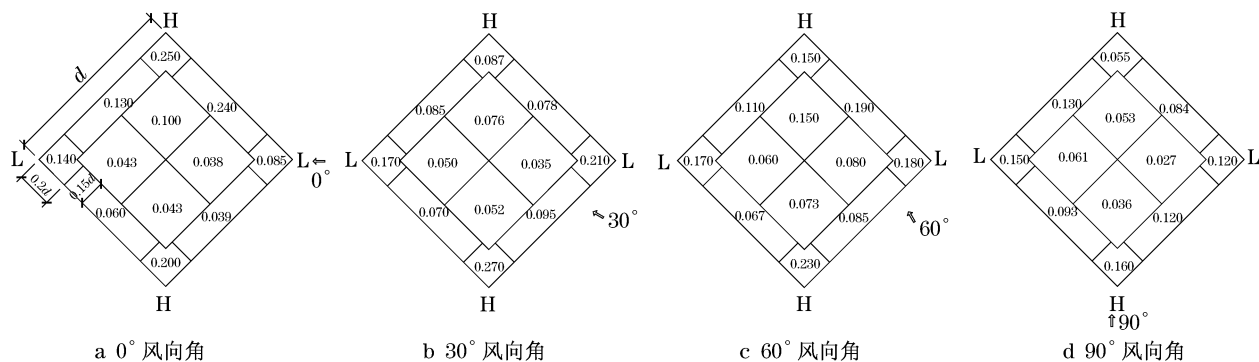


图 5 B 类地貌底部封闭鞍型结构分区脉动风压系数分布

Fig. 5 Distributions of fluctuating pressure coefficients on blocks of saddle roof with enclosed wall in exposure category B

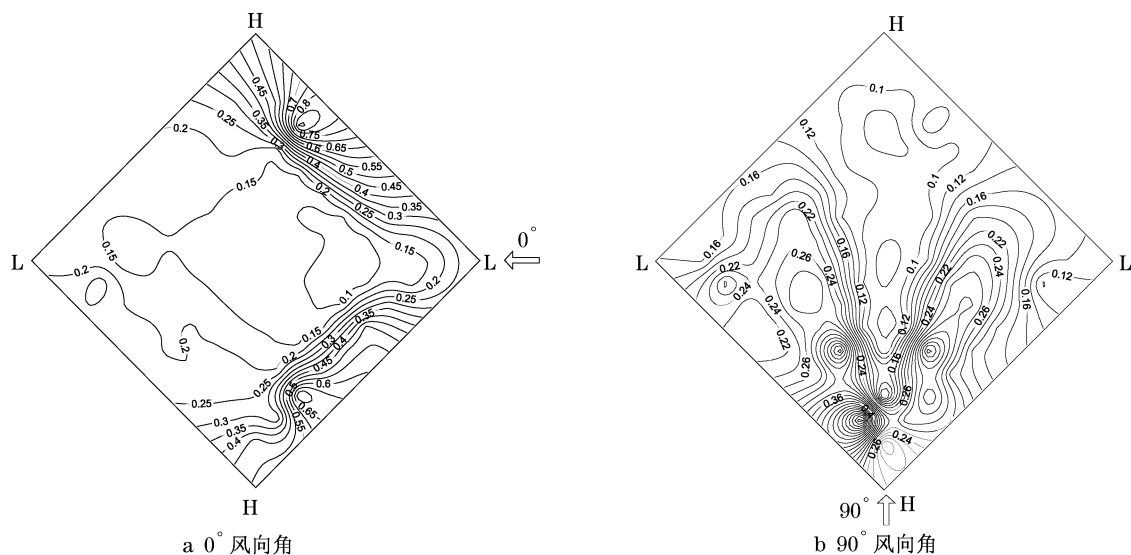


图 6 D 类地貌底部封闭鞍型结构脉动风压系数分布

Fig. 6 Distributions of fluctuating pressure coefficients on saddle roof with enclosed wall in exposure category D

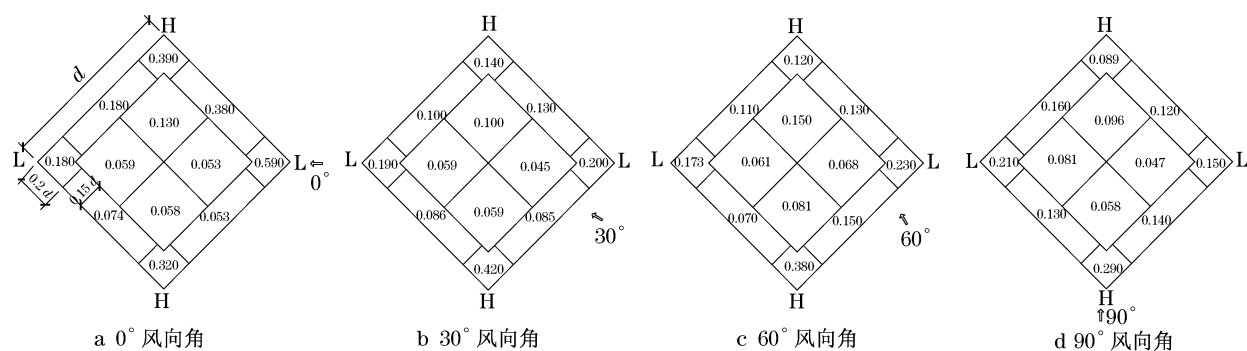


图7 D类地貌底部封闭鞍型结构分区脉动风压系数分布

Fig.7 Distributions of fluctuating pressure coefficients on blocks of saddle roof with enclosed wall in exposure category D

场条件下 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 风向脉动风压系数分布图,以及几个典型风向角下分区脉动风压系数分布图。

由于湍流强度的影响,D类风场的脉动特性要强于B类。 $0^\circ$ 风向时,底部闭合鞍型屋盖低点迎风区域脉动风系数较小,而接近鞍型屋盖高点、靠近边缘区域,风压脉动特性达到最强。脉动风压系数,B类地貌约为0.5,D类约为0.8;下风向区域,在0.1~0.2范围内。由于风从鞍型屋盖低点吹来到达高点区域时,产生了流动分离,导致脉动风压能量增强,从而脉动风压系数变大。 $90^\circ$ 风向时,靠近边缘的三角形区域形成锥形涡。在迎风区域,脉动性相对较强,B类脉动风压系数约为0.14,D类约为0.24。来流风压中,紊流作用对脉动风压产生影响,D类的脉动风压

系数要大于B类。而在下风向区域,由于脉动能量的衰减,脉动风压系数逐渐减弱。其分布特征与平均风压分布特征类似,受屋盖三角形锥形涡影响明显。锥形涡的作用及分布机理复杂,很多学者对锥形涡发展范围、涡核位置、强度变化规律、风压谱等方面进行细致考察,提出基于 Rankine vortex 理论和点涡势流理论<sup>[7-8]</sup>,逐步建立锥形涡研究的理论框架,从而明确锥形涡的作用机理。

表1给出B和D类风场条件下,对底部封闭鞍型屋盖不同区域一些测点的脉动压力系数的对比分析,从而明确不同风场条件下脉动风压系数相互关系。由表1看出,对大部分测点,D类地貌下的脉动风压系数为B类的1.0~1.5倍。

表1 底部封闭鞍型结构几个测点的脉动风压系数

Tab.1 Fluctuation pressure coefficients at taps on saddle roof with enclosed wall

风场	测点号							
	9		73		41		81	
	$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$90^\circ$
B类	0.139	0.104	0.080	0.095	0.093	0.039	0.285	0.083
D类	0.160	0.157	0.160	0.140	0.130	0.070	0.474	0.152

## 2.2 底部开敞结构脉动风压系数分布的基本特征

图8.9分别为B类和D类风场条件下底部开敞鞍型屋盖在 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 风向时的脉动风压系数的分布,图10,11分别给出了B类和D类风场条件下几个典型风向开敞鞍型屋盖分区脉动风压系数分布。

风场条件的变化对底部开敞鞍型屋盖脉动风压特性有很大的影响。分析表明,对底部开敞鞍型屋盖的大部分测点,D类风场条件下的脉动风压系数为B类的1.0~1.5倍,与底部闭合鞍型屋盖在B类和D类时的脉动风压系数分布关系类似。

文献[5]表明,对同一鞍型屋盖,风场条件对平均风压体型系数影响较小;而本试验则说明,风场条件对脉动风压系数影响较大。

## 2.3 开敞和封闭结构脉动风压系数的对比

从上述脉动风压系数分布图对比分析可见,B类风场条件下, $0^\circ$ 风向时,底部开敞鞍型屋盖迎风区域脉动风压系数分布较为均匀,在0.28左右;而底部闭合时,迎风区域脉动风压系数变化较大,在靠近屋盖高点边缘区域,脉动风压系数较大,处于0.3~0.5。屋盖底部开敞和闭合对下风向区域脉动风压系数影响不大,均为0.12左右。 $90^\circ$ 风向时,底部开敞鞍型屋盖的脉动风压系数在靠近边缘的条带区域分布均匀,而底部闭合时,则变化较大。

此外,在B类和D类风场的 $0^\circ$ 风向,从底部闭合鞍型屋盖低点到高点靠近边缘的条带区域,脉动风压系数逐渐增加,而开敞时,变化不明显。这主要由于底

部闭合在 $0^\circ$ 风向时,这些区域产生湍流再附,使得脉动风压系数呈增大趋势。 $90^\circ$ 风向时,底部开敞后的脉动风压系数明显大于闭合时;底部开敞后,鞍型屋盖的脉动风压场由于受到上下两个表面风压分布特性

的影响,同一位置上下表面测点存在脉动风压不同步性,导致脉动风压系数有所加强。在各个风向角下,底部开敞鞍型屋盖局部区域脉动风压系数变化梯度较小,分布相对较为均匀。

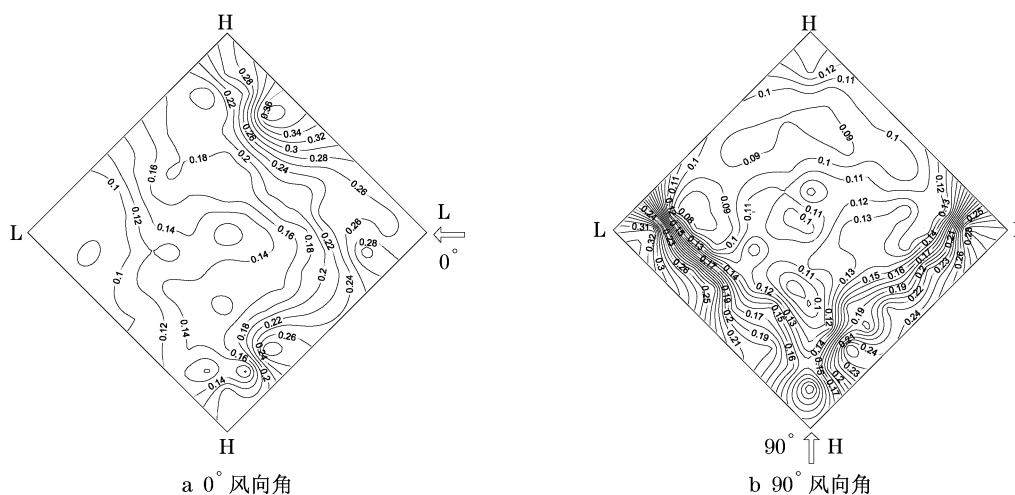


图8 B类地貌底部开敞鞍型结构脉动风压系数分布

Fig.8 Distribution of fluctuating pressure coefficient on saddle roof without enclosed wall in exposure category B

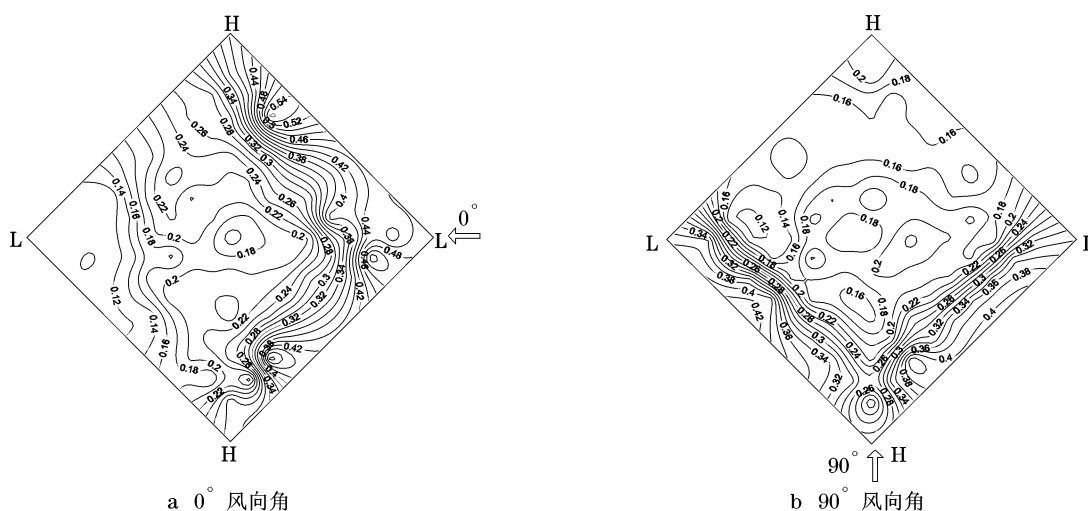


图9 D类地貌底部开敞鞍型结构脉动风压系数分布

Fig.9 Distribution of fluctuating pressure coefficient on saddle roof without enclosed wall in exposure category D

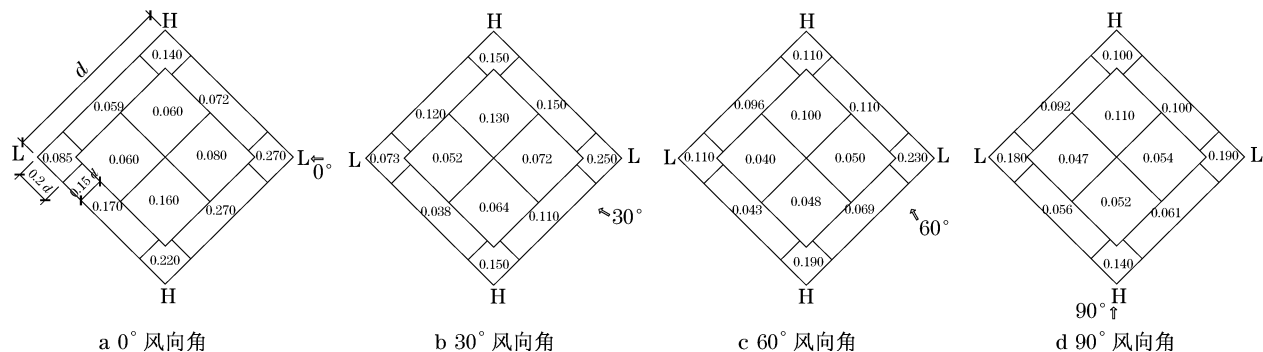


图10 B类地貌底部开敞鞍型结构分区脉动风压系数分布

Fig.10 Distribution of fluctuating pressure coefficients on blocks of saddle roof without enclosed wall in exposure category B

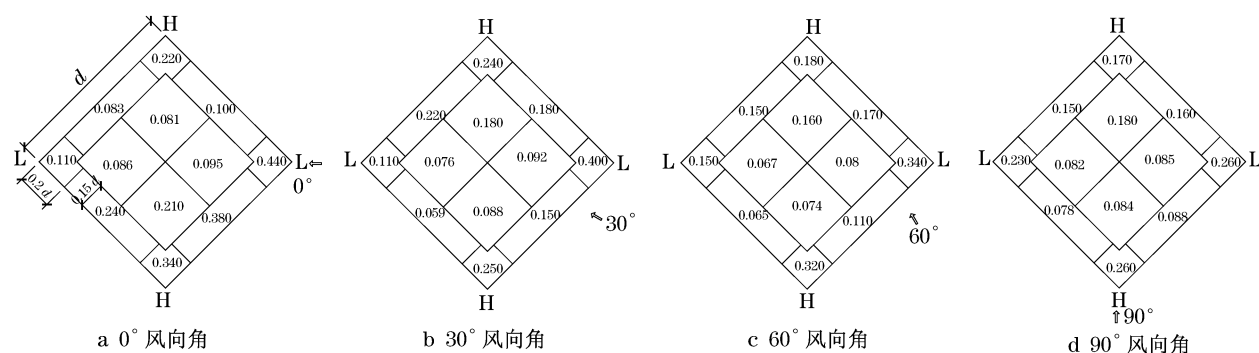


图 11 D类地貌底部开敞鞍型结构分区脉动风压系数分布

Fig.11 Distribution of fluctuating pressure coefficients on blocks of saddle roof without enclosed wall in exposure category D

### 3 鞍型屋盖脉动风压的时域和频域特性

下面分别从风压时程和功率谱两方面对比分析,详细考察底部开敞对鞍型屋盖脉动风压的时域和频域特性的影响。

#### 3.1 风压时程

通过风压时程的对比分析,考察屋盖底部开敞对风压时程的影响规律.图 12 给出了  $0^\circ$  风向位于鞍型屋盖角部、中部及边缘等有代表性几个测点的风压时程.从图中可以清楚看到,大部分测点的平均风压及风压幅值的变化.对于屋盖角部区域 1 测点,底部开敞和封闭时的风压时程呈现交错状态,变化不明显.而在 28 测点,当底部闭合时风压幅值从  $-2.5$  变化到  $-0.5$ ,风压时程曲线在很宽的区间内变化;而底部开敞后,风压时程仅集中在  $-0.5 \sim 0.5$  区间内变化.该点位于接近鞍型屋盖高点边缘区域,平均风压和脉动风压峰值均很强.由于底部开敞后屋盖的堵塞效应有所减弱,使得大部分测点的风压时程变化明显.而位于鞍型屋盖角部区域的 73 测点,底部开敞后,风压时程产生一定变化,但没有 28 测点明显.

#### 3.2 功率谱

在 B 类和 D 类风场条件下,对比分析底部封闭和开敞鞍型屋盖表面风压时程功率谱,从而在频域上考察底部开敞对鞍型屋盖表面脉动风压场的影响.图 13 给出了 B 类地貌下底部开敞和封闭鞍型屋盖风洞模型几个测点(具体位置参见图 1),在  $0^\circ$  风向下体型系数的功率谱对比.图中,横坐标为  $nB/U$ ,  $B$  为鞍型高点的高度,  $U$  为鞍型高点的风速;  $n$  为频率,相应于闭合情况风速为  $11.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;纵坐标为  $nS(n)/\sigma^2$ ,为量纲一功率谱,其中  $S(n)$  为风压自

功率谱,  $\sigma^2$  为对应测点风压系数的均方差.

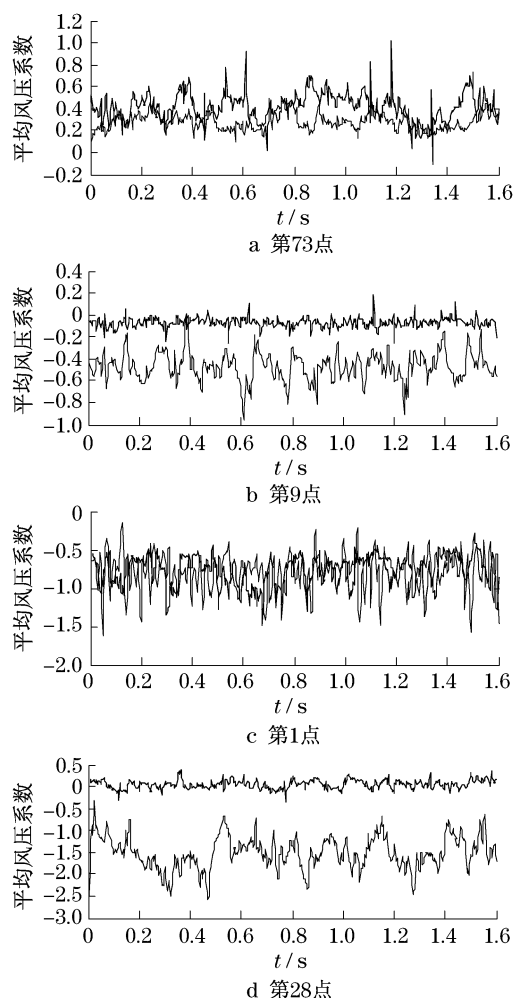


图 12 B类地貌底部开敞和闭合鞍型屋盖风压时程的对比分析

Fig.12 Comparisons of wind pressure time series on saddle roof with and without enclosed wall in exposure categories B

对几个测点的鞍型屋盖体型系数功率谱的分析表明,风压的能量主要集中在折减频率小于 0.3 的

范围内,各测点的频率分布特征受建筑物外形影响较大.功率谱图的对比分析表明,底部开敞后,功率谱在高频段呈现上扬趋势,且动风压能量要高于封闭情况.在测点 30,32 等位置,风压功率谱的高频部分出现几个尖峰,表明气动力在几个集中的高频范围内能量较大.这可能是由于鞍型边缘分离流在该区域内的再附.如果结构的固有频率和这些频率相近,结构就可能出现共振.此外,测点 1 和 28(靠近鞍型高点边缘),由于流动分离等原因,导致所包含的脉动风压能量较大;而位于中部区域的测点 32 和上风向区域的测点 75,脉动风压能量相对较小.

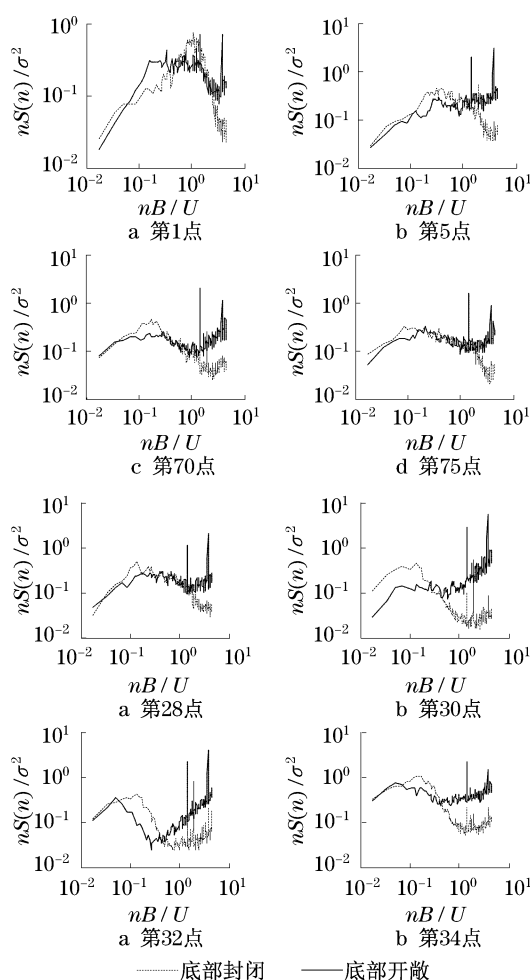


图 13 B 类地貌底部开敞和封闭鞍型结构功率谱对比分析  
Fig. 13 Comparisons of PSD of fluctuating pressures on saddle roof with and without enclosed wall in exposure category B

## 4 结论

(1) 风场条件对脉动风压系数分布有较大影响.在 D 类风场条件下,鞍型索网屋盖脉动风压系数为 B 类地貌下的 1.0~1.5 倍.

(2) 同一地貌条件下,脉动风压的分布类似于平均风压场的分布规律,比较明显的是 90° 风向时,在鞍型屋盖靠近边缘三角形区域产生了明显的锥形涡,该区域风吸力很大,对应的脉动风压系数也很大.

(3) 底部封闭鞍型屋盖的脉动风压能量主要集中在折减频率小于 0.3 范围内;而底部开敞鞍型屋盖,脉动风压在高频段的能量要高于底部封闭型.

## 参考文献:

- [1] Suresh Kumar K, Stathopoulos T. Power spectra of wind pressures on low building roofs[J]. Journal on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74-76): 665.
- [2] Wu F, Sarkar P P, Mehta K C, et al. Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners[J]. Journal on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 403.
- [3] He H, Ruan D, Mehta K C, et al. Nonparametric independent component analysis for detecting pressure fluctuation induced by roof corner vortex [J]. Journal on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 429.
- [4] Kawai H. Local peak pressure and conical vortex on building [J]. Journal on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 251.
- [5] 潘钧俊, 李方慧, 顾明, 等. 不同风场下开敞和封闭的鞍型屋盖平均风压特性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 715.  
PAN Junjun, LI Fanghui, GU Ming, et al. Mean wind pressure characteristics on saddle roof with or without enclosed wall under different terrain conditions [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 715.
- [6] 周恒毅, 顾明. 单通道测压管路系统的优化设计[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7): 798.  
ZHOU Xuanyi, GU Ming. Optimization of dynamic pressure measurement of single-channel tubing systems[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(7): 798.
- [7] Williams C W, Baker C J. Appraisal of a semi-empirical model for the pressure field beneath roof corner vortices[J]. J Fluid and Structures, 1997(11): 767.
- [8] Banks D, Meroney R N. A model of roof-top surface pressure produced by conical vortices: model development[J]. Wind and Structures, 2001, 4(2): 1.