



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

中国东南沿海地区特色民居的
风荷载特性研究

国家科技支撑计划课题 (2006BAJ06B05, 2008BAJ08B14)

姓 名: 赵雅丽

学 号: 0510020060

所在院系: 土木工程学院桥梁系

学科门类: 土木工程

学科专业: 风工程

指导教师: 顾明

副指导教师: 全涌

二〇一一年六月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Science

**Study on Wind Loads on Charateristic
Residential Building in Chinese South-east
Coastal Area**

Supported by the National Key Technology R&D Program

Candidate: Yali Zhao
Student Number: 0510020060
School/Department: School of Civil Engineering
Discipline: Civil Engineering
Major: Wind Engineering
Supervisor: Prof. Ming Gu
Co-supervisor: Assoc-Prof. Yong Quan

June, 2011

中国东南沿海地区特色民居的风荷载特性研究

赵雅丽

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

我国是一个风灾多发的国家，尤其是东南沿海更是台风频袭。风灾中低矮建筑破坏造成的损失超过风灾总损失的半数以上。全面深入地研究低矮房屋表面的风荷载分布特性，可为建筑抗风设计提供重要依据以及为建筑结构规范修订提供参考数据。本文在大量低矮房屋的风洞试验的基础上，分析了具有中国特色的民居——双坡屋面系列、平屋面系列、四坡屋面系列以及三种典型山墙表面的平均风压及脉动风压分布特性及影响因素，并进一步讨论了屋面风压的非高斯特性及风压极值的分布规律。本文主要进行了以下几方面的工作：

1、从风洞模型试验、全尺寸现场实测以及计算机模拟三个方面综述了当前低矮房屋的风荷载特性的研究成果以及目前各国荷载规范中关于低矮房屋风荷载的规定。

2、介绍了双坡屋面系列、平屋面系列、四坡屋面系列共 13 个中国特色典型低矮房屋的刚性模型风洞试验概况，并讨论了各种屋面的风压平均值和脉动值的分布特征，分析了湍流度和挑檐、女儿墙等附属结构对屋面风压分布的影响以及屋面典型测点的风压系数随风向角的变化规律。

3、分析了三种典型山墙自身的表面风压分布规律以及对屋面风压分布的影响规律。首先研究了山墙自身的表面风压平均值和脉动值的分布特征以及湍流度和风向角的影响；然后讨论了山墙形式对屋面平均风压和脉动风压的影响；最后分析了山墙对挑檐风压分布的影响。

4、对低矮房屋的屋面风压的非高斯特性进行了研究。首先研究了双坡屋面、平屋面风压的概率分布特性。然后讨论了屋面风压的非高斯特性以及空间相关性；最后用四种常见的概率分布函数对屋面典型区域的风压系数进行了拟合，得到了典型低矮房屋的屋面风压的概率分布规律。

5、对屋面风压极值分布规律研究。首先介绍了 6 种常见的极值计算方法，并根据试验数据处理结果的比较以及风压的非高斯特性分析挑选出最准确合理的风压极值计算方法。在此基础上，对低矮房屋的屋面风压极值分布规律进行了详细的对比分析。

关键词：低矮房屋，风洞试验，风压系数，非高斯性，极值风压

ABSTRACT

China is a country with frequent occurrence of storms, particularly along the southeast coast typhoon attacking more frequently. Over half of the losses in wind storms were caused by damage to low-rise buildings. The in-depth study on load distribution characteristics of low-rise building can provide an important reference to wind-resistant design, and provide reference data for the structure code and standard revision. On the basis of wind-tunnel experiments, the wind load characteristics of Chinese residences, such as the series of gable roof, flat roof, hip roof and three typical chinese architectural gables, were analysed in this paper. And the Non-Gaussian features and extreme value of wind load on building were further discussed. The research includes the following aspects:

1. The current research results of wind load characteristics on low-rise building were introduced from the wind-tunnel experiments, full-size field measurement and computer simulation aspects. And the national wind load code/standard of low-rise building was described in this paper.

2. The wind tunnel experiments on thirteen typical chinese style low-rise building models were researched. The characteristics of average wind pressure distribution and fluctuating wind pressure distribution were discussed. The effects of several factors on wind pressure distribution were analyzed, such as the turbulence intensity, eaves, parapet etc. The variation of wind pressure coefficient with angle of wind direction was deduced.

3. The wind tunnel experiments were developed on three typical gable. Firstly the distribution characteristic of average and fluctuating wind pressure on the gable surface were researched. The effects of turbulence intensity and angle of wind direction were analyzed. Then the effects of gable on the average, fluctuating wind pressure distribution on the roof and the wind pressure distribution on eaves were discussed.

4. The Non-Gaussian characteristics of wind pressure on low-rise building were described. Firstly, the probability distribution of wind pressure on gable roof and flat roof was researched. Then the Non-Gaussian characteristics and spatial correlation of wind pressure on the roof was analyzed. The wind pressure coefficients of typical area on the roof were fitted with four common probability distribution function. Then the

probability distribution of wind pressure on low-rise building was concluded.

5. Study on extreme value distribution of wind pressure. Firstly six common calculation method of extreme value were introduced. Base on the former experiment result and the Non-Gaussian characteristic research results of wind pressure, the calculation method which is fitting the experiment data most accurately was selected. Then the wind pressure extreme value distribution on low-rise building was analyzed in detail.

Key Words: low-rise building, wind tunnel experiment, wind pressure coefficient, Non-Gaussian characteristic, wind pressure extreme value

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 低矮房屋的风灾破坏及主要特征.....	1
1.2 低矮房屋的风洞模型试验.....	2
1.2.1 建筑外形及屋面形式对风载荷特性的影响.....	3
1.2.2 屋檐构造和覆盖材料对风载荷特性的影响.....	6
1.2.3 房屋开洞对风载荷特性的影响.....	9
1.2.4 周围环境及建筑物之间相互干扰对风荷载特性的影响.....	11
1.2.5 低矮房屋屋面风压极值及脉动风压的研究.....	12
1.3 低矮房屋在自然风环境下的全尺寸现场实测.....	15
1.3.1 屋檐形式对屋面风压分布的影响.....	15
1.3.2 对开洞低矮房屋净风压的全尺寸现场实测.....	16
1.3.3 对低矮房屋的脉动压力的全尺寸现场实测.....	20
1.3.4 专家系统数据库.....	22
1.4 低矮房屋风载荷的计算机数值模拟研究.....	22
1.4.1 新技术和新型数学工具在风工程领域的应用.....	22
1.4.2 标准建筑模型以及绕流场数值模拟.....	23
1.5 规范情况.....	24
1.6 当前研究的不足.....	27
1.7 本文的研究目的和主要工作.....	27
第 2 章 风洞试验概况及屋面风压分布特征.....	29
2.1 引言.....	29
2.2 课题背景与风洞试验.....	29
2.2.1 风洞设备与测量系统.....	30
2.2.2 大气边界层风场的模拟.....	31
2.2.3 试验模型.....	32
2.2.4 试验数据处理.....	36
2.3 试验数据可靠性验证.....	36

2.4 双坡屋面风压分布的基本特征和影响因素分析.....	37
2.4.1 平均风压系数分布.....	37
2.4.2 脉动风压系数分布.....	40
2.4.3 不同屋面类型典型点风压系数的比较.....	42
2.4.4 湍流度对屋面风压系数的影响.....	44
2.4.5 屋檐形状对典型部位风压系数的影响.....	45
2.5 平屋面风压分布的特征.....	47
2.5.1 平均风压分布.....	47
2.5.2 脉动风压分布.....	50
2.6 四坡屋面风压分布特征和风场湍流的影响.....	52
2.6.1 平均风压分布.....	54
2.6.2 脉动风压分布.....	58
2.6.3 典型测点风压的特征.....	61
2.6.4 湍流度的影响.....	67
2.7 本章小结.....	71
第 3 章 山墙风压分布规律以及山墙形式对屋面风压分布的影响... 75	
3.1 引言.....	75
3.2 山墙表面的风压分布特性.....	76
3.2.1 平均风压分布.....	76
3.2.2 脉动风压分布.....	80
3.2.3 风向角对山墙表面风压的影响.....	82
3.2.4 湍流度对墙面风压的影响.....	84
3.3 山墙对屋面风压分布特征的影响.....	86
3.3.1 平面风压分布.....	86
3.3.2 山墙对屋面的脉动风压的影响.....	91
3.3.3 山墙对屋檐的影响.....	94
3.4 本章小结.....	96
第 4 章 低矮房屋的屋面风压的非高斯特性研究 98	
4.1 引言.....	98
4.2 风压的概率分布特性.....	98
4.2.1 风压的高斯性与非高斯特性的数学描述.....	98

4.2.2	风压的概率密度分布.....	100
4.3	非高斯特性与风压的空间相关性.....	107
4.4	屋面风压的概率分布.....	113
4.4.1	双坡屋面.....	115
4.4.2	平屋面.....	121
4.5	本章小结.....	123
第 5 章 低矮房屋屋面极值风压计算方法及分布特特性研究.....		125
5.1	引言.....	125
5.2	常用极值估算方法介绍.....	125
5.3	不同极值估算方法计算结果比较.....	129
5.3.1	各种极值估算方法的误差比较.....	129
5.3.2	各风向角下的最不利风压系数误差率比较.....	131
5.3.3	两种计算方法下极值分布特征比较.....	134
5.3.4	两种计算方法下最不利极值分布的比较.....	136
5.4	屋面风压极值分布特征.....	138
5.4.1	最不利风向角下的风压极值分布特征.....	139
5.4.2	双坡屋面系列最不利极值分布特征.....	141
5.4.3	平屋面系列最不利极值分布特征.....	142
5.4.4	四坡屋面系列最不利极值分布特征.....	143
5.5	本章小结.....	145
第 6 章 结论与展望		148
6.1	结论.....	148
6.2	进一步工作的方向.....	150
致谢		152
参考文献		153
附录 A		160
附录 B.....		183

附录 C	185
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	190

第1章 绪论

1.1 低矮房屋的风灾破坏及主要特征

风灾是自然灾害中影响非常广泛的一种，其中尤以台风的破坏力最大、造成的损失最为严重，常给人类生命财产带来巨大的损失。如1991年日本的9119号台风，造成5675亿日元的经济损失^[1]，2005年8月，肆虐的美国路易斯安娜州的“卡特里娜”飓风是历史上造成损失最大的飓风之一，共有1000多人死亡，经济损失高达900多亿美元^[2]；2008年5月，强热带风暴“纳尔吉斯”席卷整个缅甸，共造成约10多万人死亡和失踪。

我国是一个风灾发生较为频繁的国家，东南沿海频遭台风袭击，造成了巨大的经济损失。1994年17号台风^[3]在浙江温州登陆，给该地区造成巨大损失，倒塌和损坏民屋80多万间，死亡1000多人，直接经济损失108亿人民币。2006年7月强热带风暴“碧利斯”横扫南方六省，使2833.5万人受灾，216人死亡，149人失踪，26.2万间房屋倒塌，30.7万间房屋损坏，直接经济损失200.4亿元^[4]。2008年9月，“黑格比”台风在广东省登陆，致使广东、广西、云南、海南四省受灾，倒塌房屋四万多间^[5]。

风荷载是建筑结构的重要结构设计荷载之一。多次的风灾调查表明，低矮建筑破坏造成的损失超过总损失的半数，风灾中量大面广的低矮房屋的毁坏、倒塌及其带来的人员伤亡是造成风灾损失巨大的主要原因^[3]。自二十世纪七、八十年代至今，低矮房屋的风荷载问题受到了风工程工作者和建筑师们的极大关注。

世界上大部分的结构属于低矮建筑物，包括居室、厂房、商业建筑及公共建筑等。在我国，通常人们把高度在15~20米以内的1~6层的各类建筑称为低矮房屋。它们在建筑风格、屋盖形式、平面布置上千差万别，建造场地风场条件也各不相同。

从风灾调查结果可以看出^[3]，低矮房屋的破坏往往是从表面维护体系，尤其是屋盖体系的破坏开始的。风灾过后房屋受损严重，主要有四种破坏特征：

- ①屋盖受损严重，甚至整个屋盖被风吹走（见图1.1(a)）；
- ②侧墙被风吹倒导致房屋倒塌（见图1.1(b)）；
- ③屋檐、山墙的顶边、屋盖角部和女儿墙的破坏（见图1.1(c)）；
- ④木结构的房屋维护结构，尤其是屋盖和门窗遭到严重破坏（见图1.1(d)）。

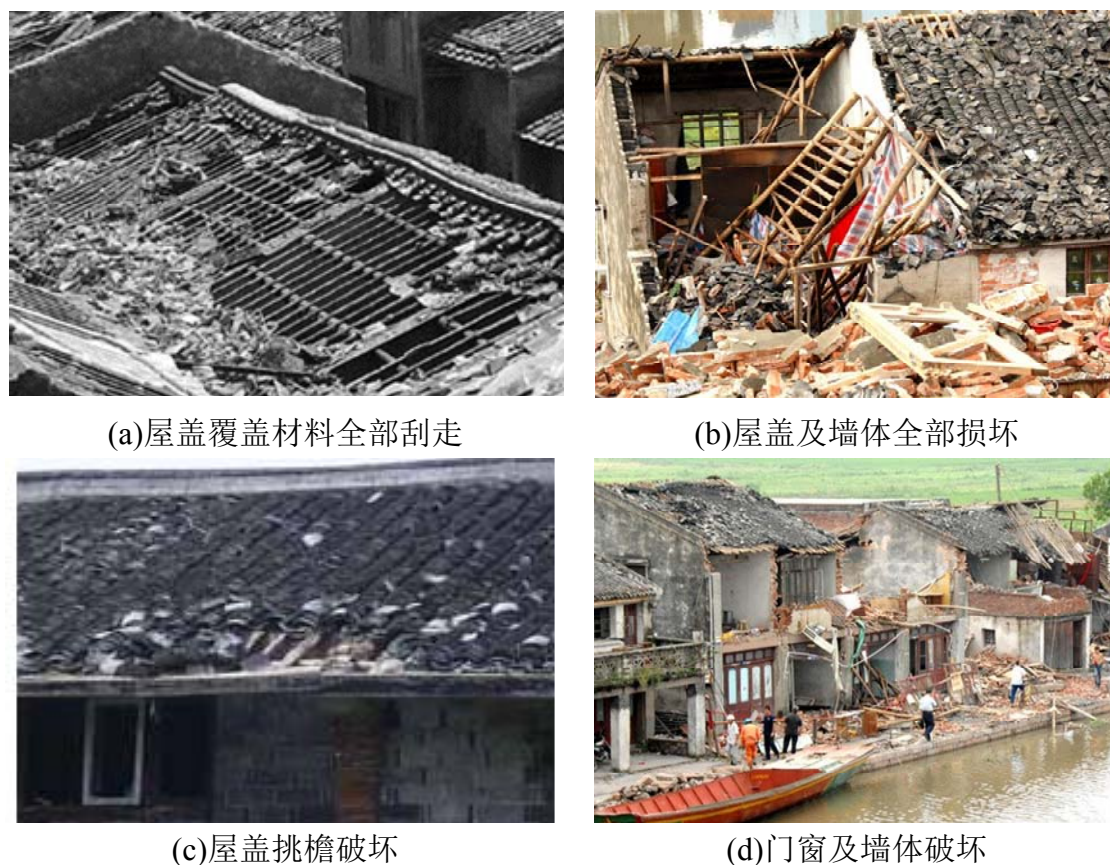


图 1.1 风灾破坏主要特征 (<http://xz7.2000y.net/mb/2/ReadNews.asp?NewsID=189450>)

由于低矮房屋的刚度一般比较大，在风荷载作用下发生较大幅度振动的可能性较小（大跨、柔性屋面除外），因此其结构风致动力响应不是主要问题，改善建筑物的外形以减小外加风荷载，尤其是屋盖体系所受的风荷载才是解决低矮房屋抗风问题的最有效途径。要做到这一点，首先必须了解低矮房屋的风荷载特性，尤其是屋盖体系的风荷载特性。在过去的四十年中，有关低矮房屋风荷载特性的研究主要借助于三种手段：一是风洞试验，二是全尺寸现场实测，三是计算机数值模拟（CFD 方法）。

1.2 低矮房屋的风洞模型试验

1893 年丹麦的 Irminger 和 Vogt 首次进行了建筑物的风洞试验；20 世纪早期的风洞试验都是在喷气式风洞中进行的，试验风场为均匀场，没有对大气边界层的特性进行完全的模拟。直到 1958 年丹麦的 Jensen^[6]提出，研究气流现象的正确模型试验应在湍流边界层中进行，并与 Davenport 在加拿大西安大略大学建立了最早的边界层风洞。

到目前为止，风洞试验一直是研究各种建筑物风荷载特性的应用最广泛、

最成熟的实验手段，并为世界各国制定风荷载规范提供基础数据。应用风洞试验的研究内容的文献也是最多、最全的。内容涵盖了建筑外形、屋面形式、屋面构造及其覆盖材料对建筑物表面的风压分布的影响，群体干扰对低矮房屋表面风压的影响，房屋开洞对建筑物内、外压的影响以及风压极值和准定常理论应用的研究等。

1.2.1 建筑外形及屋面形式对风荷载特性的影响

低矮房屋的建筑外形和屋面几何形式，包括房屋的高宽比、平面尺寸、屋盖坡度，屋盖形式等等。这些因素可改变建筑物周围的气流模式，对屋面风压分布有着重要的影响。

1.2.1.1 高宽比对屋面风压分布的影响

Gerhardt 和 Kramer 等人^[7]在对具有较大宽度的平屋面低矮房屋进行风洞试验时发现：当房屋的高宽比 $h/b \geq 0.1$ 时，其屋面的风压分布受房屋相对高度的影响十分明显；房屋的檐口高度 h 对其屋面尤其是迎风屋面的风压系数也是有影响的；迎风墙面的平均风压系数受房屋几何尺寸的影响较小，如图 1.2 所示。

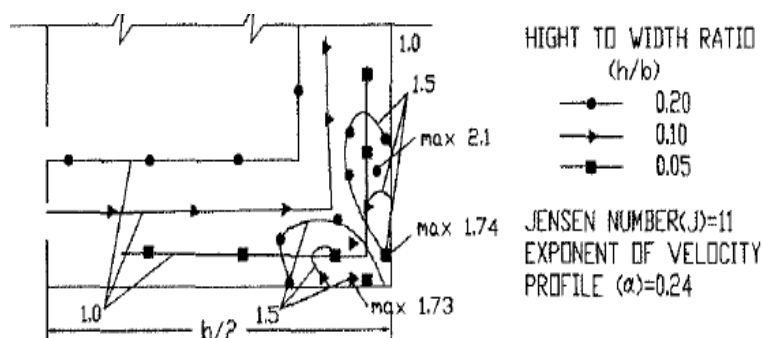


图 1.2 房屋宽度较大时屋面相对高度 h/b 对风压分布的影响^[7]

1.2.1.2 屋面坡度、屋面形式对屋面风压分布的影响

由于建筑造型、使用功能和排水等方面的需要，低矮房屋常采用坡屋盖的形式。由于对采光和通风有较高的要求，工业厂房通常采用单坡屋盖、锯齿形屋盖等。由于造型和大跨度设计的要求，公共建筑较多的采用大型平板（网架）屋盖或曲线形屋盖。而对于大量的居住建筑而言，采用最多的是双坡和四坡屋盖以及平屋盖。到目前为止，低矮建筑屋面形式对其表面风压分布的影响是风工程研究者们关注的焦点之一。到目前为止，有关低矮房屋的风压实测和风洞试验研究大部分是围绕着各种不同形式的屋面开展的，而其中以双坡和四坡屋面为最多。

(1) 双坡屋面

Holmes^[8]对不同坡度的单层双坡屋面进行了风洞试验。如图 1.3 所示，在迎风屋面，气流的分离集中在屋檐的附近，故在此处形成较高的平均负压，在背风屋面，屋脊线附近由于存在明显的气流分离而形成较高的吸力区，远离屋脊由于气流不再附着而使风压分布趋于均匀，吸力值也比迎风面小。当风向垂直于屋脊时，迎风面的风压系数随着坡度的增加而减小，并且分布趋于均匀，如图 1.4 所示，风压系数在坡角从 10°增加到 15°时背风面有所增大，从 15°增加到 20°时略有减小，分布趋于均匀，再增大则无明显地变化。由于坡屋面的屋檐、屋脊、山墙边缘的附近容易形成局部的较高负压区，所以屋面的局部最大平均风压与屋面坡角和风向角密切相关。

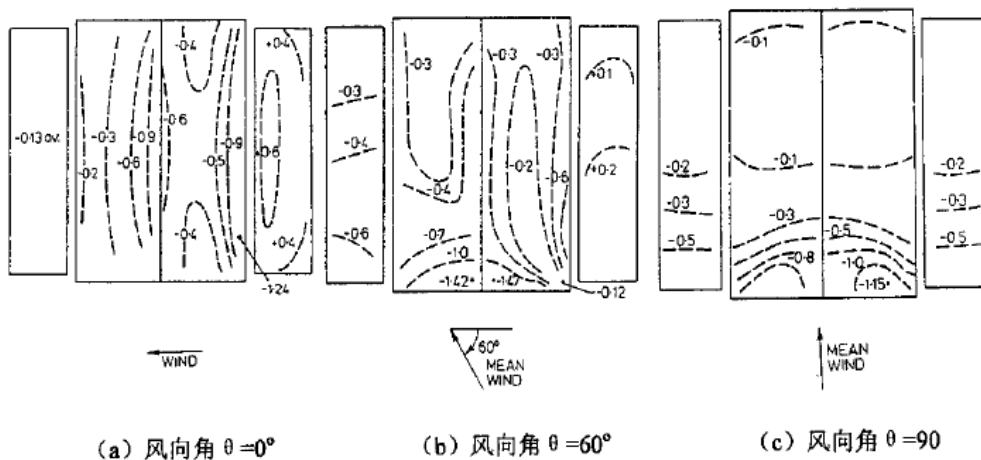


图 1.3 10° 双坡屋面平均风压系数的风洞试验结果

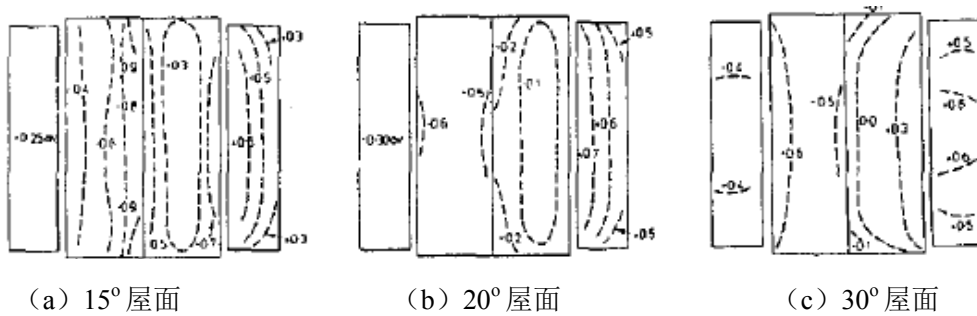


图 1.4 15° 20° 30° 双坡屋面平均风压系数的风洞试验结果

(2) 四坡屋面

四坡屋面是低矮房屋中另一种常见的坡屋面形式。根据已有的风灾调查结果，四坡屋面的低矮房屋在龙卷风或飓风的袭击下所遭受的破坏情况比双破屋面轻微，这一现象引起了不少研究者的关注。Xu 等人^[9]进行了坡角分别为 $\beta=15^\circ$ 、 20° 、 30° 的四坡屋面的风洞模型试验，如图 1.5 所示，该试验的模型尺寸、缩尺比、风场条件及测试方法与 Holmes^[8]所进行的双坡屋面的试验完全相

同，并将其试验结果与 Holmes^[8]的试验结果进行了对比。从试验结果可以发现，对于屋面平均风压的分布和大小，除 0° 风向角下靠近屋面中间部位两者的情况相似外，其余情况两者有很大的不同。在 45° 和 90° 风向角下，双坡屋面的最大平均风压要大于四坡屋面，这表明屋面前缘、屋脊和坡脊等处由于气流分离形成了负高压区，并且在这些平均风压高的区域，其脉动风压也往往出现峰值。

图 1.6 是屋面坡度为 18.4° 的四坡屋面和双坡屋面最大峰值吸力的比较图，可以看出双坡屋面在山墙顶端部分产生了很高的负极值，而四坡屋面在对应部位产生的最大峰值吸力要比双坡屋面小。此外，Xu 还分别对比研究了 15° 、 20° 和 30° 的双坡屋面和四坡屋面的最大峰值吸力的分布。对于 20° 和 30° 坡屋面来说，最大峰值吸力对风向角的变化特别敏感；一旦风向角稍偏离最不利风向角，峰值吸力会迅速衰减。四坡屋面的屋脊形式能有效地抑制峰值吸力，同双坡屋面相比， 15° 和 20° 的四坡屋面上最不利吸力峰值较小，但对于 30° 坡屋面来说，两者几乎相同。

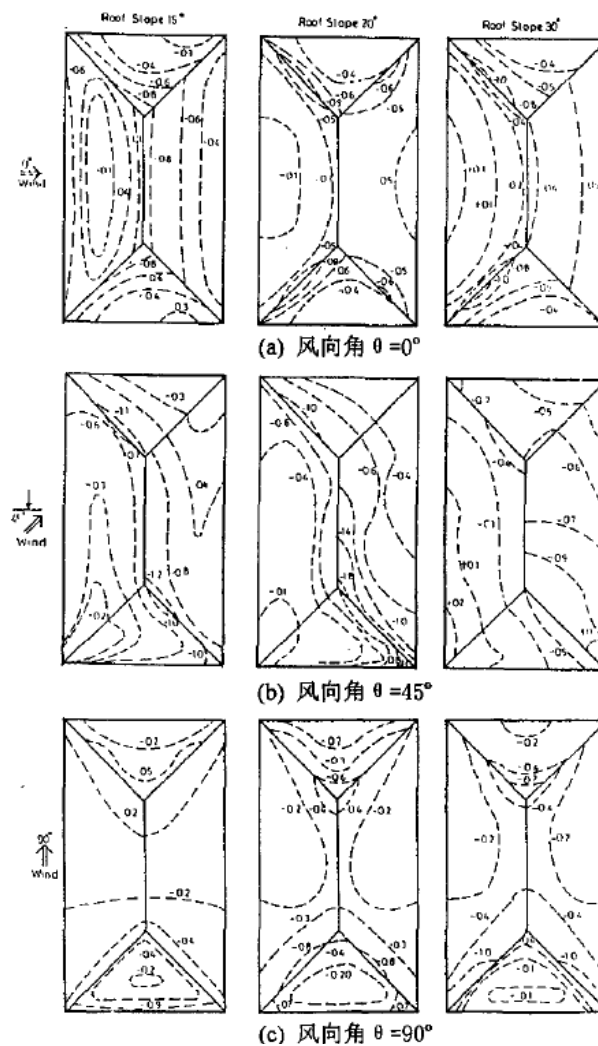


图 1.5 四坡屋面平均风压系数的分布

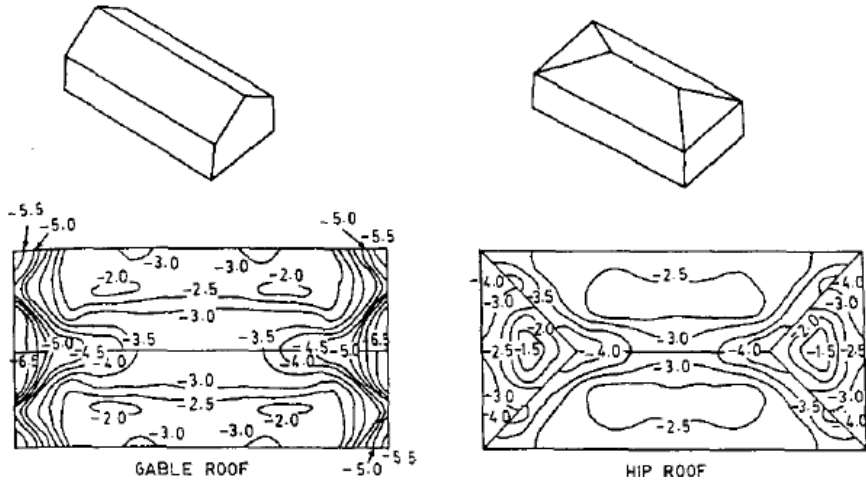


图 1.6 双坡和四坡屋顶最大峰值吸力的比较 ($\beta=18.4^\circ$, $\theta \approx 0^\circ \sim 360^\circ$)

(3) 平屋面

Stathopoulos^[10]等对平屋面进行了风洞试验研究, 结果如图 1.7 所示。在迎风屋面边缘由于涡的产生, 出现了负高压区, 负高压区限于 $\xi/H \approx 1$ 的区域 (ξ 为到屋面边缘的距离), 在其它区域风压系数 C_p 变化较小, 尤其是在平屋面的屋角处由于形成锥形涡和三角翼形涡易产生较大的负压和极值风压。

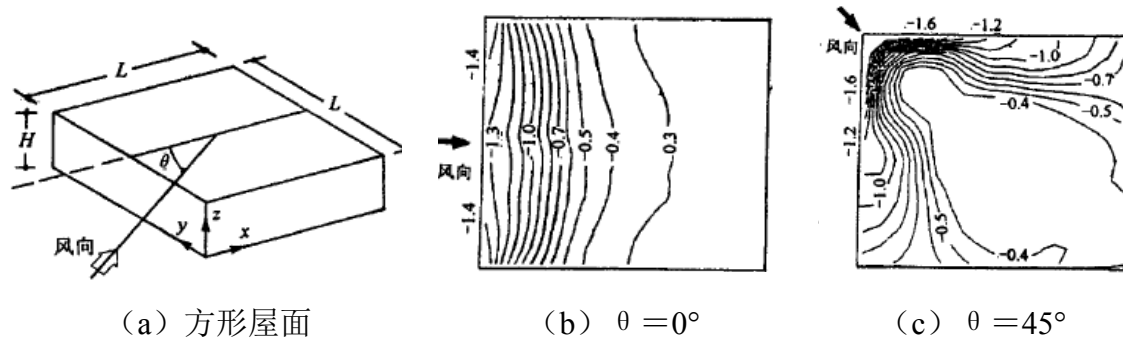


图 1.7 平屋面及平均风压系数等值线

1.2.2 屋檐构造和覆盖材料对风荷载特性的影响

低矮房屋的屋檐构造 (如檐口、女儿墙) 和屋面材料 (如瓦片、屋面隔热保温层等) 等对屋面的风压分布有着特殊的影响。檐口附近的气流分离会导致檐口上下表面的风压系数及压力峰值明显提高, 其提高的幅度大小与屋面坡角、房屋高度、风向角等均有密切的关系。

1.2.2.1 屋檐构造对风压分布的影响

Blackmore^[11]等人通过试验发现, 将平屋面的边缘由直角改为斜角时, 可大大减小屋面的局部面积平均吸力, 当屋檐改为 30° 斜角时, 屋面角部构件的平均

风荷载可减小达 70%，而整个屋面的风荷载可减小 30% 以上，如图 1.8 所示，这主要是因为屋檐角度的减小抑制了迎风屋面角区附近锥形涡的产生，使这些部位气流分离后所产生涡旋的分布范围更窄，从而使得因这些涡旋所产生的较高负压区的分布范围更窄。

低矮房屋的屋檐多采用挑檐或女儿墙的形式，由于挑檐在迎风面上下表面均有较大风荷载作用，因此该部位在风灾中常常最易受损（见图 1.9）。

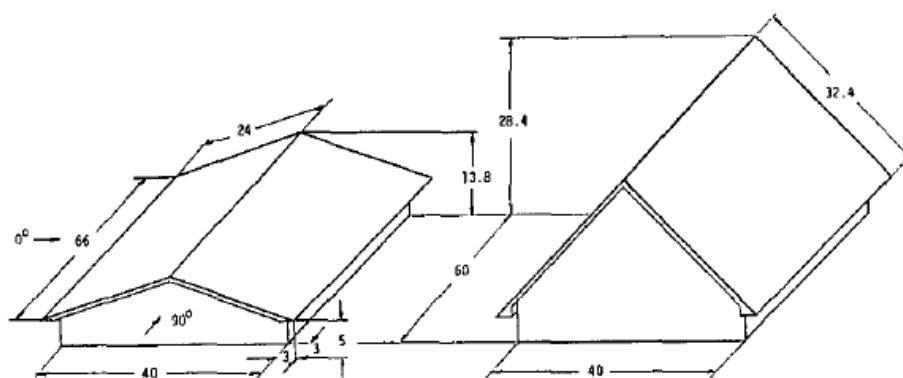
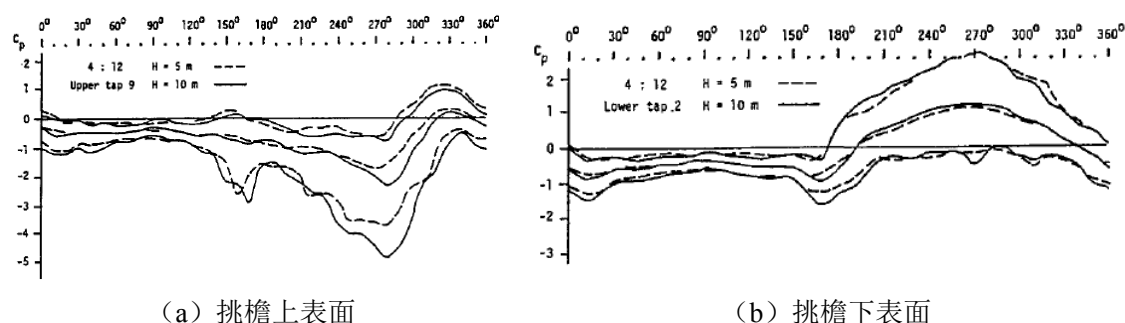


图 1.8 带挑檐双坡屋面房屋风洞试验原型



(a) 挑檐上表面

(b) 挑檐下表面

图 1.9 风压系数随风向角变化规律

对挑檐的风荷载特性不少研究者都给予了特别的关注。国外许多学者做了大量的风洞试验^{[12][16]}，对挑檐表面风压分布及其对屋面表面风压的影响进行了研究并且给规范提出了建议值。针对小角度 ($\theta \leq 10^\circ$) 双坡屋面的挑檐所进行的风荷载试验其结论不能直接适用于较大屋面坡角的情况，Stathopoulos 和 Luchian^[17]等人专门对较大屋面坡角 ($\theta = 10^\circ \sim 45^\circ$) 的双坡屋面的挑檐进行了风压分布试验，测试了在不同风向角下挑檐的局部和整体的风压分布。数据显示当真正的同步压力被记录下来时，其总升力系数有明显的减小，这说明将挑檐上下表面的最大风压进行简单的叠加来确定挑檐的最不利风压力是偏于保守的。

Kareem 等人^[18]对女儿墙屋面风压的影响做了研究。研究结果表明：对平屋盖来说，女儿墙的设置对减小迎风屋面边缘和角部的局部风吸力非常有效。这

是因为女儿墙的存在抬高了气流分离剪切层和锥形涡的发生位置，使其不再附着在屋面的边缘。女儿墙对屋面风压分布的影响与房屋的几何尺寸、女儿墙的相对高度等因素有关，根据 Kind^{[19]-[20]}等人进行的风洞试验，在斜风向作用下，靠近迎风屋面角上的最大吸力随女儿墙高度的增加而单调递减。但是，鉴于女儿墙本身也会引起吸力峰值分布范围的扩大，屋面某些部位的面积平均风压反而会因女儿墙的设置而增大。Surry 和 Lin^[21]等人对具有锯齿形、方形和圆形等不同边界形状的女儿墙进行了风洞试验，结果发现，与普通的女儿墙相比，这些几何形状改变后的女儿墙均能大大减小迎风屋面角部和边缘的峰值吸力。其中，一种孔隙率为 50% 的多孔女儿墙最为有效，它可使屋面角部较高的吸力下降 70%，并使得屋面风压分布变得非常均匀。

1.2.2.2 屋面覆盖材料对屋面风荷载的影响

在遭受台风、龙卷风等强风袭击时，屋面覆盖材料（如瓦片、保温隔热层等）脱落和损坏虽然只是一个局部问题，但在很多情况下却可以导致整个屋盖系统的破坏。Hazelwood^[22]是较早开展屋面覆盖材料风荷载分布的研究者之一，他对屋面瓦的上、下表面的风压分布进行了详细的试验，分析了导致屋面瓦失效的力学机理，指出强风引起的升力是导致松铺屋面单元移位和脱落的主要原因。此外，Peterka^[23]对屋面瓦周围的空气流动情况和风压分布进行了研究，Kind、Savage 和 Wardlaw^[24]等人对屋面隔热板进行了风洞试验，并测算了引起屋面松铺隔热板移动脱落的临界风速。Kramer 和 Gerhardt 等人^[25]专门研究了松散性屋面系统的风压特征。Gerhardt 等人^[26]还研究了屋面铺设物的透风性与其上、下表面风压之间的相互关系，并提出了估算其失效风速的理论方法。

Amano, Fujii 和 Tazaki^[27]等人对屋面隔热板下增设架空层后的风荷载特性进行了研究，其典型结果如图 1.10 所示。Bieukiewicz 和 Sun^[28]等人在对松铺屋面系统的风荷载试验中，发现屋面铺设物下留一定的间隔高度对铺设物的表面风压有明显的影响，即使留出的间隔高度很小也能大大降低铺设物表面的平均和峰值吸力（见图 1.11）。

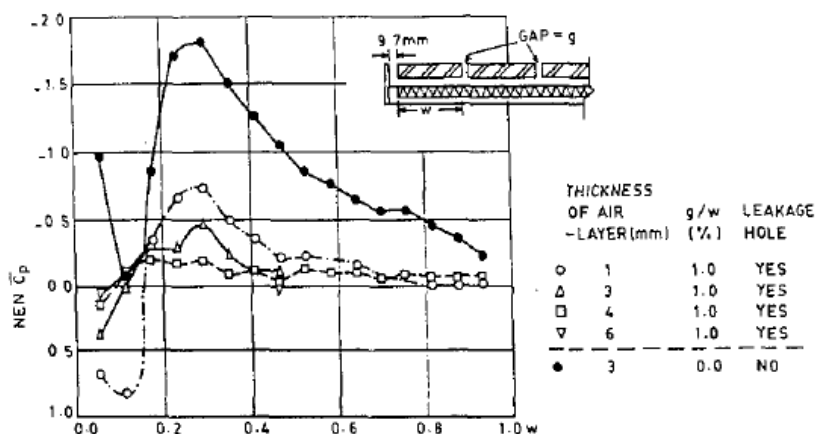


图 1.10 空气层和透气孔对屋面隔热板风压分布的影响

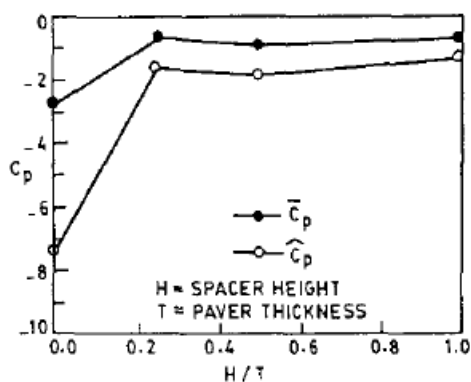


图 1.11 松铺屋面板的风吸力与间隔高度和板厚之比 H/T 的关系

1.2.3 房屋开洞对风载荷特性的影响

低矮房屋外表面开洞对房屋内外风压的分布及大小均有明显的影响。风灾调查的结果也显示许多房屋在遭遇强风破坏时，不单单是外部风荷载过大所致。在正常情况下，房屋内部压力一般较小，且不受外部气流的影响，约为 25~100Pa，然而当房屋的门窗在突遇强风而遭致破坏时，房屋的内部风压会有明显的增强，当房屋外表面的脉动负压与房屋内部的正压共同作用时，对某些结构构件，尤其是屋面覆盖材料单元及其连接构件而言受力非常不利。

平均内部压力的理论估算方法目前主要是基于简化的平均稳态压力假设给出的，在房屋开有洞口的情况下，内部压力是参照洞口处的外部压力给出的。但是有研究表明，这种稳态假定方法并不完善，特别是在当房屋的开洞面积相对房屋内部的体积较大时，会产生 Helmholtz 共振，使房屋的内压放大。Holmes^[29], Liu 等人^{[30][31]}, Vichery 等人^[32]对房屋迎风墙面开有单个洞口时的内压脉动动力特性进行了研究。Harris^[33]则对迎风墙面和背风墙面开有分布性孔洞的情形提出了一种新的线性化理论。

平均内压的稳态解可以根据标准开洞的平面方程得到，假定紊流经过洞口时

$$Q = C_D A \sqrt{2(p_e - p_i) / \rho} \quad (1.1)$$

式中： C_D 为交换系数， A 为开孔面积

在单面开洞的情况下，平均内压将等于平均的外压，在双面开洞的情况下，假定流入和流出相等，则式 (1.1) 可变为

$$A_w \sqrt{2(p_w - p_i)} = A_{\Pi} \sqrt{2(p_i - p_{\Pi})} \quad (1.2)$$

式中：下标 w 和 Π 分别表示迎风面和背风面。

如果面积 A_w 和 A_{Π} 相等，则内压可以简单地由洞口的平均外部压力地得到：

$$p_i = \frac{1}{2}(p_w - p_{\Pi}) \quad (1.3)$$

用稳态解的方法来估算房屋的平均内部压力，并和试验值进行比较。

Woods 和 Blackmore^[34]对低矮房屋在不同开洞条件下的内压变化进行了较为细致的多参数对比风洞试验。风洞试验采用的是一单层刚性的立方体模型，共设置了五种不同的开洞情况：单面中间开洞（背风面为实墙面）、单面中间开洞（背风面为多孔性墙面）、单面角上开洞（背风面为实墙面）、双面中间开洞、双面角上开洞。试验立方体模型测点布置图如图 1.12 所示。该试验较好地揭示了当房屋单面开洞和双面开洞，以及洞口的大小及位置变化和风向角的变化对房屋的平均内压和峰值内压的影响。

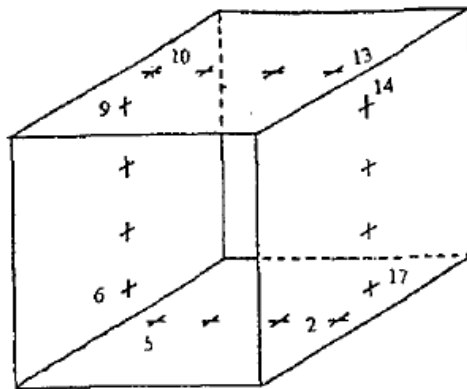


图 1.12 立方体模型测点布置图

试验结果表明，除了在洞口位于气流分离和附着过渡区的特定风向角外，对于单面开洞，稳态理论用于估算内压与实测结果较为符合；对于双面开洞的情况（见图 1.13），稳态理论的计算值与实测值不太吻合，通常实测值小于理论值。对于单面开洞的情况，即使洞口面积达到整个墙面的 25%，其内部压力

的分布也是符合 Holmes 和 Liu 等人的在开洞情况下房屋内部的压力分布均匀的假定。但是，对于双面开洞且洞口面积相对较大时，这一假定不再成立，当开洞面积大于等于9%时，内压分布不再均匀。最大的正压出现在背风面开洞墙上的顶部角上，同时较小的正压则出现在相对的底部角上，这意味着模型内部形成了较强的循环气流。最小正压出现在模型的底面上，通常进行单点内部测压时，测点常位于此处，可见在这种情况下，采用单点内部测压将导致内部压力的严重低估。在特定风向角下强烈的内部气流可导致内部压力系数最大增加到 $C_p=0.95$ 。

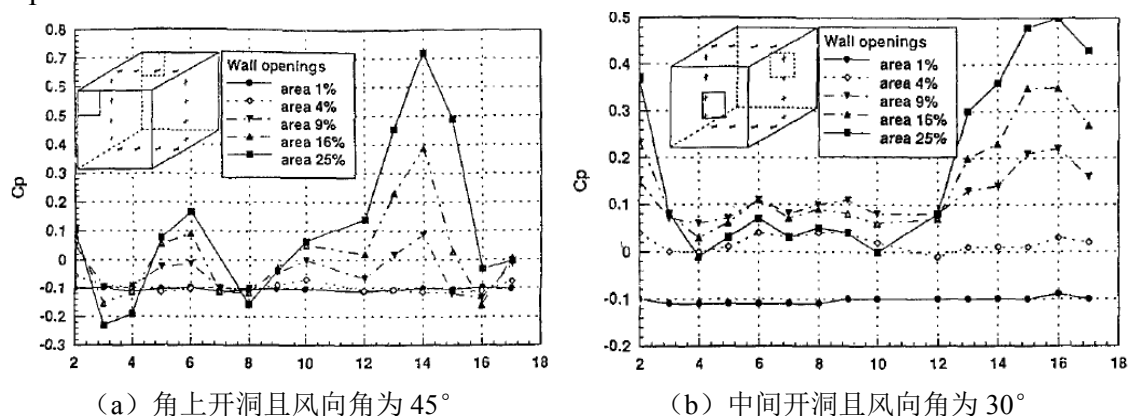


图 1.13 双面开洞下的风压分布

1.2.4 周围环境及建筑物之间相互干扰对风荷载特性的影响

大量的低矮房屋通常是呈规则或不规则状成片布置的。由于高度比较低，周围的风场属于高湍流度的流场，建筑物相互之间的气流干扰是不容忽视的。因此对建筑群体间的相互干扰进行风洞试验研究也成为必要课题。目前大量有关低矮房屋风压特性的风洞试验研究都只是只考虑单体的，这主要是因为一方面单体房屋本身风压特性的影响因素就极为复杂，同时考虑建筑物群体相互干扰的风洞试验通常在模拟大气边界层的风洞中进行，由于几何缩尺比的关系，模拟大气边界层的低矮房屋模型风洞试验较难进行。迄今为止，Katayama 和 Nishida^[35]等人对规则排列的建筑物群的相互影响进行了研究；Cheng-Hsin Chang^[36]等人研究了建筑物之间不同间距对于低矮建筑物表面风压的影响（见图 1.14）。

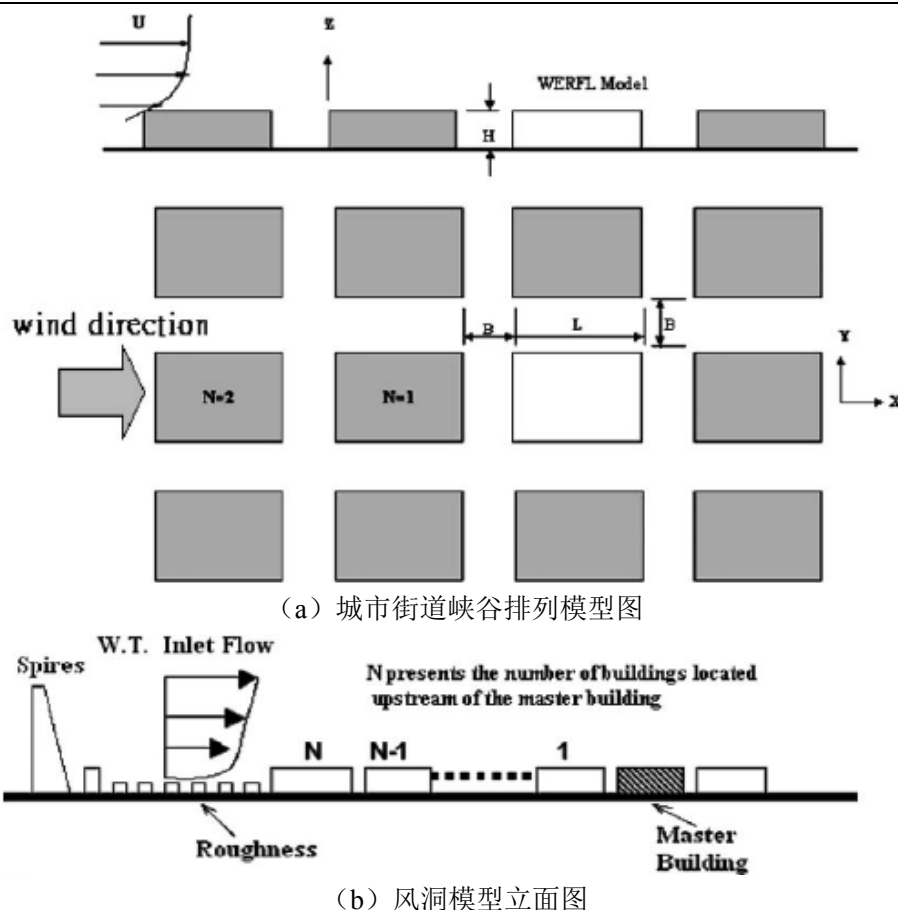


图 1.14 试验模型布置图

试验结果表明，周围建筑物的布置对于建筑物表面压力分布的影响非常的显著。根据建筑间的宽度与建筑物高度之比 B/H ，建筑间的气流可以分为掠流（skinning flow， $B/H=0\sim 1.2$ ）、尾流干扰流（wake interference flow， $B/H=1.2\sim 5.0$ ）、孤立的粗糙流（isolated roughness flow， $B/H>5.0$ ）。当建筑间的宽度比较窄的时候，建筑物表面风压系数会降低很多；在建筑间宽度相同的情况下，同郊区开阔地貌相比，位于城市粗糙地貌下的建筑物的遮挡效应会更加明显。由于周围建筑物的遮挡效应，屋面吸力也会有显著的减小。在建筑物 $B/H=0.5$ 的排列布置下，与单体建筑物相比较平均风压系数、RMS 系数以及负压力峰值系数的数值减少的量级都超过了 80%^[36]。

1.2.5 低矮房屋屋面风压极值及脉动风压的研究

绝大多数低矮房屋的结构刚度都比较大，因此在风荷载作用下房屋的共振响应可以不予考虑，而且房屋的特征尺寸与自然风的紊流尺度相比也非常小，这就意味着结构的最大荷载效应及其组成可以用所谓的准定常理论来予以取值。因而对脉动极值风压的估算可以采用准定常方法、Davenport 法或简化的

Cook-Mayne 法^[40]。

准定常方法中建筑物表面的压力随着平均风速和风向的改变而改变，也直接受大气扰动的影响，因此风的脉动引起压力的改变，瞬时的表面压力 $p(t)$ 可以用式 (1.4) 表示：

$$p(t) = q(t) C_p(\theta(t)) = \frac{1}{2} \rho v^2(t) C_p(\theta(t)) \quad (1.4)$$

式中 ρ 为空气密度； $v(t)$ 为瞬时风速； $C_p(\theta(t))$ 为风向角为 $\theta(t)$ 的平均风压系数； $\theta(t)$ 为瞬时风向角。

假定极值风压 \hat{p} 随峰值风速 \hat{v} 同时产生，且此时风向角的改变很小，则极值风压系数 C_p 由式 (1.5) 给出：

$$C_p \approx \hat{G}_v^2 C_p(\bar{\theta}) \quad (1.5)$$

式中 \hat{G}_v 为风速的峰值因子； $\bar{\theta}$ 为平均风向角。当横风向脉动风速分量 v 远远小于顺风向脉动风速分量 u 时，瞬时压力系数 $C_p(t)$ 的均方值 C_p' 随风向角 θ 的改变较小，则

$$C_p' = 2I_u C_p(\theta) \quad (1.6)$$

关于准定常方法的适用性各国风工程专家进行了大量的理论和试验的对比分析，但是至今尚未形成较为一致的看法。Stathopoulos 等人^[37]通过 1:12 的斜屋面模型试验的风洞试验验证了式 (1.6) 的适用性，通过将屋面均方压力系数的预测值与试验值进行比较对比后发现，当风向垂直或平行于屋脊时，在迎风面边缘紧邻气流分离面附近区域两者符合的较好，而在斜风向或在尾流区域上的测点则相差比较大。Okada 等人^[38]的试验结果也得出了相似的结论。Kind^{[19][39]}等人则通过对几个平屋面房屋的风洞模型试验验证了式 (1.5) 来预测屋面极值风压系数的可能性，认为在 (1.5) 中若假设 $G_v = 1 + 3I_{uh}$ ， I_{uh} 为在屋面高度来流的顺风向紊流密度，则该式可用来预测 45° 风向角时迎风屋面角区附近的最大峰值吸力，但是在全尺寸试验的实测数据却显示出了与理论计算值的差异。

表 1.1 三种方法回归系数的对比

Design result	Source of data				
	Quasi-static $\overline{C_p}$	Peak-factor $\overline{C_p} + g C_p'$	Directly by Cook and Mayne		
			$C_{P_s}^*$	$C_{P_r}^*$	$C_{P_c}^*$
$C_{P_s}^*$	0.951	0.989	/	0.995	0.983
$C_{P_r}^*$	0.966	0.994	0.995	/	0.994
$C_{P_c}^*$	0.981	0.996	0.983	0.994	/

峰值因子法和 Cook-Mayne 法的参数通常都需要由风洞模型试验来得到。Cook^[40]专门将简化的 Cook-Mayne 法与准定常方法、峰值因子方法在风荷载的

等效静力设计中的运用结果进行了比较。如表 1.1、1.2 所示：

表 1.2 三种方法标准离差的对比

Design result	Source of data				
	Quasi-static $\overline{C_p}$	Peak-factor $\overline{C_p} + g C_p'$	Directly by Cook and Mayne		
			$C_{P_A}^*$	$C_{P_B}^*$	$C_{P_C}^*$
$C_{P_A}^*$	0.34	0.16	/	0.12	0.20
$C_{P_B}^*$	0.24	0.10	0.10	/	0.09
$C_{P_C}^*$	0.14	0.06	0.13	0.07	/

从表中可以看出，对数据进行回归分析后，在不同平均时段下，回归系数几乎保持不变，这意味着用准定常法与按简化的 Cook-Mayne 法得到的设计值是相等的。从标准离差来看，回归曲线的数据离散性比按标准定常方法得到的要小得多，这就证明只要峰值因子能够被适当地确定，峰值因子方法的精度就可得到较好的满足。

Uematsu 等人^[41]还对建筑物表面的极值风压的空间和时间平均效应进行了研究。他们在风洞模型试验中发现，在迎风屋面角部和边缘等高吸力区的风压分布持续时间仅为 0.2~0.3s，且高吸力的分布面积仅为 1m×2m 左右的区域，因此可以断定压力脉动在时间或空间上的平均将导致有效峰值吸力的大幅降低。通过对迎风屋面边缘和角部的极值风压经过时间和空间的平均后发现，时间的平均持续时间 T_a 与空间的平均面积 A 之间存在着如下关系：

$$\sqrt{A} = \frac{T_a U_H}{K_p} (= L_{T_a}^*) \quad (1.7)$$

式中， U_H 为平均屋面高度 H 处的平均风速； K_p 为所考虑面积上不同两点脉动压力的根协方差的衰减常数； $L_{T_a}^*$ 为时间 T_a 的等效长度。

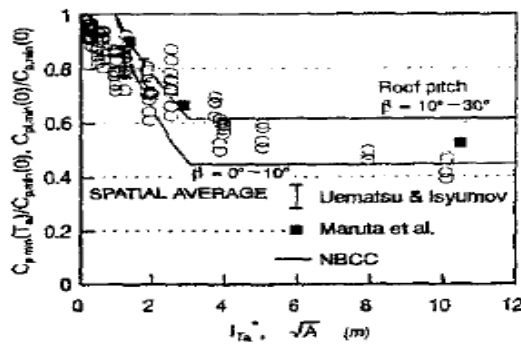


图 1.15 时间和空间平均效应对最小压力系数的影响

Uematsu 等人的试验结果与 Maruta 等人^[42]的试验结果及加拿大国家规范中对屋面角部考虑空间平均效应的有关规定一致。

屋面覆盖系统的设计风荷载是根据其从属面积的大小确定的，在准定常方法中必须以同样的方法来预估极值风压的持续效应，但是低矮房屋中不同的屋面覆盖单元其大小和形状各不相同，因而为了确定覆盖单元的合适的峰值持续效应必须得到该单元上脉动压力的根协方差的有关性状，而衰减系数 K_p 跟屋面的形状及覆盖单元在屋面上所处的位置均有关系。但是在这方面至今所进行的研究非常有限，需要更多的试验来确定各种不同体形房屋的 K_p 数据。

1.3 低矮房屋在自然风环境下的全尺寸现场实测

由于低矮房屋的风环境比较复杂，在风洞中模拟较为困难，运用风洞试验的方法来确定低矮房屋的风荷载更加困难。

首先，遇到的是几何缩尺比问题。风洞试验时为了得到与实际相符的风环境，通常需对大气边界层条件进行模拟，受风洞条件的限制，大气边界层模拟通常采用 $1/200 \sim 1/500$ 的几何缩尺比，根据几何相似原则，模型也应采用相同的几何缩尺比，这样就使得模型的几何尺寸过小，以至于无法安装测点，而且更加无法模拟建筑物的细部，例如挑檐、女儿墙、阳台，屋面覆盖材料等等。但是这些细部恰恰对低矮房屋的风荷载有着较大的影响。模型尺寸过小还将导致雷诺数的降低，使气流发生变化从而导致风压分布的改变。

其次，要在风洞中真实地模拟低矮房屋周围的风场环境，尤其是在近地面附近高湍流度的大气边界条件也是相当困难的。

相对于高层建筑，低矮房屋的全尺寸现场实测是比较容易进行。20世纪70年代到80年代，风工程研究被全尺寸现场实测与风洞模型试验相比较的研究所主导。全尺寸现场实测尽管也有缺陷，但是它的真实性对于研究者来说是很诱人的，尤其是在 Aylesbury 试验楼的研究更是促使了一系列的全尺寸实测工程的建立。这其中较为著名的有英国的 Aylesbury 试验楼，Silsoe 框架结构试验楼以及美国的 TTU 试验楼。Vickery 等人^[43]和 Surry 等人^[44]利用这些按实际尺寸建造的试验楼进行的一系列风荷载现场实测数据，并结合大量的风洞试验进行对比，使风洞试验的方法得到了不断的改进，同时也掌握了大量低矮房屋风荷载和表面大气层的分布特征和规律。

1.3.1 屋檐形式对屋面风压分布的影响

Robertson^[45]和 Hoxey^[46]对 Silsoe 结构试验楼进行全尺寸实测试验，比较了将屋檐由传统的棱角分明的直线形状改为弯曲形状后对屋面风压分布的变化。图 1.16 所示为当风向角为 0° 时，在房屋的中线位置测得的平均风压系数的分布

情况。可以看出，当采用弯曲形屋檐时迎风屋面靠近屋檐的1/3范围内，屋面吸力大为降低，这是因为此时屋面的迎风边缘由于采用了曲线形状，使得气流分离的显著性减弱，但在屋脊附近的吸力却要大于直线形屋檐的情况，因此，总的看来，对屋面整体升力的减小并不明显。

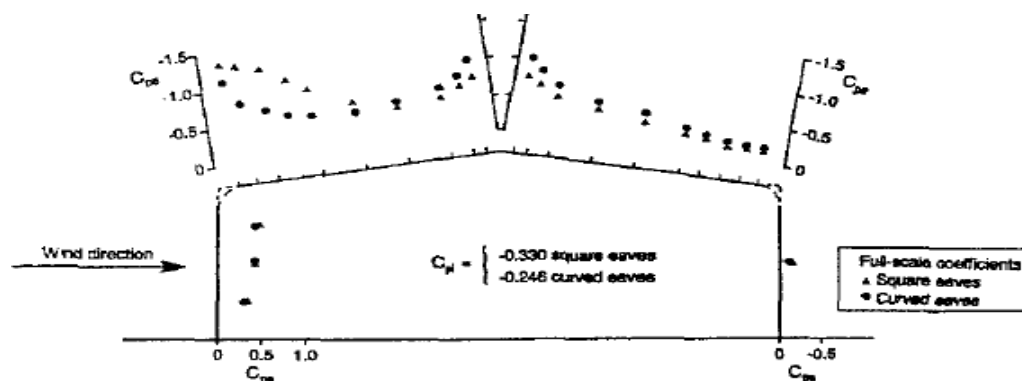


图 1.16 屋檐几何形状不同对屋面风压分布的影响

1.3.2 对开洞低矮房屋净风压的全尺寸现场实测

当房屋外表面开有门窗洞口时，其外墙面及屋面上的风荷载是由内外风压的代数和决定的，如果建筑物的迎风面（或背风面）上开孔，而其它面均密封，风的流动将形成正的（或负的）内部压力^[47]。此时，房屋内部的压力分布及大小不仅与迎风面或背风面上的开洞大小及位置有关，更与其外部来流特征及外部压力的分布有关^[34]。从工程设计的角度而言，提供房屋开洞时作用在建筑物表面围护材料的合理、安全的净风压值是十分必要的。

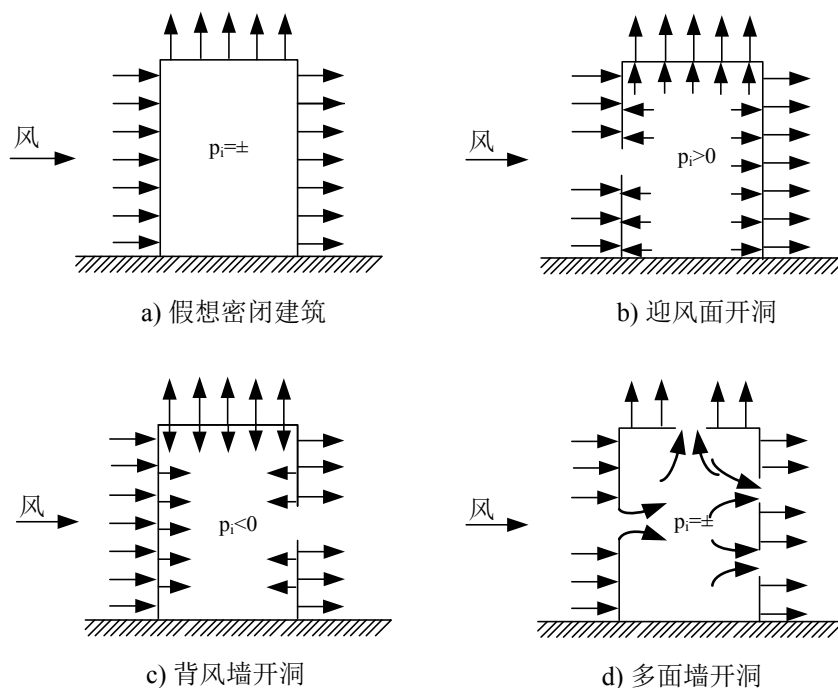


图 1.17 建筑表面开洞对内部风压的影响

目前在确定低矮房屋的屋面覆盖单元及其固定构件的设计净风压时，许多国家的风荷载标准或规范采用的都是准定常设计方法。此方法认为建筑物的内外压是由来流的风速脉动决定的，假定内外极值风压是完全相关的，设计净风压则是将同方向的外部极值风压和内部极值风压进行叠加而得到。在澳大利亚的 AS/NZS1170.2:2002 风荷载规范^[48] 中还引入了 K_a 、 K_l 等系数对采用准定常方法估算外部风压加以改进。

内部平均风压的理论计算一般由式 (1.8) 给出

$$C_{P_i} = \frac{C_{\bar{P}_w}}{1 + (A_L / A_w)} + \frac{C_{\bar{P}_l}}{1 + (A_w + A_L)^2} \quad (1.8)$$

式中 \bar{P}_w 表示房屋迎风面的平均外部风压； \bar{P}_l 表示背风面的平均内部风压； \bar{P}_i 是平均内部风压； A_w 、 A_L 表示迎风面和背风面的开洞面积。

Ginger 和 Letchford 等人^[49]对全尺寸的低矮房屋进行了在不同开洞条件下房屋内外压的对比性实测试验，并将其结果与澳大利亚风荷载规范 AS/NZS1170.2:2002 的相应取值进行了对比，还对准定常理论在确定内外极值风压方面的适用性进行了研究。他们用于实测的试验楼的几何尺寸及测点布置如图 1.18 所示。试验楼位于平坦的空旷地面上，试验风向角为 $90^\circ \pm 5^\circ$ 和 $270^\circ \pm 5^\circ$ ，开孔率分别为墙面积的 1%，2%，5%。

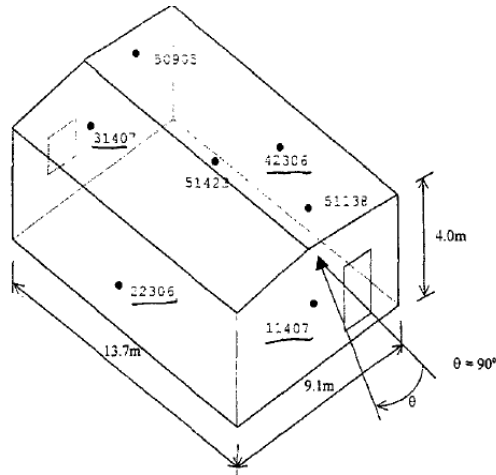


图 1.18 全尺寸实测试验楼的几何尺寸及测压点布置

内部的脉动风压与外墙面开洞的大小、位置及洞口附近的外部脉动风压有关。对于较为柔性的建筑，内部压力的改变将使房屋的内部体积 V_I 产生膨胀和收缩，从而使内部压力的反应变慢。Vickery^[50]认为房屋的柔性对内部压力的动力响应可以用房屋的有效体积衡量：

$$V_{le} = V_I [1 + (K_A / K_B)] \quad (1.9)$$

式中 K_A 为房屋内部的空气体积模量， K_B 为房屋的体积模量。

Ginger 等人^[51]测得试验楼的 $K_A / K_B = 1.5$ ， $V_{le} = 1175\text{m}^3$ ，当房屋一面开洞时与洞口处的外部压力谱相比，内部压力谱在临近无阻尼的 Helmholtz 频率附近，有一个明显的能量增加，这意味着此时内部压力的脉动是由外部压力脉动控制的。

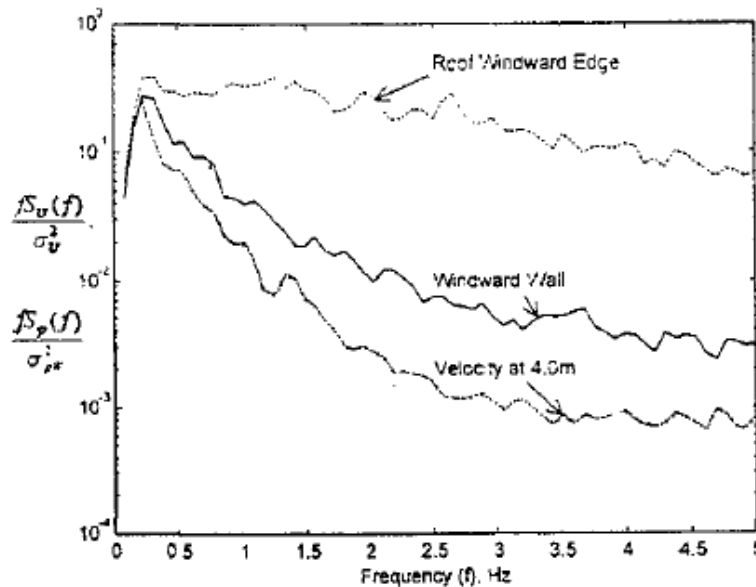


图 1.19 无量纲顺风向风速谱和迎风墙面迎风屋面边缘的压力谱

迎风墙面的压力谱与来流的风速谱在 0.2Hz 以上区域相当接近, 说明对于确定迎风面的设计荷载时, 准定常方法是非常适用的, 而迎风屋面边缘的风压谱由于受气流分离的影响, 其能量分布已变得与来流有很大的不同, 根据 Ginger 等人^[51]的试验, 类似的现象发生在背风墙面, 侧墙面和屋顶中部的压力谱中, 这说明由于受气流分离、绕流的影响或处于尾流中, 这些部位的准定常方法已不再适用。

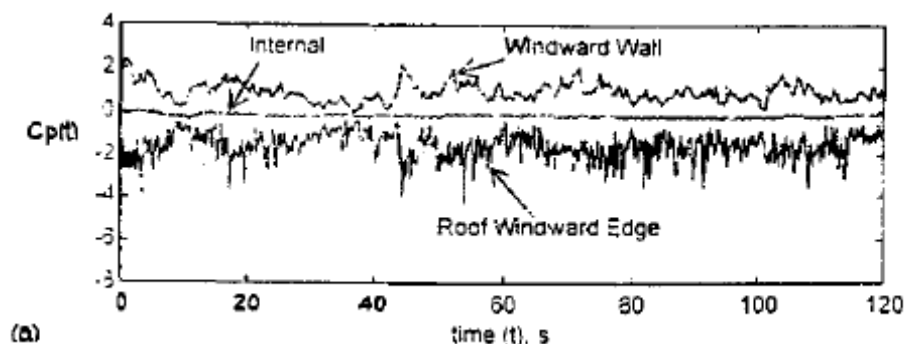


图 1.20 正常气密封状态下迎风墙面和迎风屋面边缘的外部风压及房屋内压的时程图

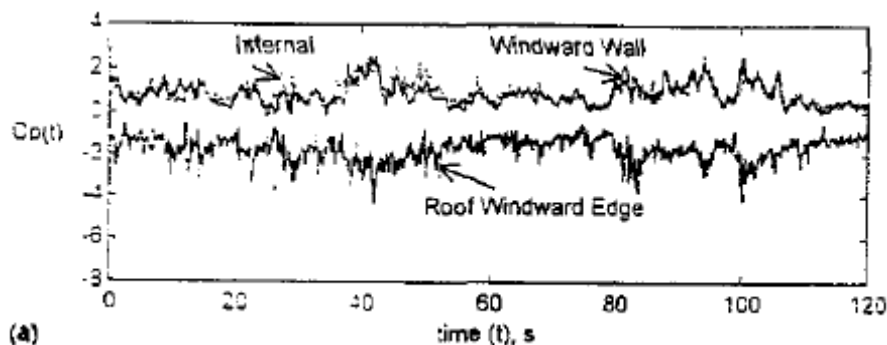


图 1.21 迎风墙面开有 2% 洞口时迎风墙面和迎风屋面边缘的外部风压及房屋内压的时程图

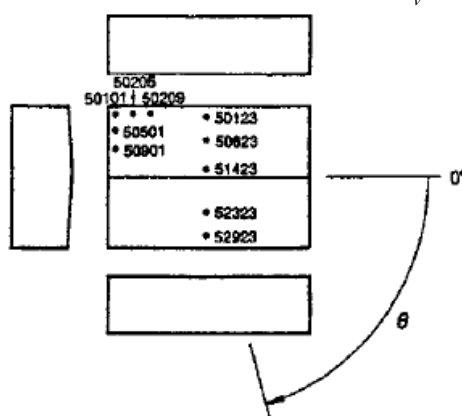
试验的结果还显示 (如图 1.20、图 1.21 所示), 在正常气密封状态下房屋内压的波动明显小于外部压力的波动, 两者不相关。当迎风墙面开有洞口时, 其内部压力的波动与洞口附近的外部压力波动非常接近, 即两者是十分相关的, 而且迎风墙面的压力峰值因子与内部压力的峰值因子两者十分接近。在气密封状态下测得房屋各部位的净风压系数与按 AS1170.2 规范得到的相应净风压值进行对比。实测的峰值净压力为按照规范计算值的 76~90%, 除了迎风屋面边缘规范计算值较为保守外, 其他部位的规范计算值与实际测得的峰值净压力均较为符合。对于迎风面开洞的状态下, 试验测得峰值净压力也比规范计算的数值大部分地方均偏小, 这说明对于迎风面开洞面积 2% 的情况, 房屋的内压与大部分地方的外压之间并不十分相关, 但是在较易引起局部覆盖物失效的迎风面边缘, 其较大的外部吸力与可能导致较大净风压的房屋内部的较大正压值是

十分相关的，而按规范得到的迎风屋面边缘的峰值净压力系数则小于实测值 [51]。

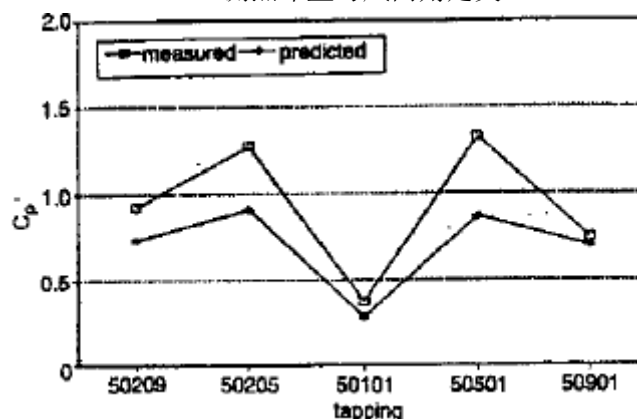
1.3.3 对低矮房屋的脉动压力的全尺寸现场实测

低矮房屋表面脉动风压目前主要应用准定常理论来进行最大荷载效应的计算。严格的准定常理论将风压的脉动完全归因于风速的脉动，但是当来流受到房屋的较大干扰时，也会引起风压的脉动，如气流分离区附近或尾流区域，该部分风压的脉动通常具有较高的频率。这是因为在房屋表面产生的涡旋的特征尺度远小于来流的湍流积分尺度，在这种情况下准定常理论通常不成立。高频的风压脉动会对较小的屋面单元如屋面瓦会产生明显的影响。对于具有较大从属面积的屋面构件来说，高频部分通过空间上的平均以后可以被过滤掉，但是不是高频的风压脉动对于屋面的荷载效应可以忽略呢？

尽管很多风洞模型试验可以验证准定常理论的公式，但关于准定常理论试用范围的争论一直没有停止过。如 Letchford 等人 [52] 将准定常方法与全尺寸现场实测的结果进行了对比，结果发现在斜风作用下迎风屋面边缘的均方风压系数 C_p' 的试验值明显高于按照准定常理论得到的计算值，其试验结果如图 1.22 如所示。Milford 和 Waldeck [53] 在对于某机场的候机楼屋盖进行的现场实测时发现，在斜风作用下，屋面角部风压的峰值效应系数远大于 G_v^2 。



(a) 测点布置与风向角定义



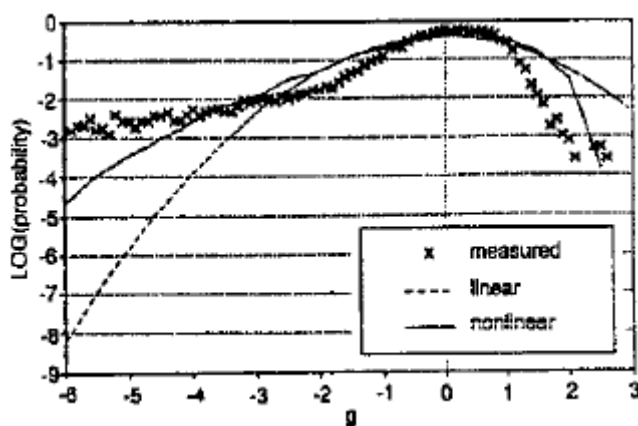
(b) 实测和计算的均方压力系数 ($\theta=228^\circ$)(c) 实测和计算的概率密度函数 (测点 50101, $\theta=228^\circ$)

图 1.22 对 TTU Building 进行的实测结果与准定常方法计算结果的对比

C'_p 和 C_p 的试验值与按准定常方法得到的计算值之间的差异被较为一致地认为与房屋产生的湍流有关。Tieleman^[54]曾提出,产生峰值风压的分离剪切层的特性在很大程度上由瞬时来流中的小尺度湍流所控制。由于小尺度的湍流效应未在准定常方法中予以考虑,所以不能在气流分离或再附着区域应用准定常方法。但是 Hoxey 等人^{[55][59]}认为:准定常方法中的线性化近似是造成理论计算值与试验值之间存在较大差异的主要原因。他们根据对 Silsoe structures building 的全尺寸现场实测的结果,提出了对准定常方法的一种改进的模型,即对 $C_p(\theta)$ 的泰勒级数表达式中引入了高次项,这样均方风压系数 C'_p 的表达式如下式所示:

$$(C'_p)^2 = \frac{(P - \bar{P})^2}{q^2} = [C_p(\bar{\theta})]^2 \frac{\sigma_q^2}{q^2} + \sigma_{CP}^2 \left(1 + \frac{\sigma_q^2}{q^2}\right) \quad (1.10)$$

$$\sigma_{CP}^2 = \overline{[C_p(\theta) - C_p(\bar{\theta})]^2} \quad (1.11)$$

式中, \bar{p} 、 σ_q 分别代表速度压的平均值和均方值,并且假定风向角 θ 为高斯分布。将按照此方法计算得到的理论值和实测值进行比较后发现,在迎风面边缘和角区附近两者符合得较好,但是对于背风面风压分离产生的湍流影响区域两者还是有一定差距的。通常这些部位的极值风压系数较小,对于实际工程设计的影响不大,也可以根据湍流的平均效应修正后的准定常方法进行估算。

在实际的工程设计中,仅仅考虑测点的压力是不够的,屋面的极值压力系数应根据屋面单元面积来确定该面积上的平均值,从而指导设计。由于面积平均压力被认为是点压力的一种积累,因此其分布按中心极值定理更接近于正态分布。这一推论也得到了许多试验结果的验证。如 Milford 和 Waldeck^[53]等人在南非的 Jam Smuts 机场一挑檐的全尺寸现场实测数据发现,在屋面角部一块大

约 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的表面上面积平均压力分布非常接近高斯分布，并且其极值风压与平均风压系数的比值十分接近峰值因子的平方 G_v^2 ，因此可以利用峰值因子法对极值风压进行估算。Letchford 等人^[52]在对 TTU 建筑的全尺寸风压实测中也得到了类似的结果，他们发现用准定常方法得到的预计值与实测值相当吻合，包括概率密度函数等统计特性。

1.3.4 专家系统数据库

Whalen 和 Simiu^[60]建立一个面向工程设计的空气动力学数据库。在数据库中有完整的低矮建筑风洞试验测压的时程数据，例如在数据库中包含高分辨率同步的对北美规范推荐的 9 种基本建筑物构造 36 个风向角的压力测量，每一种都有一个小时的风暴的试验记录，而这所有的结果的时程数据被压缩在两张 CD 里面。由于拥有方便的操作界面，设计者可以很方便的应用这些数据对一个具体的结构进行风荷载的预测，这种系统称之为“专家系统”。根据具体的建筑几何外形和周围的风环境等来确定屋面的风荷载。Wit^[61]也参加了专家判断识别试验的研究工作。目前，国内外已建立气动数据库的高校、研究机构有美国的 TTU、加拿大的西安大略大学、日本的东京工艺大学以及台湾的淡江大学等。

1.4 低矮房屋风荷载的计算机数值模拟研究

不管是全尺寸的实测试验还是风洞试验都对试验条件有一定的要求，所需的试验经费数额较大，而且精度易受测试手段和仪器误差的影响；更重要的是不易进行较系统的参数分析，从而较全面地掌握表面风压随各类房屋参数、场地参数等的变化规律。随着计算机技术的迅速发展，一些新型的数值模拟工具被应用于风工程领域，还有人提出了“数值风洞”的概念，借助计算机的数值模拟方法来研究风对建筑物的三维绕流问题。

1.4.1 新技术和新型数学工具在风工程领域的应用

经过四十多年的试验和理论分析，低矮房屋获得了大量的风洞试验和现场实测试验的数据，但是如何将这些数据加以有效地利用，还需要大量的数学工具来实现。近年来小波分析、POD 以及神经网络等新型数学工具都已引入到风工程中。

Farge 等人^[62]、Meneveau 等人^[63]先后把小波变换应用在湍流的模型分析中，如试验数据的分析、相干涡流的二维模拟、湍流剪切流中相干结构的识别

等。Brown 还在密度效应和湍流混合层等大型结构的相关分析中运用了小波理论。Higuchi 等人^[64]以及 Mumford^[65]等人采用小波变换对湍流剪切流中的大挑檐结构进行数值模拟和分析。

POD (the proper orthogonal decomposition) 是一种统计方法, 它尤其适合包括风工程在内的其他科学领域和人文领域的多种用途。Lumley 把 POD 方法引入了湍流研究, 后来国外不少学者采用 POD 方法来描述建筑结构的脉动风压场^[66]。Bienkiewicz^[67]和 Tamura^[68]根据 POD 方法分析了平顶低矮房屋的屋面及墙面的脉动风压, 并利用本征向量重建屋面的风荷载, 探究了前几阶本征模式的物理意义; Holmes^[69]则指出由于本征向量的形状受到正交性要求的限制, 对其物理意义的解释有可能产生曲解, 但同时也指出 POD 是描述钝体风压场很有效的途径。

Kho 和 Hoxey^[70]等人对低矮建筑的表面风压进行了 POD/ARMA 的模型重建, 将 POD 应用于风工程领域描述建筑物周围的脉动表面压力, 在理论上进行了风场重建与能量分布分析。

1.4.2 标准建筑模型以及绕流场数值模拟

由于钝体的形状特殊, 所引起钝体绕流结构非常复杂, 导致钝体绕流的数值模拟存在较大困难。因此选取简单几何形状的通用建筑模型, 建立评估和检验风洞试验结果的标准, 再将不同数值模型和计算方法得到的结果与标准模型试验测量数据进行对比, 以建立数值模拟结果对比的基准, 成为计算风工程中考察各种计算模型计算精度的重要手段。

(1) TTU 模型

作为具有代表性的一类低矮房屋建筑模型和为数不多的现场实测模型, TTU 全尺寸模型场地试验研究在国际上颇具影响, 称为当前较为权威的一种评估建筑风洞模拟技术的标准模型。近年来各风工程研究机构进行的 TTU 模型的风洞试验和数值模拟研究资料非常丰富^{[71][73]}。国内外许多研究者进行了缩尺 TTU 模型风洞试验, 通过试验结果与 WERFL 提供的原始实测压力数据的比较来评估大气边界层风场模拟、压力测量与数据采集等风洞试验技术^{[71][74][75]}, 探讨原型和风洞缩尺模型之间的差异问题^{[76][77]}, 研究低矮建筑流场特征^{[78][79]}, 以及结构抗风问题^{[80][82]}。

(2) AIJ(Architectural Institute of Japan)模型

AIJ 进行了两种几何形状的建筑模型风洞试验和数值模拟研究比较工作, 一

种属于低矮建筑物^[83]，长宽高之比为 1:1:0.5；另一种模型^[84]的长宽高之比为 1:1:2。日本的研究人员对这两种模型进行了大量的风洞试验和数值模拟研究，可作为一种标准建筑模型进行比较研究。

(3) 立方体模型

Hoxey 和 Richards^{[85][87]}等完成的 6×6×6m 的立方体绕流的全尺寸模型实测与计算结果在 CWE2000 大会上发表，提供了较详细的试验测量数据和计算结果，同时多家风洞试验室完成了立方体模型的风洞试验研究，也可作为标准模型研究使用。

这些建筑标准模型都提供了详尽的试验数据，数值模拟文献提供了不同的湍流模拟方法、压力—速度耦合算法、网格划分以及对流项离散格式等诸多参数的计算结果，可供参考。

1.5 规范情况

(1) 中国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2006)^[106]

在我国荷载规范中，由于低矮房屋相对于高层建筑和大跨度空间结构来说不是风敏感建筑，低矮房屋风荷载没有单独进行详细的规定。规范对于建筑物表面的风荷载标准值的计算所推荐的公式如下所示：

对于计算主要承重结构时

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$$

计算围护结构时

$$w_k = \beta_{gz} \mu_{sl} \mu_z w_0$$

式中， w_k 为风荷载标准值 (KN/m²)； β_z 为高度 z 处的风振系数； β_{gz} 为高度 z 处的阵风系数， $\beta_{gz} = k(1 + 2\mu_f)$ ； μ_f 为脉动系数； k 为地面粗糙度系数，对应 A、B、C 和 D 类地貌，分别取 0.92、0.89、0.85、0.80； μ_s 为风荷载体型系数； μ_{sl} 为局部风压体型系数； μ_z 为风压高度变化系数； w_0 为基本风压 (KN/m²)。

规范认为对于 $T < 0.25s$ 的结构和高度小于 30m 或高宽比小于 1.5 的房屋（低矮居民房屋）的风振一般不大，按照构造要求进行设计结构已有足够的刚度，因而设计中一般不考虑风振系数的影响。规范在风荷载体型系数部分粗略的给出 38 种单体表面建筑风荷载体型系数来进行抗风设计，不仅仅包括低矮建筑物，还包括高层建筑物、各种横截面的钢结构、高耸建筑物，架空管道以及拉索等等，在关于低矮房屋的体型系数的规定中只是很简单在规定了在一个方向角下的几个坡度范围内不同表面的体型系数。一些比较简单的房屋体型的体型系

数可以查表获得，或是简单地插值求得。

规范对于低矮房屋的围护结构风荷载没有明确的具体规定，可以按照一般的围护结构风荷载计算公式确定（与某些国外规范专为低矮房屋制定的规定相比，有估计过高的可能）。

(2) 日本 (AIJ recommendations for loads on building 2004) [107]

日本荷载规范中对于建筑物表面风荷载有详细的规定，尤其是针对矩形界面的建筑物，但是也没有特别针对低矮房屋的风荷载进行规定。在规范中对于 $H < 15m, H/2 \leq B \leq 30m$ 的低矮居住房屋建筑采用一种简单计算的方法。

对于主要承重结构的水平风荷载和屋面荷载：

$$W_{sf} = 0.4U_0^2 H^{0.4} C_e C_f A$$

其中， W_{sf} (N) 为作用在结构上的风荷载； U_0 (m/s) 为基本风速； H (m) 为参考高度（不小于 10 米）； C_e 为暴露系数，一般取 1.0，对于几乎没有障碍物的开阔地貌（II类地貌）取 1.4，当由于局部地形导致风速增加，系数应相应地增大； C_f 为风力系数，对于水平风荷载， C_f 是风力系数 C_D ；对于屋面荷载， C_f 是风力系数 C_R ； A (m^2) 为物体受压面积。

对于围护结构的风荷载：

$$W_{sc} = 0.15U_0^2 H^{0.4} C_e \hat{C}_c A_c$$

其中， W_{sc} (N) 为作用于围护结构的风荷载； C_e 为暴露系数，一般取 1.0； \hat{C}_c 为峰值风力系数，当计算 \hat{C}_c 时， I_z 或 I_H 应取 0.26； A_c (m^2) 为围护结构的面积。

在规范中 $H < 45m$ 的建筑物（包括低矮建筑物）的风压系数可以通过风洞试验进行估算，也可以运用针对结构框架设计的风压系数表和针对围护结构和细部节点设计的风压系数查表获得。规范中在主体结构的设计规定了矩形截面不同参数的风压系数，风压系数分为外部风压系数和内压系数，外压系数又分为迎风屋面风压系数、背风屋面风压系数、侧墙以及迎风墙面、背风墙面的风压系数。在围护结构和细部节点设计中，主要规定了外部风压系数及其相对应的阵风因子，墙体的风压系数及其阵风因子。主要参数为高宽比和屋面坡度。

(3) 美国 (ASCE Standard 7-05) [108]

美国风荷载规范是唯一一个明确针对低矮房屋风荷载规定的规范，在建筑物和其他结构的风荷载设计包括主体抗风力体系设计和细部节点以及围护部分的设计两部分。因而规范在确定风荷载时又三种方法：直接查表进行简化确定风压分布；对建筑物进行风荷载分析；进行风洞试验确定风压分布。美国规范对于低矮建筑的规定是 $h < 60ft(18m)$ 。

主要受力系统:

$$p = q_h [(GC_{pf}) - (GC_{pi})]$$

构件和围护结构:

$$p = q_h [(GC_p) - (GC_{pr})]$$

其中, q_h 为对所有地形都用 C 类地貌的平均屋顶高度的值; G 为阵风响应因子 GC_{pf} 为建筑物外压系数; GC_{pi} 为建筑物内压系数。

方法一, 简化设计风压: 封闭的低矮建筑物的主体抗风力体系规范给出了在不同基本风速下屋面和墙体在不同部位以及不同屋面角度下的水平、垂直以及悬挑部分的风压值。同时给出了不同屋面高度下在不同部位的调整系数。细部节点以及围护结构设计规范给出了不同基本风速下三种屋面坡度范围 ($0\sim 7^\circ$ 、 $7\sim 27^\circ$ 、 $27\sim 45^\circ$) 以及墙体的不同区域的风压值。最后还给出了屋面悬挑部分的净设计风压还有三种区域的调整系数。

方法二, 详细设计风压: 针对所有高度的封闭的、部分封闭的建筑物规定了双坡、四坡、单坡、复折式屋面以及墙体在不同风向角下的外风压系数。在规范中又特别针对低矮建筑给出了不同坡度角的屋面在不同的区域的外部风压系数, 方便设计师进行长度方向、横向以及扭转力的计算。对于封闭、半封闭的低矮建筑物的墙面则给出了不同区域的由外部风压系数同有效风面积的折线图。不同坡度的双坡、四坡、阶梯型屋面、多跨双坡屋面、不同单坡屋面、锯齿形屋面, 圆顶屋面。平屋面以及墙面规范都给出了不同区域的外部风压系数同有效风面积的折线图, 便于设计师的查找和差值计算。对于开口结构, 规范给出的是单坡屋面在不同坡度、不同长宽比下的风力系数, 以及压力中心到迎风屋面边缘的距离与顺风方向屋面长度的比值。

(4) 澳大利亚/新西兰规范 (Australian/New Zealand Standard 1170.2:2002) [109]

澳大利亚/新西兰规范对于低矮房屋规定主要是体现在 $h < 50m$ 高的范围之内。它的结构设计风压主要参数是由规定的空气动力体型系数给出的。空气动力体型系数又由不同的压力系数和因子组成。规范给出了各种情况下的内压系数、外压系数、面积折算因子、组合因子、局部压力因子、换算因子、摩擦阻力系数, 以及雨蓬、自立式屋顶、墙作用迎风面的净压系数, 还有女儿墙的折算系数等等。在附录中还详细给出了各种几何形状外形的外压系数, 开口结构的净压系数等等。

对于外压 $C_{fig} = C_{p,e} K_a K_c K_l K_p$

对于内压 $C_{fig} = C_{p,i} K_c$

对于摩擦阻力 $C_{fig} = C_f K_c$

其中, $C_{p,e}$ 为外压系数; K_a 为面积换算因子; K_c 为组合因子; K_l 为局部压力因子; K_p 为多孔覆面换算因子; $C_{p,i}$ 为内压系数; C_f 为摩擦阻力系数; $C_{p,n}$ 为雨篷、自立式屋顶、墙及类似建筑物所谓、作用正对着面的静压系数。

(5) 加拿大风荷载规范 (National Building Code of Canada 1995)

加拿大的风荷载规范和美国的风荷载规范比较相似,确定设计风荷载都是根据不同的建筑物分别有三种方法:简单方法、详细方法和风洞试验方法。规范认为低矮以及中层的建筑物的结构和围护结构的风荷载的确定适合用简单方法。这些结构相对比较刚性,风荷载的动力作用对于结构的动力特性影响不大,而且可以有等效静荷载来代替处理。规范中关于低矮房屋风荷载的规定集中在风压系数这一节中,所列的数据来自于系统的边界层风洞研究的试验结果。建筑物表面的风压系数是建立在时距大约为 1s 的最大阵风风压的基础上的,因而这些风压系数都包含阵风因子 C_g , 即 $C_p C_g$ 。规范对同步作用在所有表面的风荷载对建筑物的主要结构产生的风压系数,在不同的分区,不同的屋面坡度以及不同的风向角范围的条件有不同的规定。此外,对于围护结构和次要结构的设计,又另外针对单独的墙体、不同坡度范围的双坡屋面、四坡屋面、单坡屋面、多跨双坡(褶曲)屋面以及锯齿型屋面等形式的风压系数,在建筑物表面进行了不同的分区,以图表的形式做了表示出外部峰值风压系数随着面积的变化趋势(设计人员可以在图上内插取值)。

1.6 当前研究的不足

我国对于低矮房屋的研究还处于起步阶段,对于风洞模型试验只有浙江大学付国宏^[104]进行过低矮房屋风荷载特性的研究,陆峰^[105]进行过平屋顶的风压分布的研究以及风致内压的研究。对于全尺寸模型场地试验也是刚刚起步。现在在国内开展最多的是 CFD,但也没有太多进展和突破,没有通过风洞试验或是现场实测的数据建立的建筑物的气动数据库。

1.7 本文的研究目的和主要工作

我国是一个多民族的国家,广大乡村地区存在各种各样的复杂的特色民居,这些特色民居的风荷载难以直接从国外的风荷载规范或风洞试验数据中获

得参考，因此，开展中国特色民居的风洞试验研究具有重大的现实意义，可为我国荷载规范的修改提出更有针对性的数据。

本文主要针对我国东南沿海的一些特色民居中的双坡屋面系列（四种挑檐形式）、平屋面系列（包括盪顶等四种形式）和四坡屋面系列（四坡屋面和庑殿顶）以及三种典型山墙（包括马头形山墙、三角形山墙和圆弧形山墙）进行风洞试验研究，主要内容如下：

（1）第二章介绍了本课题风洞实验概况以及屋面风压分布的基本特征。对双坡屋面系列（四种挑檐形式）、平屋面系列（包括盪顶等四种形式）和四坡屋面系列（四坡屋面和庑殿顶）共三个系列的中国特色民居的屋面风压的平均值和均方根值的空间分布特征及影响因素进行深入讨论。

（2）第三章研究了三种典型山墙（包括马头形山墙、三角形山墙和圆弧形山墙）自身的风压分布规律以及它们对屋面风压分布的影响。通过对这三种山墙与普通低矮房屋的山墙进行对比，分析了这些山墙风压以及相应的屋面风压特有的分布特征。

（3）第四章研究了低矮房屋表面的风压的概率分布特性和屋面各点的相关性规律。研究表明屋面上绝大部分测点基本都呈现出非高斯的特性，屋面各点的相关性也与来流风以及屋面分离点有很大的关系。

（4）在分析了低矮房屋表面风压的概率特性之后，第五章企图寻找一种比较科学的、接近实测数据的风压极值计算方法，并利用该方法分析了各特色建筑的风压极值，对屋面的极值分布进行了详细的分析。

（5）第六章主要是对本文得出的结论进行总结并提出了课题进一步研究的方向。

第2章 风洞试验概况及屋面风压分布特征

2.1 引言

我国东南沿海，台风发生频繁，且近年来台风造成的损失有逐年增多的趋势^[110]。台风造成的建筑物的结构破坏主要发生在低矮房屋上，特别是没有经过工程设计并且缺乏维护的居住建筑^[88]。近年来针对我国东南沿海地区的多次风灾调查也显示^[111]，低矮建筑破坏造成的损失超过风灾总损失的半数，而低矮建筑破坏最多的是围护结构及屋面体系的破坏。尽管风灾给低矮建筑带来的损失惊人，但是目前对低矮建筑的风荷载特性及其破坏特征认识却相对不足。从上世纪六十年代开始，国外对低矮房屋风荷载开始了大规模的研究，在八、九十年代更是达到了顶峰。Stathopoulos^[113]对建筑表面压力受几何参数的影响进行了详细的研究并引导了北美规范的发展；Holmes^{[114][8]}的研究为澳洲的风荷载规范提供了数据；Uematsu & Isyumov 等^[1]的研究改进了日本规范的风荷载数据。我国在这方面的研究工作相对滞后，在规范的制定上也比较粗略，并且中国传统的民居在外形及细部构造上独具风格，国外的规范不能完全照搬过来设计中国特色的民居。

2.2 课题背景与风洞试验

为了研究低矮房屋的表面风压分布，国外许多学者都进行了大量的风洞试验研究，得到的结论也不尽相同。本课题进行的试验获得了在不同风场中不同风向角下中国特色的低矮房屋表面各个测点的风压系数。

本课题组对我国沿海地区村镇低矮房屋的风荷载进行了模型测压试验研究。根据我国低矮房屋特点，研究各种屋面形式、房屋细部特征和不同风环境对低矮房屋风荷载的影响。本次试验主要进行的是单体建筑物的风洞试验研究，房屋模型主要有四个系列：其一是平屋面系列，主要包括长方体、出檐平屋面、带女儿墙平屋面和盪顶屋面；其二是双坡屋面系列，主要包括三角形挑檐双坡屋面、硬山挑檐屋面、悬山挑檐屋面、不对称双坡屋面；其三是带山墙的双坡屋面系列，原型主要参考典型的江南建筑风格，主要有马头型山墙、三角型山墙和圆弧型山墙；其四是四坡屋面系列，主要有四坡屋面、庑殿顶。

2.2.1 风洞设备与测量系统

本课题的刚性模型表面测压风洞试验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 大气边界层风洞中完成。该风洞是闭口回流式矩形截面风洞图(见图 2.1)，整个回流系统水平布置。风洞由一台最大功率为 530kW 直流电机驱动，风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的可控硅直流调节系统。试验段尺寸为 3m 宽、2.5m 高、15m 长。试验风速范围从 0.5m/s~68m/s 连续可调。风洞配有自动调速、控制与数据采集系统，浮框式六分量汽车模型应变式测力天平及转盘系统，建筑结构模型试验自动转盘系统。转盘直径为 3.0m，其转轴中心距试验段进口为 10.5m。流场性能良好，试验区流场的速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.46%、平均气流偏角小于 0.5。

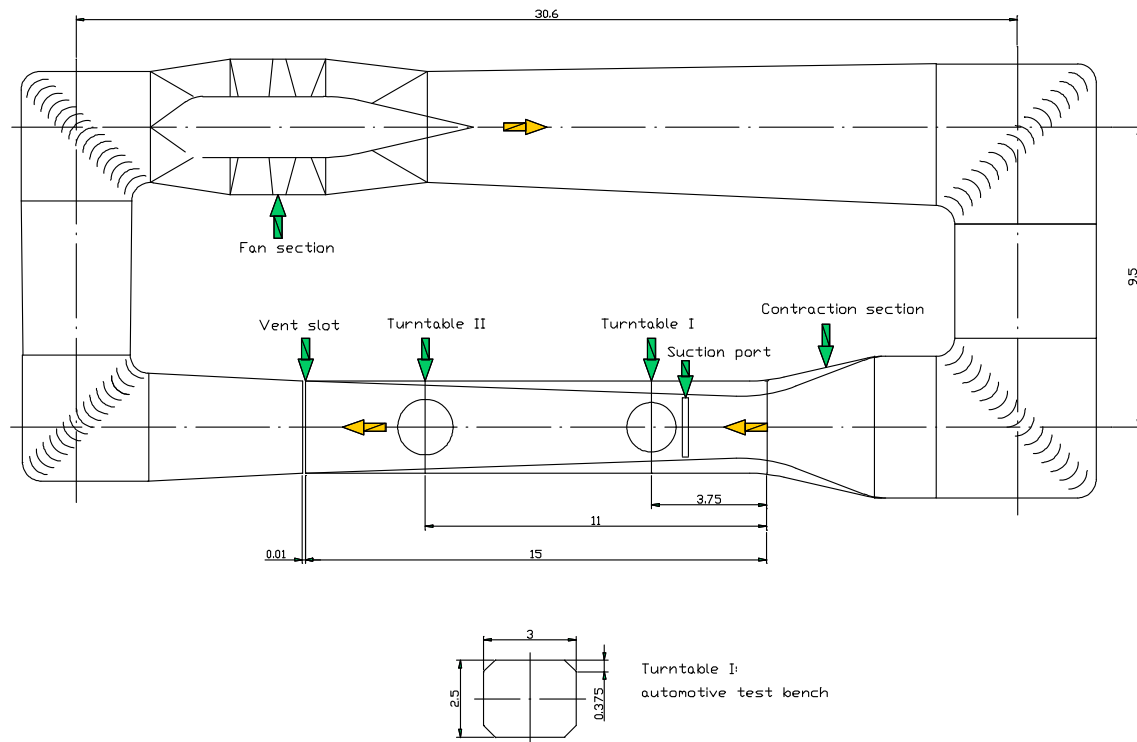


图 2.1 同济大学 TJ-2 大气边界层风洞

在风洞试验中使用了两套测量系统。

(1) 风速测量系统

试验流场的参考风速是用皮托管和微压计来测量和监控的。大气边界层模拟风场的调试和测定是用丹麦 DANTEC 公司的 streamline 热线/热膜风速仪、A/D 板、PC 机和专用软件组成的系统来测量。热膜探头事先已在空风洞中仔细标定。该系统可以用来测量风洞流场的平均风速、风速剖面、湍流度以及脉动风功率谱等数据。

(2) 风压测量、记录及数据处理系统

由美国 Scanivalve 扫描阀公司的量程分别为 254 和 508 mm 水柱的 DSM3400 电子式压力扫描阀系统、PC 机、以及自编的信号采集及数据处理软件组成风压测量、记录及数据处理系统。

模型试验的长度、风速和时间的缩尺比分别取为 1/30、4/9 和 3/40。

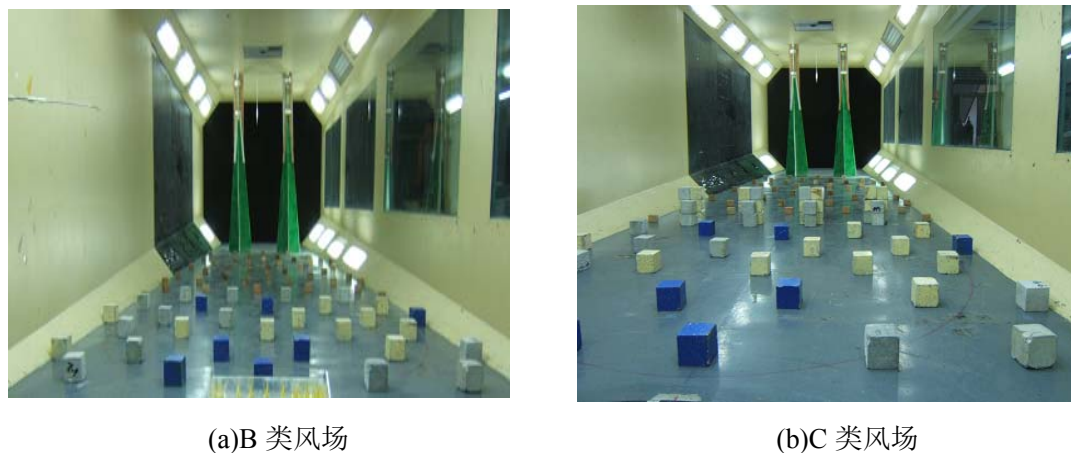


图 2.2 试验风场模拟

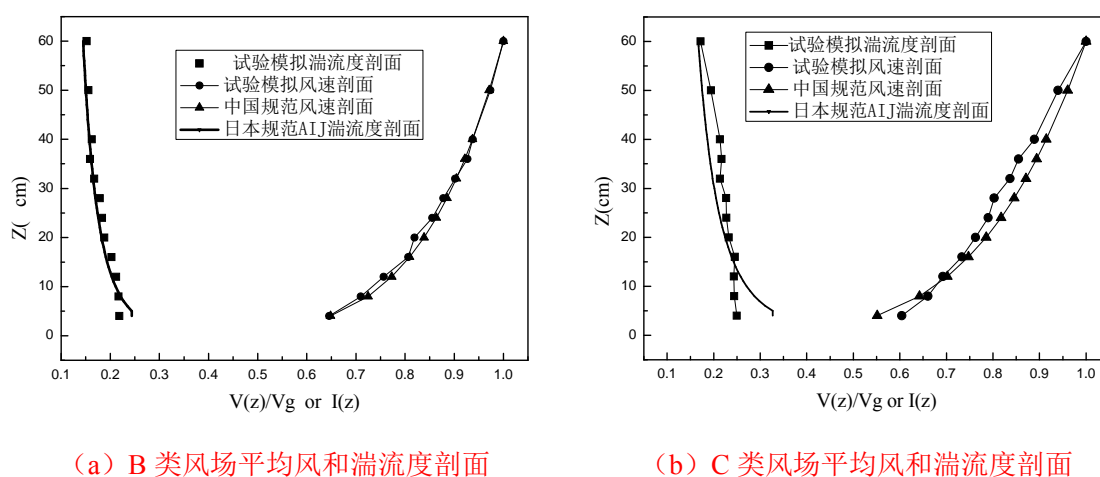


图 2.3 风洞中模拟的 B 类、C 类风场参数

2.2.2 大气边界层风场的模拟

我国的低矮房屋大都分布在中小城市、城市郊区和农村，甚至粗糙度更低的地方，在大中城市中心比较少见。因此，本课题选择 B 类和 C 类地貌如图 2.2、图 2.3 所示（地面粗糙度）作为试验风场（GB50009-2006）^[106]。风场的模拟采用在试验段的上游安置尖塔和粗糙元来实现的。B 类和 C 类模拟风场的平均风速剖面指数分别为 0.16 和 0.22。中国规范没有针对大气湍流强度以及湍流积分尺度的规定，本次试验参考日本规范^[107]在这方面的规定并结合中国实际，B 类和 C 类风场在 10 米处的湍流强度分别为 0.19 和 0.22。图 2.3 给出了 B、C

两类风场的风洞布置情况和平均风速及湍流强度剖面。试验时 B 类风场与 C 类风场 33cm（对应于实际高度 10m）高度的试验风速分别为 12.5m/s 和 11.8m/s，对应于实际 10m 高度处设计风速为 28.1m/s 和 26.6m/s。

2.2.3 试验模型

中国南方地区分布最普遍的是 2~3 层双坡屋面的房屋、其次是平屋面和四坡屋面。在双坡屋面系列中将一个三角挑檐的双坡屋面建筑作为标准模型，并将其与其它双坡系列的硬山挑檐、悬山挑檐和不对称双坡屋面等的试验数据进行对照和比较。原型建筑的屋面坡度为 30 度，长度、宽度和高度分别为是 10.5m、7m 和 7m。平屋面系列中的长方体、出檐平屋面、带女儿墙平屋面以及盪顶四个模型和四坡屋面以及庑殿顶的模型尺寸以及屋面的测点布置图如图 2.4、图 2.5 和表 2.1 所示。

表 2.1 模型尺寸 (cm)

屋面形式	模型	檐口高度 (H)	宽度(B)	长度(D)	细部特征
平屋面系列	长方体	700	700	1050	
	出檐	700	700	1050	出檐 100
	女儿墙	700	700	1050	女儿墙高 100
	盪顶	700	700	1050	曲线
双坡屋面系列	标准型	700	700	1050	出檐 100
	悬山屋面	700	700	1050	出檐 100
	硬山屋面	700	700	1050	出檐 100
	三角形山墙	700	700	1050	出檐 100
	马头形山墙	700	700	1050	出檐 100
	弧形山墙	700	700	1050	出檐 100
四坡屋面	不对称屋面	700	700	1050	出檐 100
	标准	700	700	1050	出檐 100
	庑殿顶	700	700	1050	出檐 100, 曲线

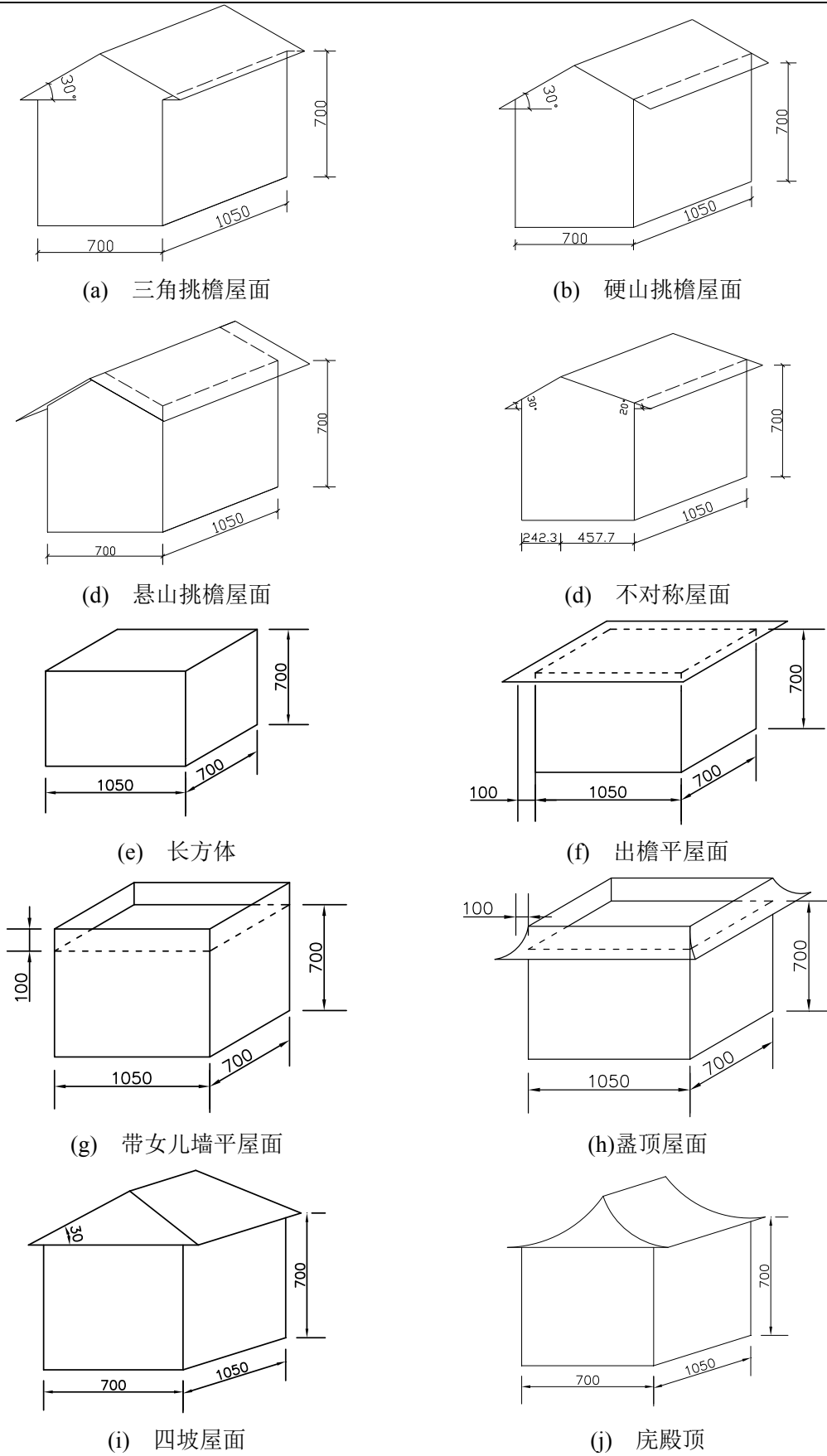
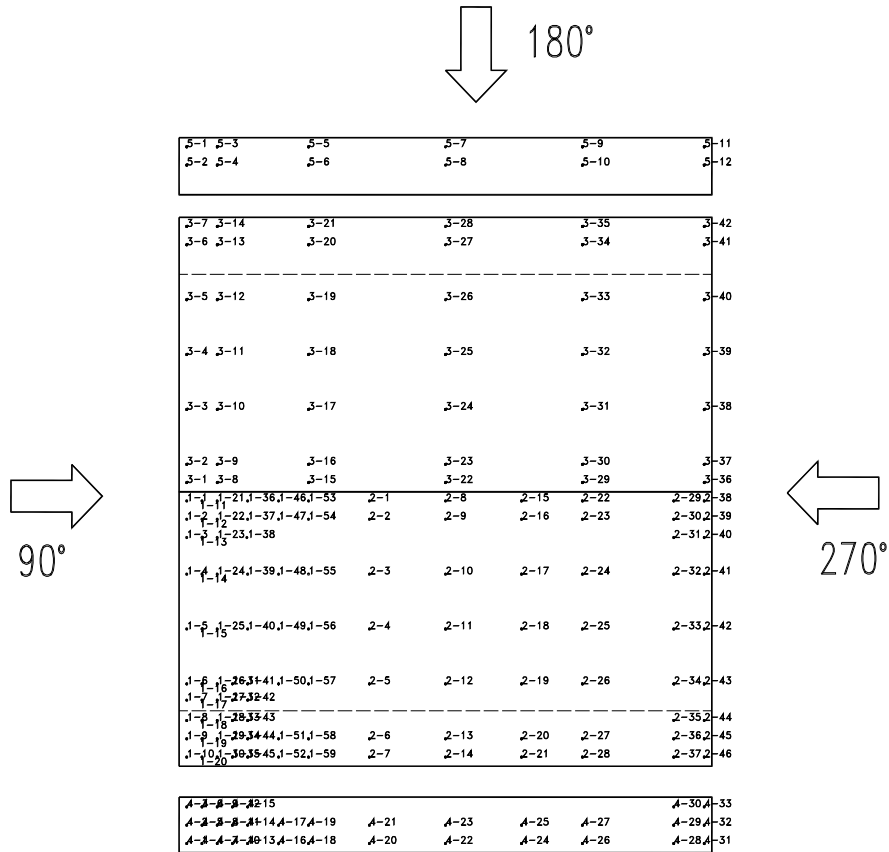
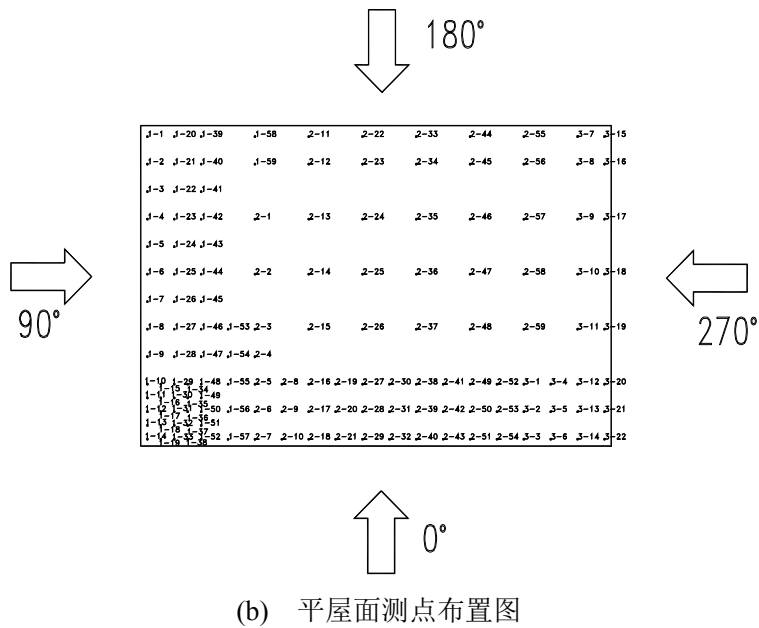


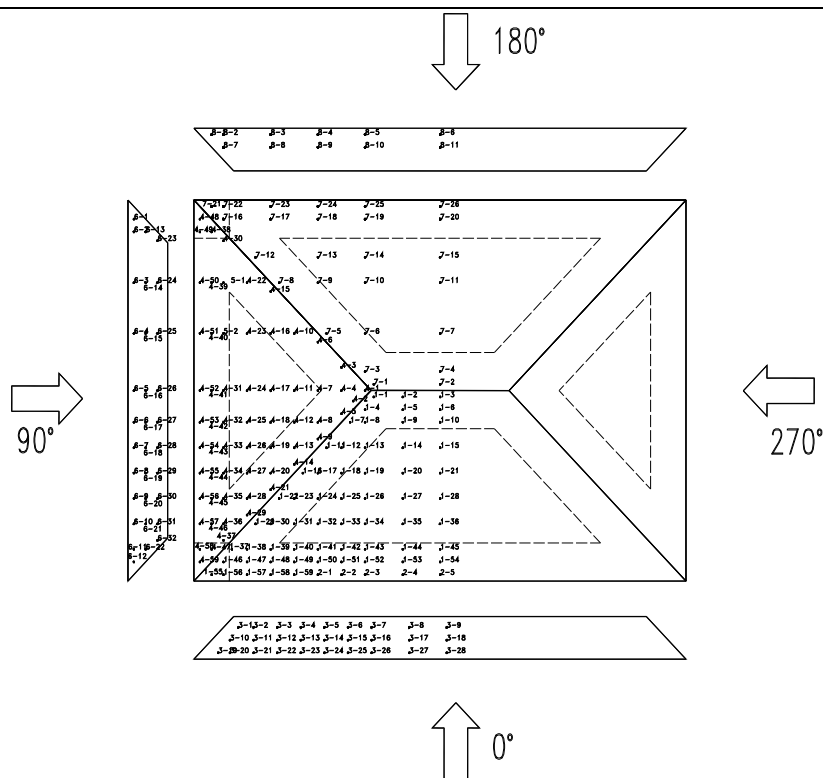
图 2.4 模型立体示意图



(a) 三角挑檐屋面测点布置图



(b) 平屋面测点布置图



(c) 四坡屋面测点布置图

图 2.5 屋面测点布置及风向角示意图

低矮房屋屋面测点的布置主要是根据实验条件和初步确定的重点观察区域进行分区布置的。由于在 ASCE-7^[108]中将低矮房屋中的屋面（包括平屋面、双坡屋面和四坡屋面等）分为角部、边缘区域以及内部区域三个区域（屋面坡度 $7^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 的双坡屋面和四坡屋面的屋脊线附近的区域也做为边缘区域）。规范中屋面的绝对值最大的平均风压以及脉动风压系数均出现在角部区域，而边缘区域的数值也很大；相对而言内部区域的数值要小很多，所以在本次试验中重点关注的区域是角部区域和边缘区域，因而对这些区域进行了测点加密。但是，由于受到测点总数的限制，加之建筑物本身以及风向角的对称性，因而在屋面上采取了满布不对称的测点布置，最密的地方测点间距为 1cm，总测点数为 236 点。

在 B 类风场下，试验风向角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间以 10° 为增量逐渐增加，中间增加角度 45° ，在 $90^\circ \sim 360^\circ$ 之间以 15° 为增量变化，共 28 个角度；在 C 类风场下，风向角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间均以 15° 为增量，共 24 个角度。

本试验中，测压信号采样频率为 120Hz，每个测点采样时间为 90s，对应实际采样频率为 9Hz，实际采样长度为 20min。

2.2.4 试验数据处理

(1)、测点风压

建筑表面的风压用无量纲压力系数表示为：

$$\overline{C_{pi}} = \frac{\overline{P_i(t)}}{0.5\rho U_H^2} \quad (2.1)$$

$$\overline{e_{pi}} = \frac{\sigma_{P_i(t)}}{0.5\rho U_H^2} \quad (2.2)$$

式中， $\overline{C_{pi}}$ 为建筑物表面某测点的平均风压系数； $\overline{P_i(t)}$ 为测点的平均风压值； $\overline{e_{pi}}$ 为测点的均方根风压系数； $\sigma_{P_i(t)}$ 为测点风压的标准差； ρ 为空气密度； U_H 为建筑屋面平均高度处的来流风速。

(2)、管道修正

在风洞试验中最常用的是同步测压的方法，但是实际上由于测压系统中设备的局限性做不到真正意义上的测量各点同一瞬间的压力值，尤其是首、末通道的信号会存在较大的相位差，传压管道传递的压力信号会产生幅值和相位的畸变，因而对于测量得到的脉动风压信号需要进行管道修正。文中采用周昶毅^[115]的测压管道系统的直接修正法。本次试验中的导压管系统不是由锈钢钢管路和PVC管组成，结果表明由于PVC管的长度都是65cm~70cm，得到的动态测压信号基本没有畸变。

2.3 试验数据可靠性验证

为了检验本文试验数据的可靠性，将本文数据和相关文献资料提供的试验数据进行了比较。Quan 等^[116]在日本东京工艺大学风工程研究中心建立了低矮建筑气动数据库(http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/w_it.html)。Holmes^[8]也做了相关形状低矮房屋的试验。本文选择三角挑檐双坡屋面在 B 类风场 0°风向角下的平均风压系数和 Quan 等的试验结果及 Holmes 的试验结果比较。总体上看，三个风洞试验的数据吻合，但由于试验模型和试验风场的差异使得试验数据略有不同。本试验模型和 Holmes^[8]选取的是带有挑檐的双坡屋面，但是 Quan 等的模型是不带挑檐的，这导致屋檐局部的风压分布产生一定的差异。Holmes 模型高度与长度之比只有 1/4，而本试验是 2/3，这将对气流翻越建筑的流态特征产生一定的影响。本试验在模型的参考高度处的湍流强度是 0.19，Holmes 的试

验风场湍流度跟本试验一致在 0.20 左右，而 Quan 等^[116]的风场在参考高度处的湍流强度是 0.24。

根据与 Holmes 和 Quan 等的试验结果的比较（如图 2.6）可以看出三个风洞试验结果基本吻合，表明本课题风洞试验的结果是可靠的。

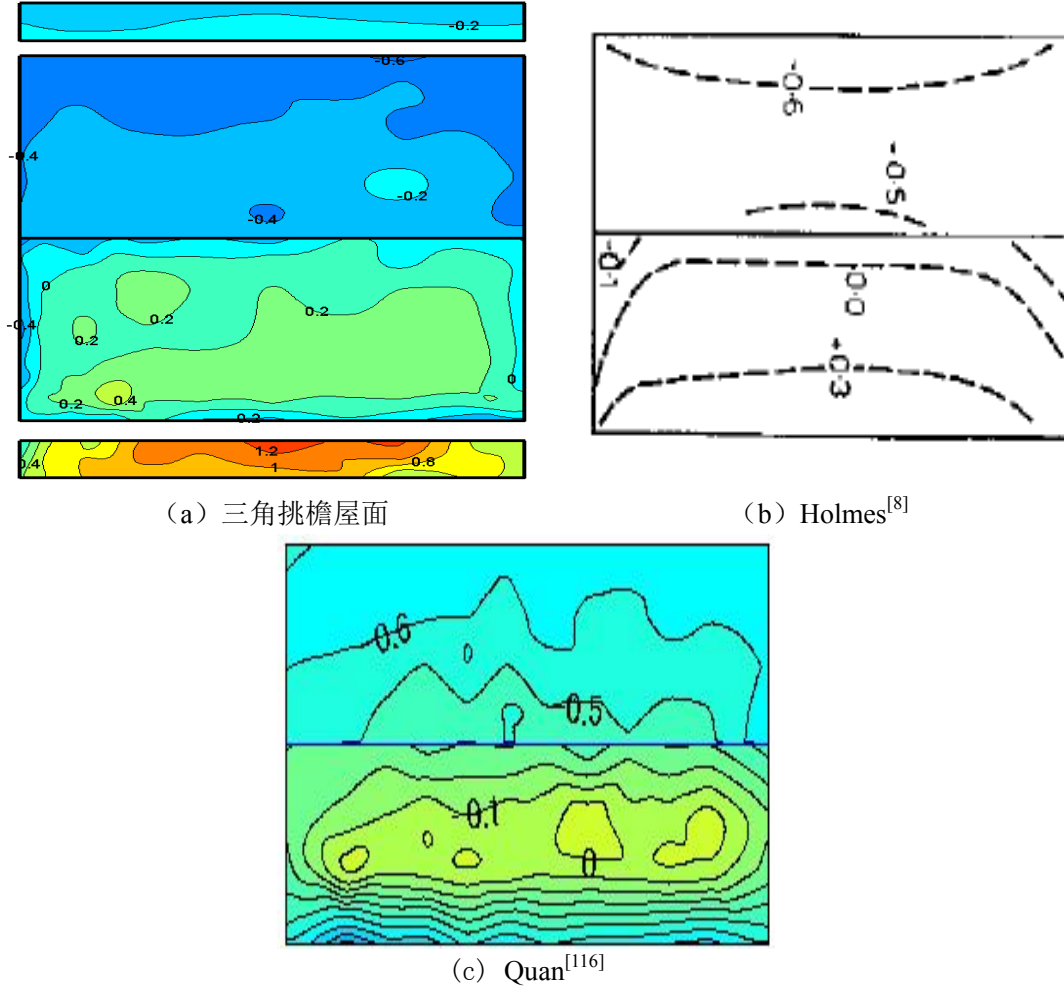


图 2.6 0° 风向角下的平均风压系数分布图

2.4 双坡屋面风压分布的基本特征和影响因素分析

下面主要分析四种双坡屋面在不同风向角下的平均风压系数和脉动风压系数的空间分布特性，风场湍流强度以及屋面类型对于屋面风荷载的影响。

2.4.1 平均风压系数分布

三角挑檐双坡屋面在 B 类风场 0°、45°和 90°风向角下平均风压系数分布图如图 2.7 所示。为了方便描述，将 0°风向角时的迎风屋面和背风屋面在其它风向角时仍然称为迎风屋面和背风屋面。从图中可以看出，风向角为 0°时，除最

边缘少数区域外，迎风屋面的平均风压系数主要呈现为正值，而背风屋面都是负值。45°斜风作用时，迎风屋面除了迎风屋角附近及屋面中部区域为正压以外，屋檐边缘以及屋脊附近的大部分区域以及整个背风屋面均为负压，且背风屋面负压值比风向角为 0°时的负压值更大更不均匀；0°风向角时，风向与屋脊线平行，整个屋面全呈现为负压，两片屋面上风压系数的分布对称而且迎风边缘屋角处负压最大，沿着屋脊线的方向逐渐递减。风向角从 0°逐渐变化到 90°时，屋面的负压的绝对值不断增大，正压值不断减小甚至消失。

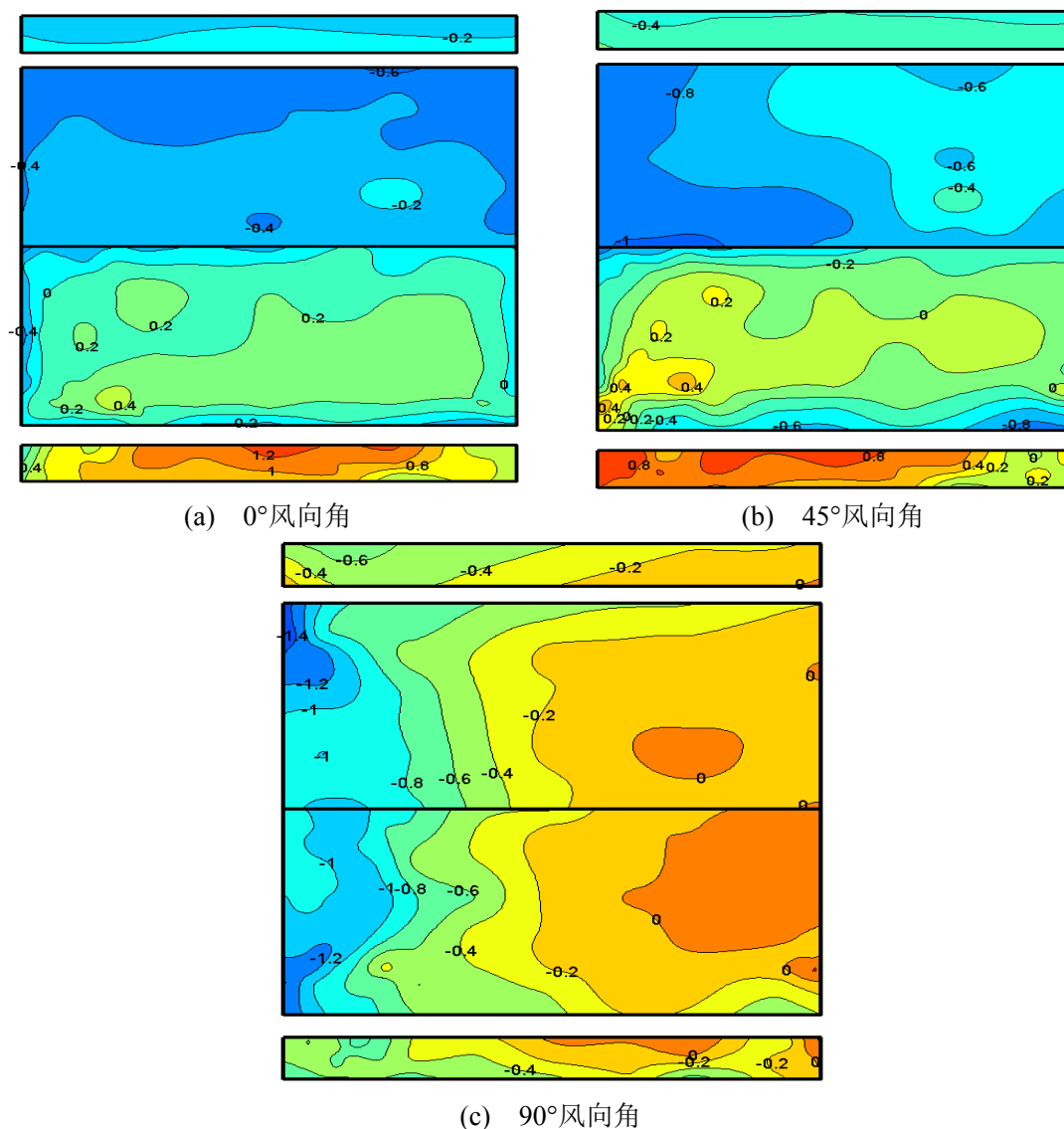


图 2.7 三角挑檐双坡屋面 B 类风场平均风压分布

在 0°风向角下迎风挑檐中部下表面的平均风压系数为 1.2 左右，由中部向边缘方向平均风压系数逐渐减小，在最边缘处减小到 0.2~0.3 之间。此时，背风挑檐下表面平均风压系数均在 -0.2 左右。45°风向角下，迎风屋檐下表面的平均风压系数从迎风一侧的 +0.8 逐渐减小到另一侧的 -0.2 左右，背风屋檐下表面平均

风压系数则在-0.4左右。90°风向角下，屋檐的下表面平均风压系数在-0.6~-0.2之间。当风向角由0°逐渐变化到90°时，迎风挑檐下表面的平均风压系数由正压向负压转变，背风挑檐下表面的平均风压分布一直是负压，且负压的绝对值不断增加。

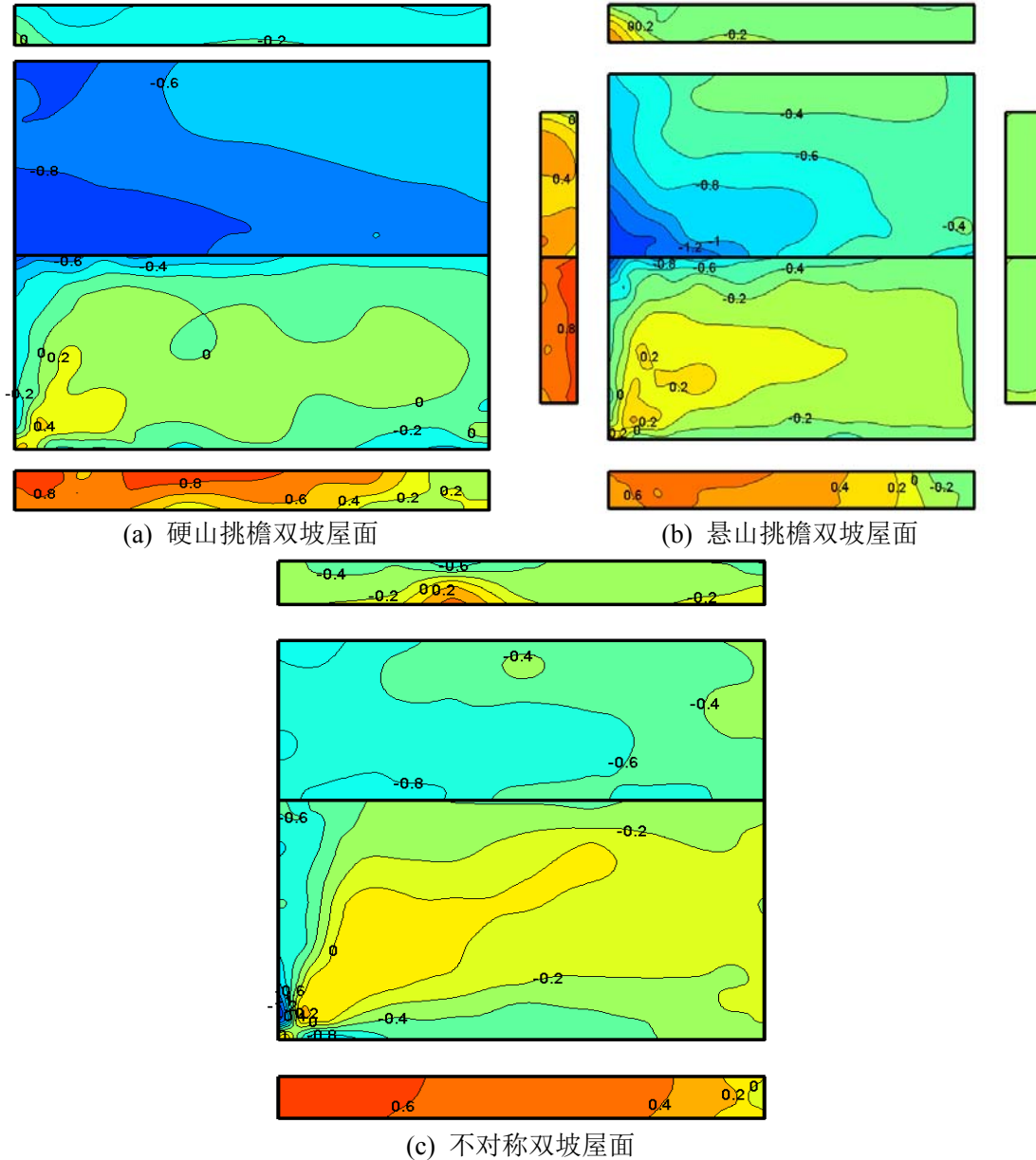


图 2.8 硬山挑檐、悬山挑檐及不对称双坡屋面 B 类风场 45°风向角下的平均风压分布图

双坡屋面系列除三角挑檐外，还包括硬山挑檐、悬山挑檐和不对称双坡屋面，这三种屋面在 B 类风场下 45°风向角时的平均风压系数分布特性如图 2.8 所示。

硬山挑檐屋面的等压线图和三角挑檐屋面上的比较类似，在迎风屋面的山墙和挑檐连接的角部处平均风压系数出现比较大的梯度变化，从+0.4 迅速递减到-0.2。在屋面边缘和屋脊附近出现绝对值较大的负压，三角挑檐屋面在屋面边

缘平均风压（负压）系数出现最小值，达到-0.8。硬山挑檐屋面的绝对值最小的平均负压系数则为-0.6，出现在屋脊边缘。背风屋面的平均风压分布则较为缓和，三角挑檐屋面上平均风压系数大部分在-0.8~-0.2，硬山挑檐屋面上则在-0.8~-0.6。

悬山挑檐屋面在迎风屋面的挑檐山墙角部、山墙与屋面的连接边缘以及屋脊山墙的角部均产生了比较大的等压梯度变化，挑檐山墙角部从+0.4 迅速递减到-0.2，在屋脊处产生了-0.8 的风压。悬山挑檐的背风屋面与三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面相比，平均风压系数变化比较大，在-1.2~-0.4 之间。

不对称屋面与前三个模型相比，在迎风屋面更加明显的呈锥形分布，在挑檐山墙的角部有着更加密集的等压线的分布，在-0.8~-0.2 之间，其他部分则较为缓和；背风屋面全部呈现负压，分布更为平缓，平均风压系数在-0.8~-0.4 之间。

上述四种双坡屋面的平均风压分布的差异主要是由于挑檐形式的不同影响所致。不同挑檐形式对于屋面局部风荷载的影响主要集中在背风屋面屋脊附近，由于悬山挑檐屋面侧面山墙屋檐的存在，在 45°风向角下在屋脊处的分离比其他没有侧面屋檐的屋面更加强烈，因而背风屋面靠近屋脊附近的区域产生的负压的绝对值也要比其他三种屋面大很多。在迎风屋面部分，三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面由于挑檐下表面角度的不同导致来流风分离时产生的负压不同，三角挑檐屋面的挑檐边缘部分的负压的绝对值要比硬山挑檐屋面的大一些；不对称屋面的迎风屋面要比其他三种屋面大一些，屋面坡度也比较小，与迎风边缘的距离增大，来流风分离的强度明显减弱，坡度也小于 30°，这使得它的迎风屋面的风压要明显小于其他的三种屋面，基本呈现负压分布。

2.4.2 脉动风压系数分布

一般来说，某一风向角下某一点上的风压的脉动水平可以用均方根风压系数来估算。图 2.9、图 2.10、图 2.11 分别给出了四种双坡屋面在两种风场中三个风向角下的脉动风压系数分布图，从图中可以看出风向角、来流风的湍流度和屋面测点位置对脉动风压系数有较大影响。

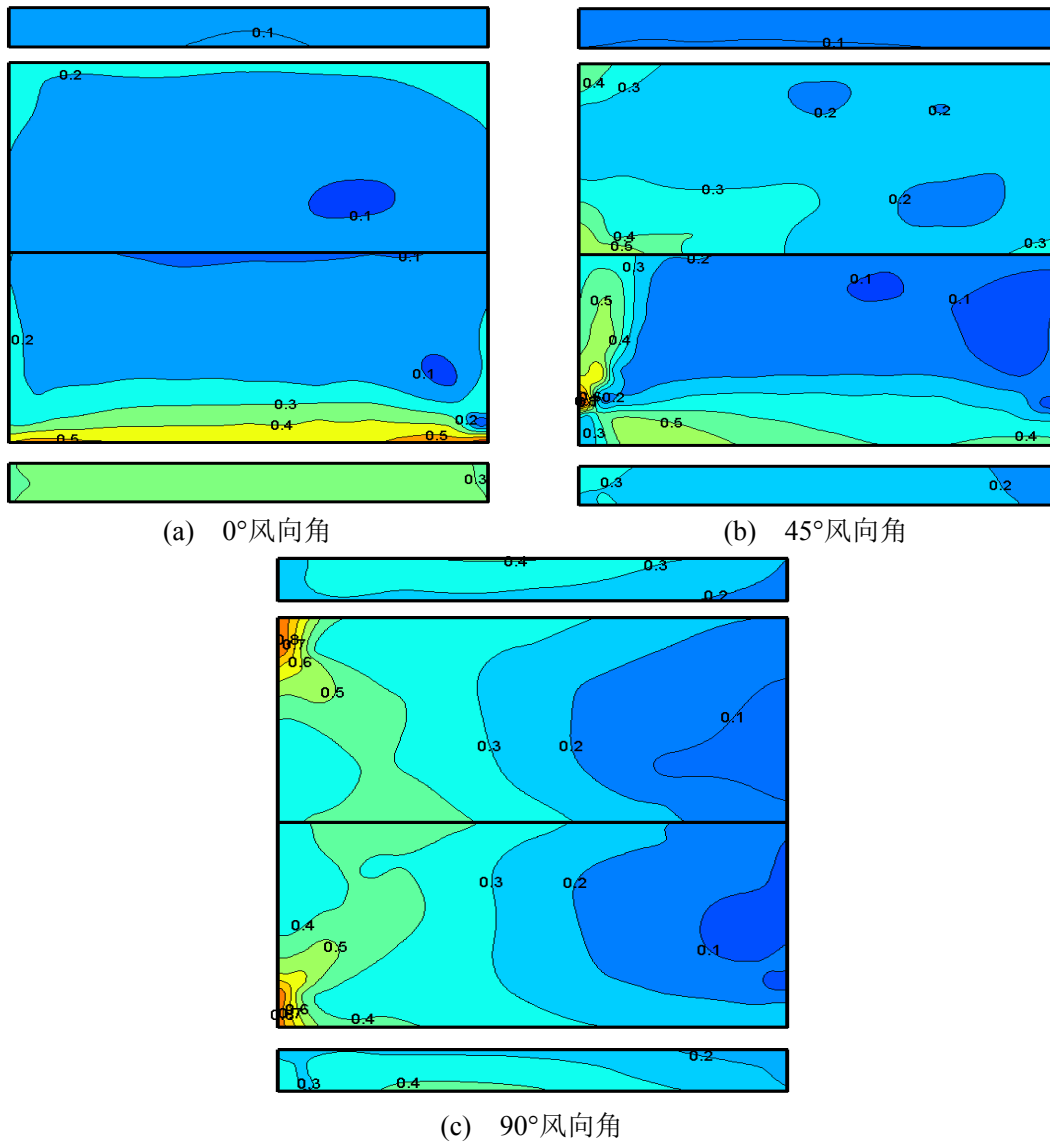


图 2.9 三角挑檐双坡屋面 B 类风场脉动风压分布图

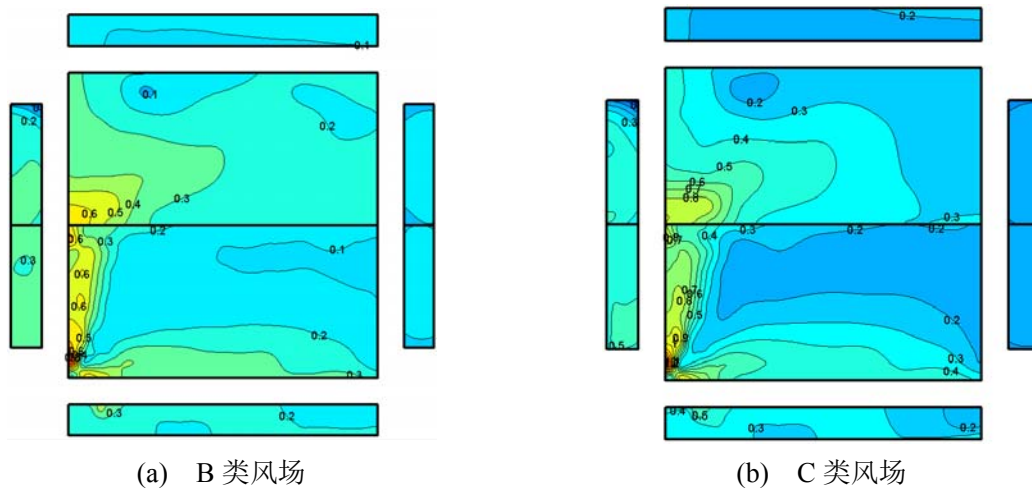


图 2.10 悬山挑檐双坡屋面 45°风向角下的脉动风压分布图

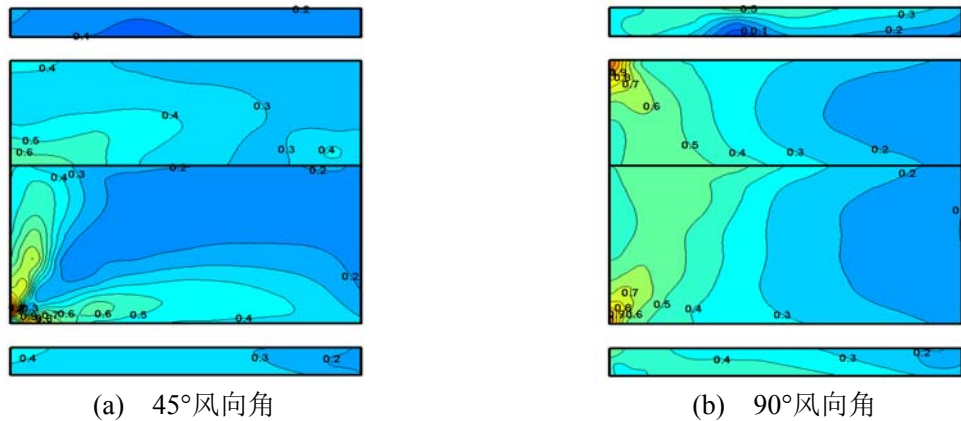


图 2.11 不对称双坡屋面 C 类风场下的脉动风压分布图

由图 2.9 可以看出，三角挑檐屋面在 0° 风向角下的脉动风压系数的最大值在 $0.4\sim 0.5$ 之间，出现在迎风屋面边缘区域，在极窄的角部区域会出现 0.5 ；背风屋面的脉动风压系数则相对较小且比较一致，最大仅为 0.2 左右。 45° 风向角下，则是在迎风屋面的山墙和挑檐连接的局部区域出现比较大的脉动值，在 $0.6\sim 0.7$ 之间。在 90° 风向角下，由于风的来流方向平行于屋脊线使得两片屋面的脉动风压呈对称分布，其最大值在 $0.6\sim 0.8$ 之间，依然出现在屋面的挑檐与迎风山墙连接的角部。其他的三个双坡屋面的脉动压力分布也都有类似的规律。

图 2.10 显示的是以悬山挑檐屋面在 45° 风向角下不同风场条件中的脉动风压分布情况。无论是在迎风屋面还是在背风屋面，其脉动风压分布图等压线的梯度变化在 C 类风场下明显比 B 类风场要大。迎风屋面的最大脉动风压系数也是由 0.8 (B 类风场) 增大到 1.0 (C 类风场)，背风屋面则是由 0.6 (B 类风场) 增大到 0.8 (C 类风场)。

不对称屋面与其他三个双坡屋面的主要区别在于屋面不对称，这会使其其中一片屋面的坡度要略小于 30° 。由图 2.10 (b) 和图 2.11(a) 可以看出，同在 C 类风场 45° 风向角下，悬山双坡屋面和不对称屋面在迎风屋面上无论是从数值还是分布特征上都比较类似，最大的脉动风压系数也是 1.0 ；在背风屋面有些区别，虽然脉动风压系数最大值都是出现在屋脊与山墙的连接区域，但是悬山屋面的最大值为 0.8 而不对称双坡屋面仅为 0.6 。这主要是因为迎风屋面来流风中的湍流度是影响屋面脉动风压系数的主要因素，而在背风屋面气流在屋脊处发生二次分离，屋面形式的不同导致了背风屋面脉动风压分布的不同。

2.4.3 不同屋面类型典型点风压系数的比较

为了研究四种屋面的压力分布情况，选取四种屋面中线（如图 2.5 所示），其中 d 代表屋面中心测点到迎风屋面挑檐的投影距离， D 代表屋脊到屋面挑檐边

缘的投影距离，当 $0 < d/D < 1$ 时代表迎风屋面的中线测点， $1 < d/D < 2$ 代表背风屋面的中线测点)上的测点风压系数进行对比。数据分析结果表明四种双坡屋面的屋面中线测点的风压系数(包括平均风压系数和脉动风压系数)无论是在B类风场还是在C类风场的各风向角下变化趋势一致，只是数值稍有不同而已，表明风场类型对于风压系数沿屋面的变化趋势影响很小，因此选择B类风场 0° 和 45° 风向角下的风压系数变化为例来说明。

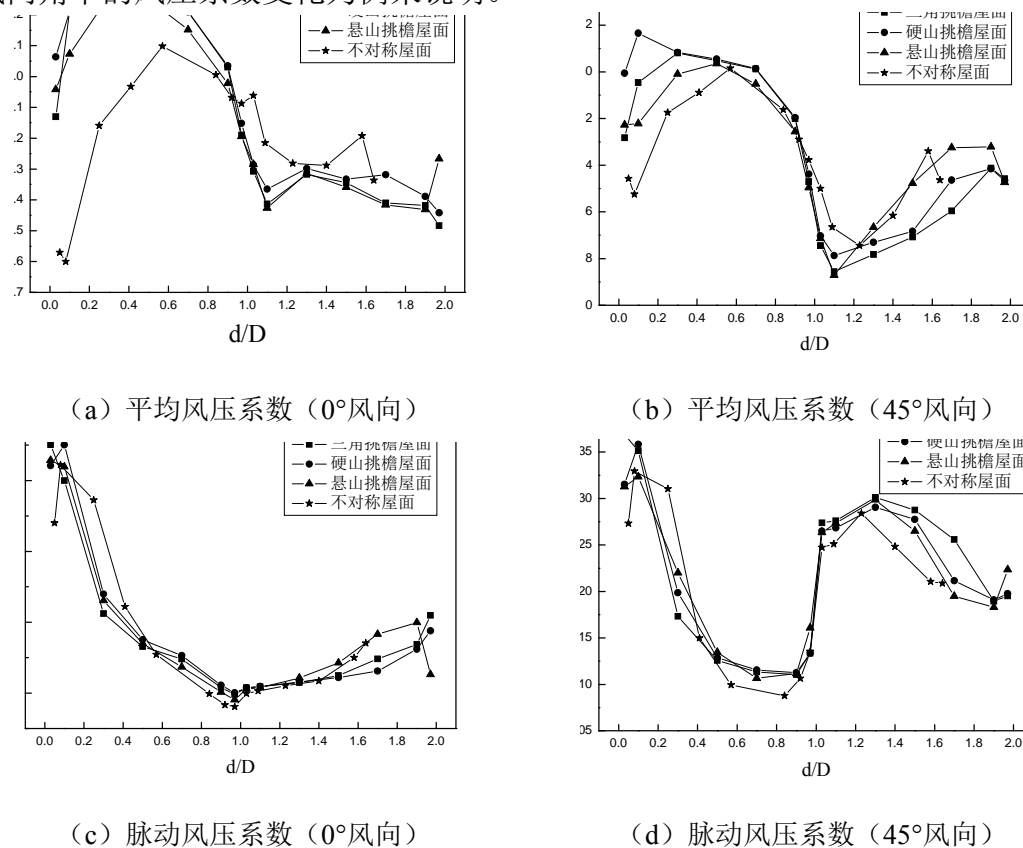


图 2.12 四种屋面典型点风压系数的比较 (B类风场)

从图 2.12 (a) 可以看出在 0° 风向角下，不对称屋面与其他三种屋面的变化趋势不同，在迎风屋面边缘差距尤为巨大，不对称屋面整个屋面的平均风压系数绝对值最小值发生在迎风屋面边缘，而其他三种屋面则发生在背风屋面的边缘，可以看出坡度小于 30° 的迎风屋面上产生的吸力要大于 30° 坡度的屋面。这主要是因为由于不对称屋面的迎风屋面斜坡角度较其他屋檐类型的屋面坡度小，导致气流在屋脊处的分离也小的缘故。图 (b) 中显示在 45° 风向角下四种双坡屋面除了在迎风屋面挑檐边缘有所不同外，其他部分沿着屋面中线的变化趋势基本一致，都是在背风屋面屋脊附近出现最小平均负压。四种屋面在迎风屋面的平均正压出现在硬山挑檐屋面 (45° 风向角) 上。

由图 (c) 和 (d) 可以看出，无论是在 0° 风向角还是在 45° 风向角，四种屋面的脉动风压系数变化趋势基本一致，在 0° 风向角下脉动风压在迎风屋面沿着

屋面中线从迎风边缘到屋脊逐渐减小，在屋脊处达到最小值，然后在背风屋面逐渐升高，脉动风压系数最大值都是发生在迎风屋面边缘。在 45° 风向角下，脉动风压变化趋势在迎风屋面同 0° 风向角一致，在背风屋面则是先升高后降低，在背风屋面的中部的脉动系数要比屋脊附近和背风屋面挑檐边缘部分都要大。脉动风压的最大值依然出现在迎风屋面边缘，最小值出现在屋脊附近。

三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面在屋面形状上完全相同，唯一的不同是在挑檐下表面的坡度上，而挑檐下表面的不同导致了这两种屋面在挑檐边缘的上表面的平均风压系数的不同，三角挑檐屋面挑檐边缘的屋面平均负风压要小于硬山挑檐屋面，脉动风压系数也要稍大于硬山挑檐屋面，因而它比硬山挑檐屋面在屋檐边缘更容易产生破坏。

2.4.4 湍流度对屋面风压系数的影响

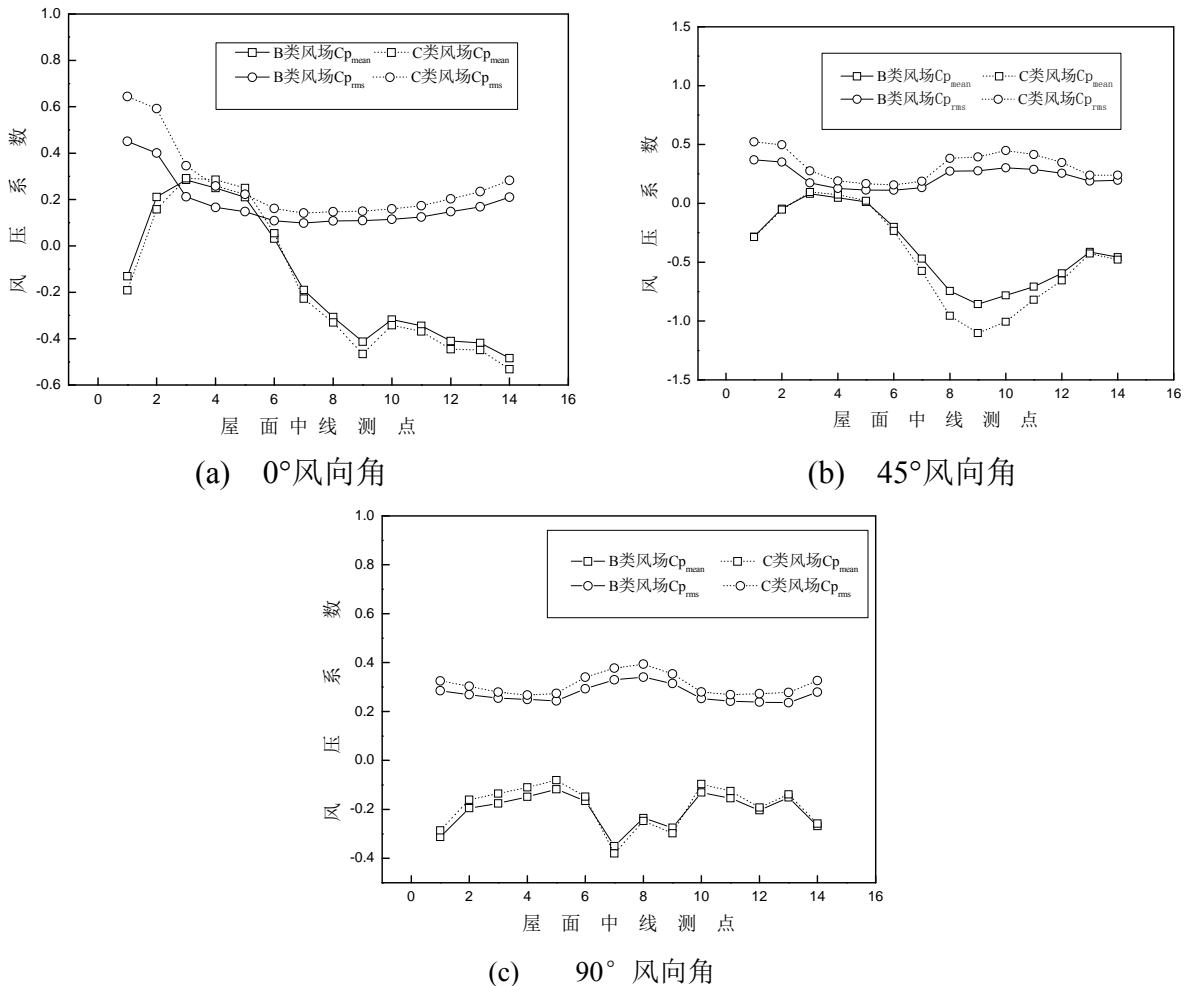


图 2.13 屋面中线测点在不同风场下的风压系数变化图

对于低矮建筑来说，风速随高度的变化对屋面风压系数分布的影响不大，但是由于是近地建筑，湍流度的变化是影响它的表面风压的主要因素之一。以

三角挑檐的双坡屋面建筑为例进行说明, 图 2. 13 是三角挑檐的双坡屋面在 B、C 两类风场下风向角为 0° 、 45° 和 90° 时的屋面中线上 (见图 2. 5 (a)) 的风压系数曲线图。从图中可以看出:

对于平均风压系数来说, 在 0° 风向角下, 随着湍流度的提高, 迎风屋面正风压系数略微减小而背风屋面负压绝对值略微增加。

在 45° 风向角下整个屋面上的风压基本上都呈现为负压, 与 B 类风场相比, C 类风场下迎风屋面的中间区域负压的绝对值略有降低, 整个背风屋面的负压的绝对值都增加。由于来流湍流度增加导致分离泡体积减小, 剪切层曲率增大, 从而导致该区域的负压绝对值增大, 这与文献^[117]给出的试验结果吻合。

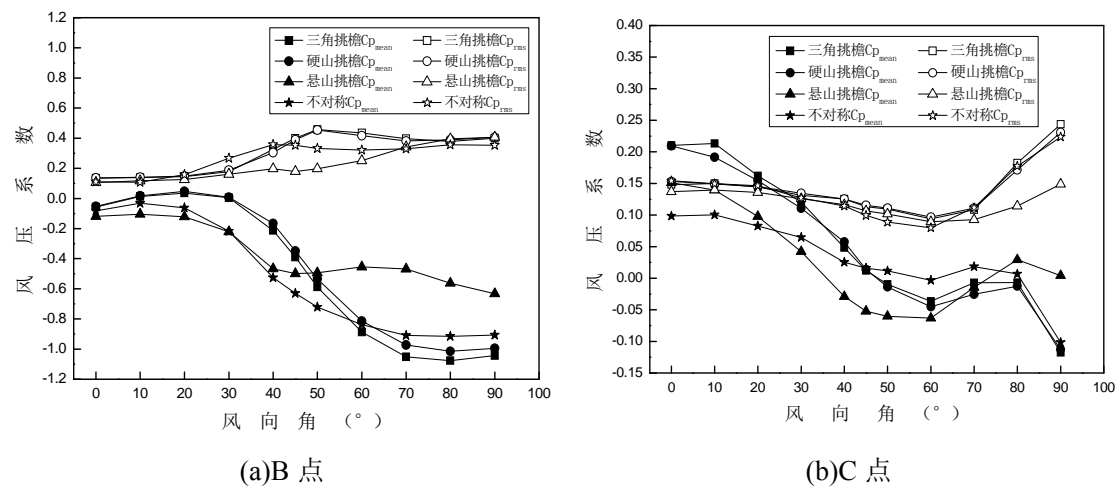
在 90° 风向角下湍流度的增加仅仅是使屋脊附近区域的负压的绝对值略微增大, 而其他区域的负压的绝对值都是减小的。

在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 风向角之间所有测点上的脉动风压系数 ($C_{p_{rms}}$) 都是随着湍流强度的增加而增加的。

2. 4. 5 屋檐形状对典型部位风压系数的影响

强风作用下低矮建筑屋面的破坏常常发生在屋脊端部附近、挑檐端部和挑檐边缘处。美国 ASCE 规范中对屋面荷载和挑檐荷载是分别给出的, 澳大利亚及新西兰规范中也特别给出了挑檐的风压系数。

(1) 屋面



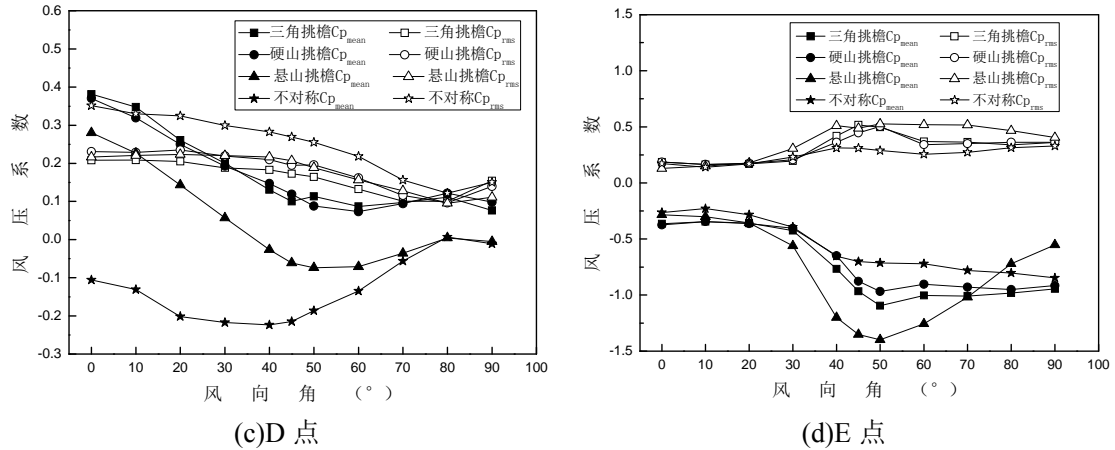


图 2.14 不同屋檐类型对屋面风荷载的影响

图 2.14 分析屋面上典型测点（如图 2.4 (a) 所示）的风压系数随风向角的变化。B 点位于屋面上屋脊端部附近，在此部位产生比较大的极值的是三角挑檐屋面和硬山挑檐屋面，正极值是发生在 45° 风向角，负极值是在 60°~70° 之间，但是悬山双坡屋面的变化趋势与其他三种双坡屋面发生了明显地不同，尤其是在 45° 风向角附近。

C 点处于各个双坡屋面的迎风屋面的中心部位，四个模型的平均风压系数的变化趋势一致，在极值变化上均是在 90° 风向角上产生绝对值最大的正、负极值风压，但是悬山双坡屋面与其他三个双坡屋面相比变化平缓，产生的极值的绝对值也较小，三角挑檐双坡屋面产生的极值的绝对值较大。

D 点位于迎风屋面的迎风墙面附近（挑檐的附近），不对称双坡屋面与其他三个双坡屋面相比，产生了绝对值较大的负极值，尤其是在 0° 风向角，平均风压系数呈现负值，脉动风压系数也比其他三个模型要大得多，这是由于不对称双坡屋面的迎风面要比其他双坡屋面长的多坡度放缓的缘故，但是四个模型在此位置的风压系数随着风向角变化的规律基本一致。

在背风屋面的山墙与屋脊角部的 E 点，悬山双坡屋面的正极值的变化规律与其他三个屋面不一致，它在 80° 风向角上出现了最大的正极值，其他的三个模型的最大正极值出现则是在 45°~50° 之间出现的；在 50° 风向角悬山双坡屋面出现最大的负极值风压和负的平均风压系数都要比其他三个模型的大得多。

以上的分析可以看出，屋面的不同部位产生最大风压系数的风向角是不同的。某些部位对于特定的风向角极为敏感。挑檐形式的变化对于坡屋面的中心区域的风压系数的影响比较小，但是在其它部位不同的形式影响的程度是不同的。三角挑檐双坡屋面和硬山挑檐双坡屋面在屋面的不同部位的风压系数数值基本相似，变化趋势一致，可以看出挑檐角度的变化对于屋面风荷载产生的影响不大。悬山双坡屋面与其它三个模型相比，在 B 点、C 点和 E 点产生了不同

的变化趋势，虽然部分区域产生的极值的绝对值并不比其他三个模型的大，但是也要特别关注，尤其是在 E 点还产生了要比其他三个模型绝对值大的多的负极值。不对称双坡屋面在 D 点的部位值得注意，它的迎风坡面较长，很容易在此位置产生破坏。这些是在低矮建筑屋面设计中值得十分注意的。

(2) 挑檐

图 2.15 中的典型测点 A1 和 A2 分别位于挑檐部分前缘角部的上表面和下表面。(a) 图中挑檐的上表面四个模型的变化趋势基本一致，在 80° 风向角时产生了绝对值最大的正负极值，其中三角挑檐双坡屋面最大，悬山双坡屋面的最小。(b) 图中挑檐的下表面悬山双坡屋面表现出与其它三个双坡屋面不同的变化趋势，四个模型的最大正极值出现在 $45^\circ \sim 50^\circ$ 风向角，三角挑檐的最大正负极值的绝对值均是最大，但是悬山双坡屋面的绝对值最大的负极值则出现在 0° 风向角，其它三个模型的则出现在 80° 风向角。由此可以看出，挑檐的上下表面同一区域的最大极值的出现并不是同步的；三角挑檐的形式容易产生较大的极值风压；悬山挑檐的下表面在 0° 风向角时易产生绝对值比较大的负极值风压。

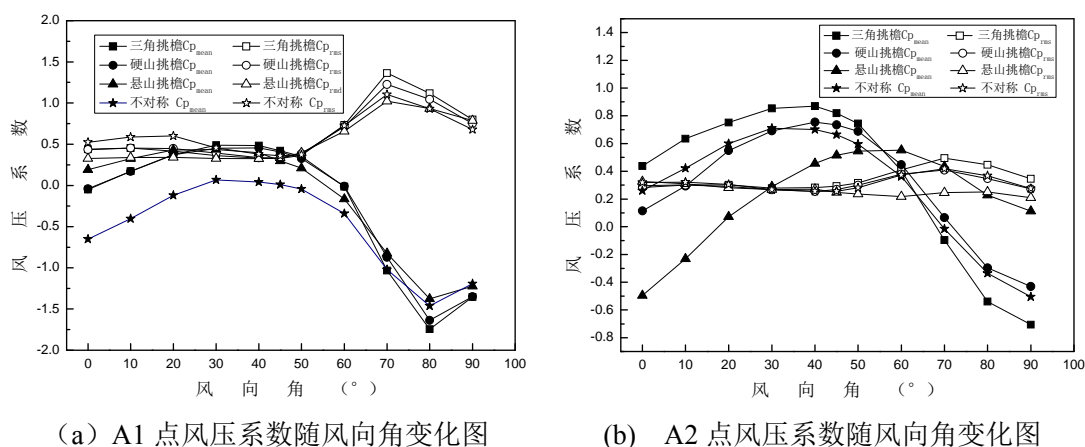


图 2.15 不同屋檐类型对挑檐风荷载的影响

2.5 平屋面风压分布的特征

2.5.1 平均风压分布

平屋面的风洞试验结果如图 2.16 和图 2.17 所示。在 0° 风向角下，平屋面系列的四种平屋面整个屋面的平均风压均是负压。长方体的屋面和出檐平屋面的平均风压分布近似，带女儿墙和平屋面和盪顶则是有很大的不同。长方体屋面和出檐平屋面的前缘由于来流分离，导致了涡旋的形成，出现了高的负压区，但是仅仅局限于很小的范围内，这两种平屋面均出现在迎风边缘的角部区

域, 长方体绝对值最大的平均风压为-1, 而出檐平屋面是-1.4。其他区域的风压系数相对很小, 沿着来流风的方向-0.8 变化到-0.2。带女儿墙平屋面由于在来流风方向女儿墙的阻挡, 绝对值最大的平均风压出现在屋面的中间区域, 其数值为-0.8, 区域的范围也很小, 屋面大部分区域的平均风压在-0.6~-0.2 之间变化。盪顶屋面的平均风压的变化则是更小, 平均风压在-0.6~-0.4 之间。

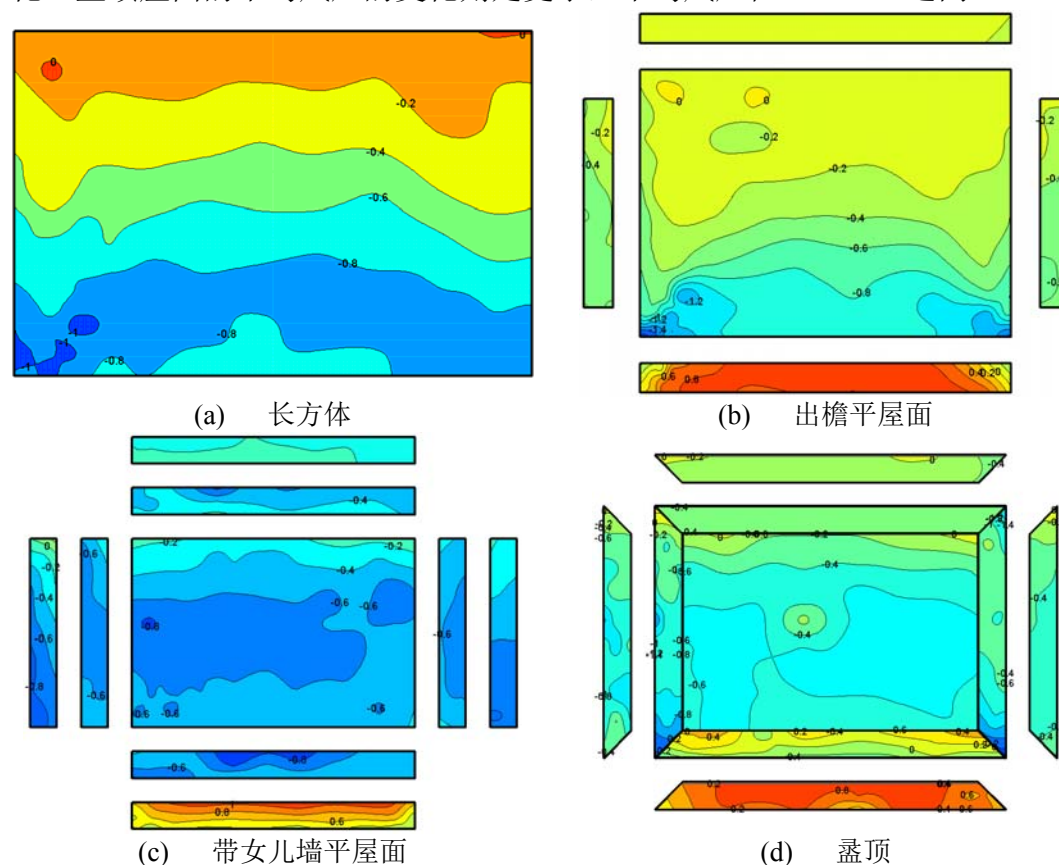


图 2.16 0° 风向角下的平均风压分布特征

0° 风向角下, 迎风边缘的挑檐下表面的平均风压是正压, 其他三个挑檐下表面则是负压区, 但是其风压值都比较小。迎风挑檐的下表面的平均风压最大为 0.6, 其他三个挑檐下表面的平均风压绝对值是- 0.6。带女儿墙平屋面的模型中女儿墙的内侧的平均风压同屋面一样均是负压, 基本同屋面边缘区域的平均风压相同。在迎风面的女儿墙内表面平均风压是-0.8~-0.6 之间, 两侧的女儿墙的平均风压在-0.6~-0.4。背风边缘的女儿墙的内侧表面正对着来流风的方向, 但是由于前面女儿墙的阻挡, 来流风在此表面产生的平均风压绝对值很小, 在-0.4 左右。盪顶的附属建筑可以近似的认为是内凹弧状女儿墙和挑檐组合的一种特殊形式, 内凹形的女儿墙表面在迎风面的平均风压都是比较小的正压, 都在 0~0.4 之间, 但是在两侧的女儿墙表面的平均风压产生了比较高的负压-1.2, 高负压区出现在迎风边缘的角部区域, 后面的内凹弧形女儿墙表面的平均风压也是负压区, 但是风压值很小, -0.2 左右。挑檐的下表面的平均风压分

布也同出檐平屋面的挑檐下表面相似，在迎风边缘的挑檐下表面的平均风压是正压，在 0.6~0.2 之间变化，其他三个挑檐下表面都是负压区，都在-0.6~-0.2 之间变化。

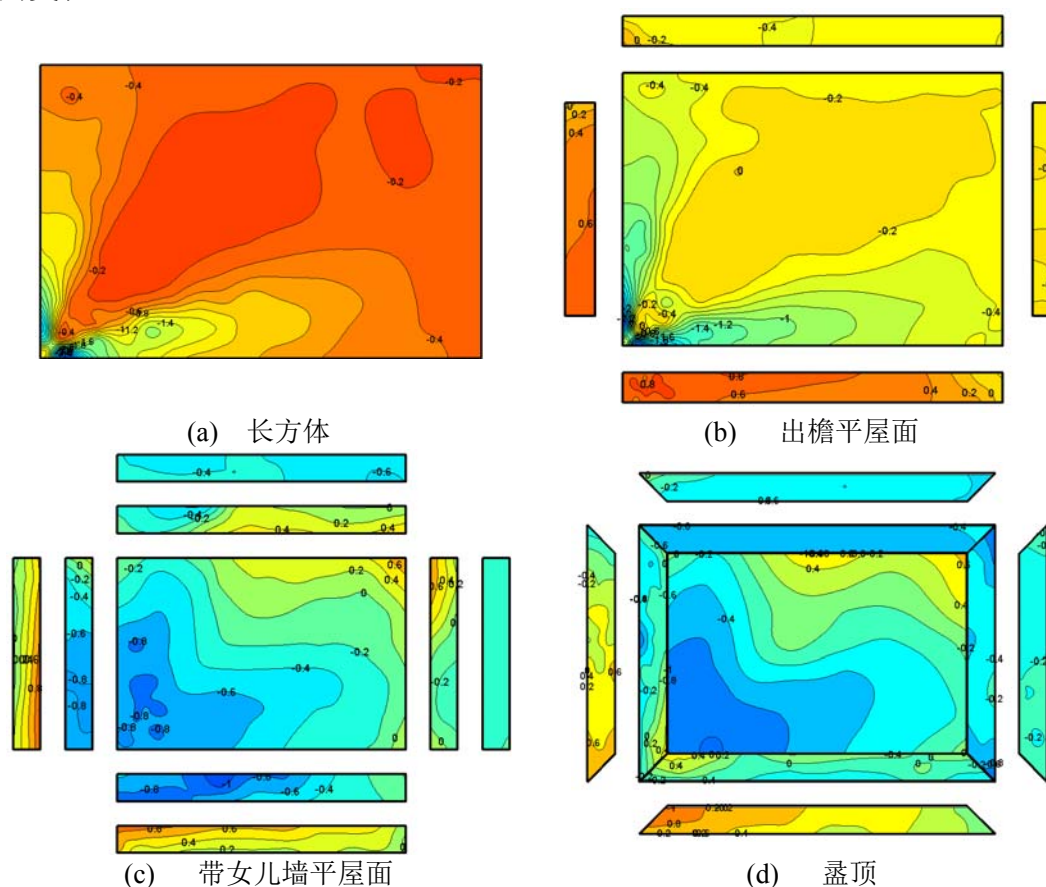


图 2.17 45° 风向角下的平均风压分布特征

在 45° 的斜风向角下，长方体和出檐平屋面的锥形涡所形成的泪滴状负压区明显，并且屋角内的风压变化梯度非常大（长方体的屋面从-3.5 剧烈衰减到-1.4，出檐平屋面是从-3 剧烈变化到-1.2），因而风压分布情况十分复杂。在 45° 风向下此负压区压力分布是关于屋角的 45° 角平分线对称的，而且压力变化的梯度方向是两个锥形涡的轴线方向。锥形涡的中心楔形区域的负压相对较为平坦并且保持在-0.4~0.2 左右。带女儿墙平屋面和盔顶由于受到女儿墙的阻挡，屋面的压力分布相对比前面两个模型平缓得多，平均风压的数值与该模型在 0° 风向角下变化不大，屋面的绝对值最大的负压也是在-0.8，但是其所包围的区域从屋面中间部位转移到屋角的区域要比 0° 风向角时的要大很多，其他区域分布平缓的区域的平均风压呈驼峰状分布从-0.6 变化到 0.4，在来流风的屋面对角的区域产生了正压。盔顶的分布同带女儿墙平屋面基本类似，平均风压也是从-0.8 变化到 0.6，不过盔顶正压的区域要比带女儿墙平屋面大。带女儿墙平屋面和盔顶在 45° 风向角时在迎风角的对角处出现了正压区，这是因为

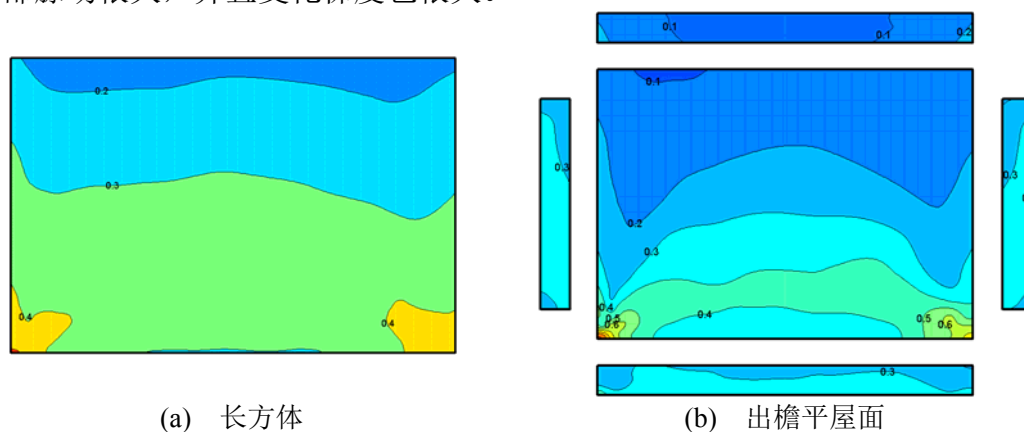
来流风经过女儿墙产生绕流分离，又在屋面的对角部位产生了再附现象造成的。

45° 风向角下，出檐平屋面的挑檐下表面在迎风侧部分区域的正压最大值 0.8 比 0° 风向角时 (0.6) 增加，盪顶的挑檐下表面由 0° 风向角时的 0.6 增加到 1。女儿墙的外侧面的平均风压中正压是减小的，负压的绝对值是增加的。盪顶的内凹形坡面却是正压部分基本不变，负压的绝对值却是减小的。

从上面的分析可以看出，女儿墙以及盪顶的附属结构的存在可以减小屋面平均风压，但是挑檐的存在可以在局部增加局部屋面的平均风压。不同形式的附属结构所产生绝对值较大的负压所对应的风向角也是不同的，即比较敏感的风向角不同。长方体、出檐平屋面对斜风向 (45°、135°、225° 和 315°) 比较敏感。带女儿墙的平屋面和盪顶则是对正风向 (0°、90°、180° 和 270°) 比较敏感。

2.5.2 脉动风压分布

图 2.18 和图 2.19 给出了平屋面系列在 0° 和 45° 两种典型风向角下的脉动风压变化情况。由这些等压线图可以得到结论：脉动风压的分布情况与平均风压基本相似。在 0° 的正风向角下，来流风在屋面前缘分离，在分离区内所谓屋面迎风前缘的脉动风压比较大；45° 的斜风向角下，受锥形涡的影响，屋面角部脉动很大，并且变化梯度也很大。



(a) 长方体

(b) 出檐平屋面

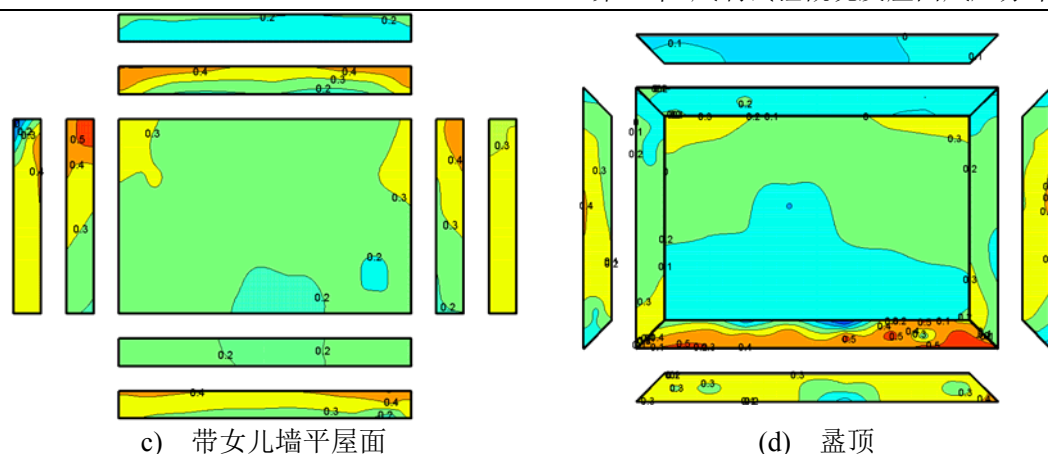


图 2.18 0° 风向角下的脉动风压分布特征

从图 2.18 可以看到，在 0° 风向角下长方体的脉动风压最大只有 0.4，出檐平屋面的脉动风压最大为 0.9。带女儿墙平屋面和盪顶屋面的脉动风压都在 0.3~0.2 之间，脉动风压在梯度变化相比较长方体和带挑檐的平屋面要平缓许多。

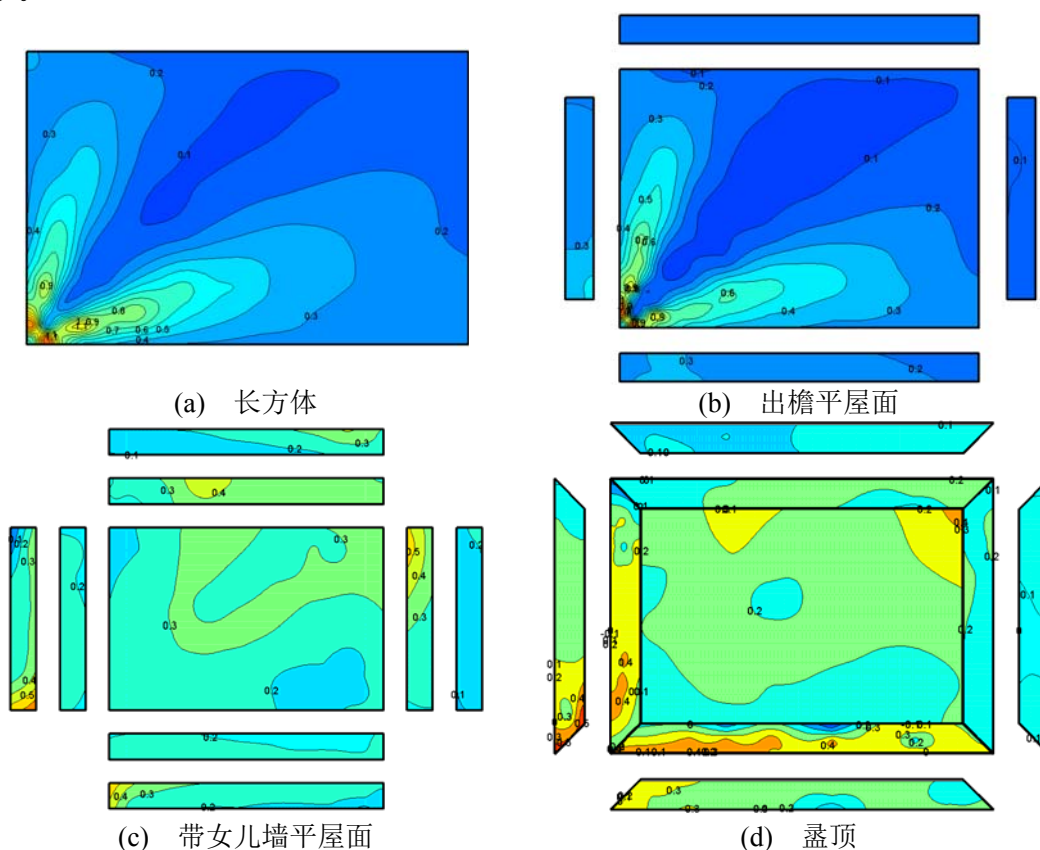


图 2.19 45° 风向角下的脉动风压分布特征

在 45° 风向角下（如图 2.19 所示），带女儿墙平屋面和盪顶的脉动风压基本上没有变化依然在 0.3~0.2 之间，只有分布区域稍做变化，但是长方体屋面和出檐平屋面变化很大，尤其是长方体的脉动风压变化剧烈。长方体的最大脉

动风压由 0.4 剧增到 1.4，出檐平屋面则是增加到 1.2。这两种模型的脉动风压梯度变化剧烈的地方同平均风压一样集中在迎风屋角的气流分离处。

平坡屋面系列中四个模型的脉动风压在屋面上的分布由于屋面形式的不同产生很大的差异；除此之外，他们各自的附属结构表面的风雅分布也有很大不同。

出檐平屋面的挑檐的下表面的脉动风压不管是在 0° 还是 45° 风向角都是在 0.3~0.2 左右，变化不大。带有女儿墙和平屋面的脉动风压却有明显不同的变化，（由于女儿墙是由四面女儿墙 8 个侧面组成，按照在 0° 风向角下分为前墙、后墙、左墙和右墙）前墙外侧、后墙内侧以及左、右两墙的内侧表面由于直接对着来流风的方向，它们的脉动风压大都是在 0.5~0.2 之间，其他四个侧面则是同屋面一样脉动风压都在 0.3~0.2 左右，个别范围很小的区域出现 0.4 的脉动风压。在 45° 风向角下，左墙和前墙的外侧表面以及右墙和后墙的内侧的处于来流风的分离区，脉动风压要比 0° 风向角时来得大，在 0.5~0.2 左右，其他四个面的脉动风压则都在 0.3~0.1 左右。这可以看出，无论是在正风向角下还是斜风向角下女儿墙上的脉动风压的最大值总是大于屋面的脉动风压的最大值的。盪顶的内凹形女儿墙表面在 0° 风向角时，迎风面的脉动风压比较大，大都在 0.5~0.4 左右，其他三个面的脉动风压则都较小，在 0.3~0.1 之间。盪顶的挑檐下表面有三个表面脉动较大，在 0.4~0.3，只有后墙的挑檐下表面最小，脉动风压都在 0.1 左右。

从以上两图中可以看出，挑檐的存在增加了平屋面的脉动风压；女儿墙和盪顶等遮挡物的存在会减小屋面的脉动风压，但是相应地女儿墙本身墙体的脉动风压却会比屋面本身的脉动风压大；盪顶这种既有伸出屋顶的挑檐部分又有高出屋面的墙体部分的特殊的屋面附属结构同样使得屋面的脉动风压减小，但是在盪顶的局部区域脉动风压会出现比较大的数值（不同风向角对应不同的部位）。

2.6 四坡屋面风压分布特征和风场湍流的影响

屋脊线均为直线的四坡屋面同双坡屋面一样是低矮建筑中坡屋面比较常见的形式之一，在我国早期主要出现在 50 年代时期欧式建筑（主要是前苏联建筑模式）中，近几年也有越来越应用广泛起来。文中把具有中国特色的庑殿顶也归入四坡系列，它的平面图与四坡屋面完全一致，在图 2.20(b)的侧面图中可以看出，它的屋面是曲线形式的。庑殿顶是我国一种比较典型的宫殿和庙宇大殿屋顶形式。庑殿顶又叫“四阿顶”，是中国传统屋顶中以重檐庑殿顶、重檐歇山顶

为级别最高，其次为单檐庑殿顶、单檐歇山顶。佛殿、皇宫的主殿等重要的建筑是采用重檐庑殿顶，是最尊贵的形式。庑殿顶四面斜坡，有一条正脊和四条斜脊，屋面稍有弧度，又称四阿顶，是“四出水”的五脊四坡式，又叫五脊殿。在我国古代，屋顶的结构和形式代表着所处的社会阶层和社会地位。屋顶的结构及等级可分为：

第一位：重檐庑殿顶。重要的佛殿、皇宫的主殿，象征尊贵。

第二位：重檐歇山顶。常见于宫殿、园林、坛庙式建筑。

第三位：单檐庑殿顶。重要的建筑。

第四位：单檐歇山顶。重要的建筑。

第五位：悬山顶。民居、神橱、神库。

第六位：硬山顶。民居。

第七位：卷棚顶。民间建筑。

无等级：攒尖顶。亭台楼阁。

重檐庑殿顶是清代所有殿顶中最高等级，现存的古建筑物中，只有故宫太和殿和曲阜孔庙大成殿使用重檐庑殿顶。

以土木结构为主流的中国古代建筑文化，还有一个显著特征，就是其屋顶的造型与众不同，寓意深刻。世界上其他建筑体系的屋顶都是向外凸出的，唯有中国古建筑的屋顶是向内凹曲的。在宋代建筑学名著《营造法式》中，介绍了这种凹曲屋面的建造方法：先定举高，再将桁枋按一定衰减规律向下折降，最终形成屋面的凹曲线。这种方法叫做“举折”。在我国东南沿海，多暴雨台风，乡民以草结庐，屋顶参照庑殿顶作成流线型，减小阻力以抗强风，并有利于屋顶雨水顺势流下，称之为“落舍”，亦有朝风一面作成单落舍屋顶。这也可以当成是现代四坡屋面的前身^[118]。

因此本文所选的四坡系列模型的两种屋面形式分别为屋脊线为直线的四坡屋面和单檐庑殿顶，它们的长、宽、高尺寸与前面的双坡屋面完全一致，屋面坡度也同为 30° 。具体的平面布置图如图 2.20 (a) 所示。四坡屋面和庑殿顶由于受到扫描阀数量的限制和模型本身的对称性只布置了一半测点，所以风压分布（包括平均风压、脉动风压和极值风压）图只画了一半。

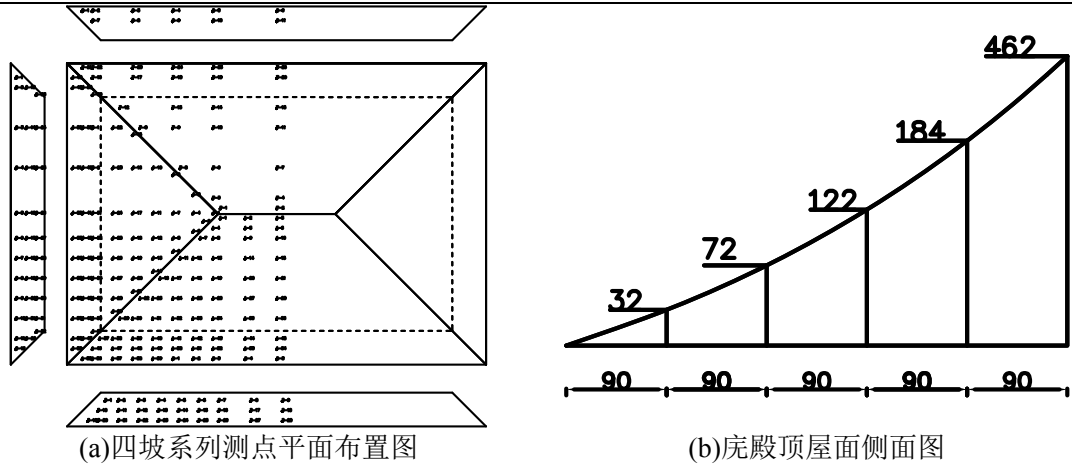
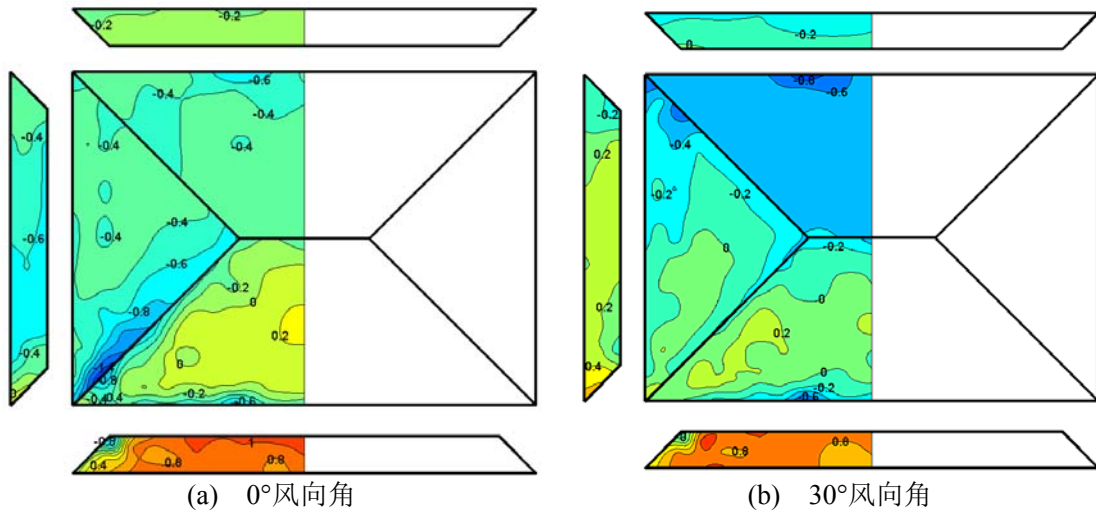


图 2.20 四坡屋面系列布置图

2.6.1 平均风压分布

图 2.21 和图 2.22 分别是四坡屋面和庀殿顶在五种典型风向角 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 下的平均风压系数分布图。四坡屋面比双坡屋面多四条屋脊线，由于屋面的对称性测点只布置了一半，因此将整个屋面分布三个区域，以便于描述屋面的风压分布特征，他们分别是 A 面、B 面和 C 面。A 面和 C 面是梯形屋面，而 B 面则是三角形屋面。



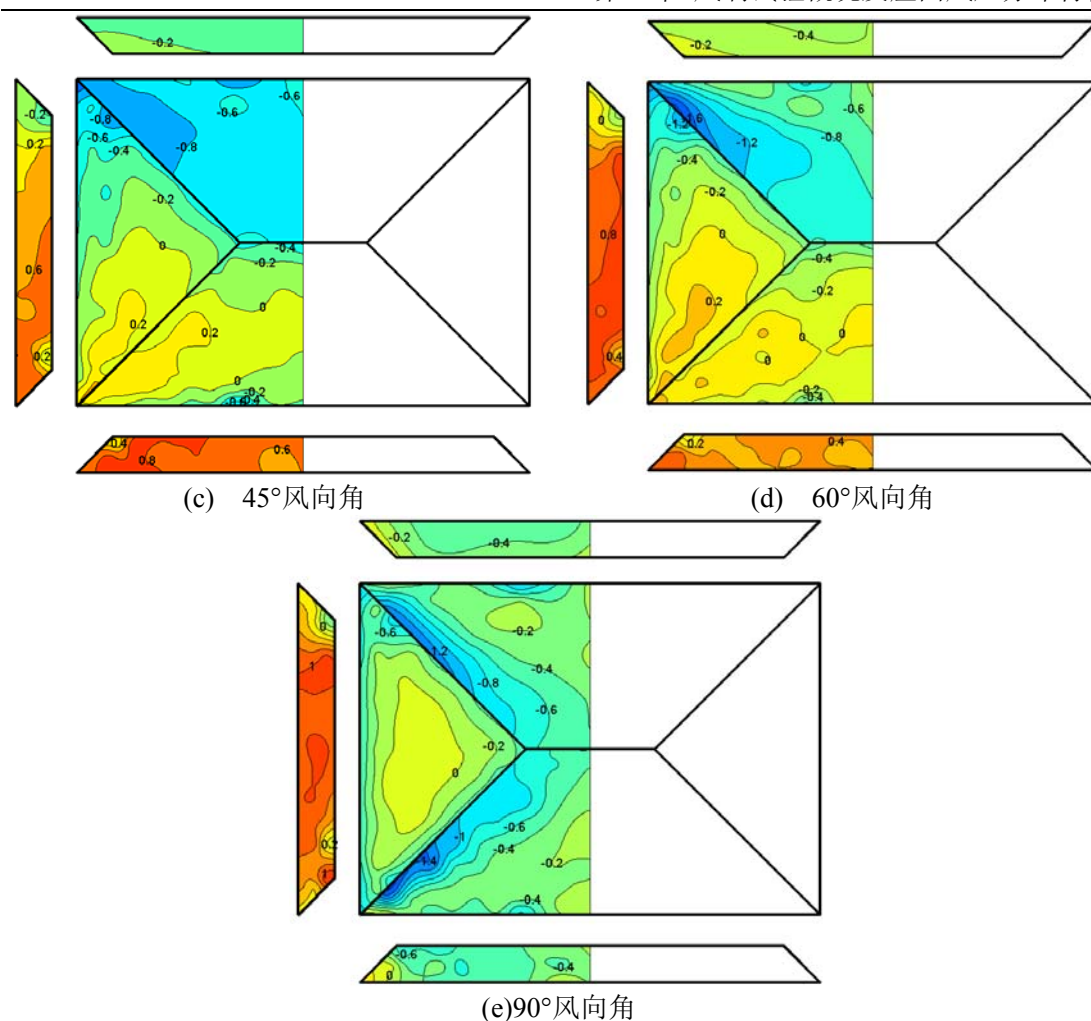


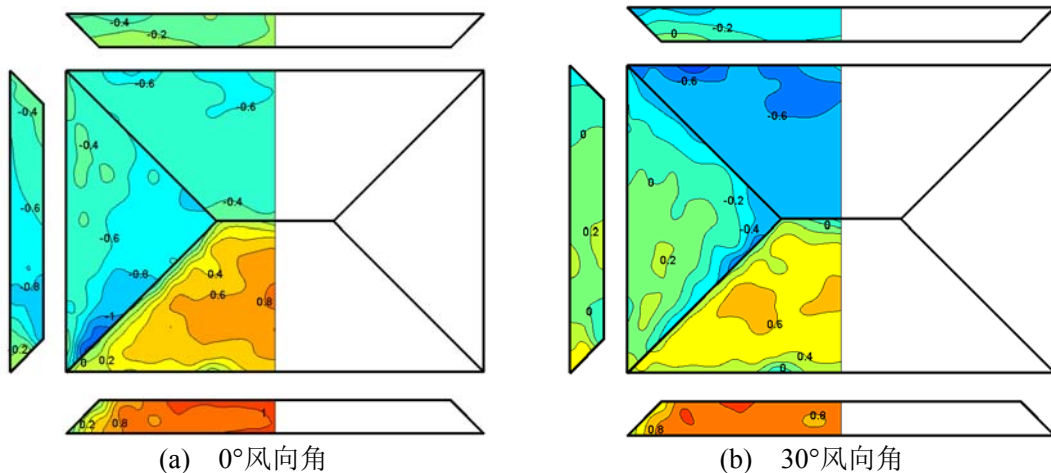
图 2.21 四坡屋面典型风向角下的平均风压系数分布图

图 2.21(a)是四坡屋面 0°风向角下的平均风压分布图，从图中可以看出 A 面在此风向角下是迎风屋面，屋面在屋脊线附近和屋面挑檐附近区域呈现绝对值较小的负压，大部分范围在 0~-0.4 之间，只有在和 B 面以及屋檐交界的很小的区域出现 -0.6 和 -0.8 的平均风压值。屋面的中央区域呈现正压区，在 0~0.2 之间。在 B 面，0°风向角下屋面全部呈现负压区，在 B 面的大部分区域等压线分布平缓，负压范围在 -0.4~-0.6 之间，但是在 B 面与 A 面相交的屋脊线附近区域，等压线比较密集，风压值从 -0.6 迅速变化到 -1.4。C 面在 0°风向角下表面屋面全部呈现负压，而且平均负压大都为 -0.4 左右，只有很小的部分达到 -0.6。总的看来，在 0°风向角下，四坡屋面的分离区集中在了 A 面挑檐前缘以及 A 面和 B 面之间的屋脊线（以下简称 AB 屋脊线）附近，只有在这个区域出现绝对值比较大的高负压区，A 面虽然靠近 AB 屋脊线的区域也有负压出现，但是负压绝对值较小，而且整个 A 面的风压绝对值相对都很小，B 面和 C 面虽然全部呈现负压，但是绝大部分区域负压变化不大，数值也都在 -0.4~-0.6 之间。这说明 AB 屋脊线附近区域气流分离要比 A 面挑檐前缘剧烈。

图 2. 21(b)、(c)和 (d)分别是斜风向角 30° 、 45° 和 60° 下的平均风压分布图。在斜风向角 30° 下, A 面基本呈现风压值较小的正压区, B 面靠近 AB 侧脊线和屋脊附近区域也有很小的区域呈现正压, 放射性带状区域呈现 $0\sim 0.2$ 之间的正压区, 其他区域均较小的负压区在 $0\sim -0.4$, C 面依然还是处于 -0.4 左右的负压区, 与 0° 风向角相比 C 面的平均风压分布更加平缓。在 45° 风向角下, A 面和 B 面的平均风压分布关于 AB 侧脊线基本对称分布, 呈现关于侧脊线对称的蝶翼形分布, 而且屋面大部分区域的风压值都是 $-0.2\sim -0.4$ 之间, 只有在 B 面上靠近 B、C 面之间的侧脊线(以下简称 BC 侧脊线)和屋檐相交的角部区域, 出现 $-0.6\sim -0.8$ 的较高的负压区。C 面的平均风压分布与 30° 风向角下的基本相似, 但是风压值则是变化到了 $-0.6\sim -0.8$ 。

60° 风向角下四坡屋面的气流分离区发生在 B 面屋檐和 BC 侧脊线上, 从图 2. 21(d)可以看出依然是侧脊线附近区域的等压线最为密集。A 面的平均风压依然保持在 $0.2\sim -0.4$ 之间, 平均风压的绝对值都比较小。B 面上的大部分区域也是在 $0.2\sim -0.4$ 之间, 只有靠近 BC 侧脊线附近的区域出现了较大的风压梯度, 迅速从 -0.6 变化到 -1.2 。在 C 面上 BC 侧脊线上的平均风压的梯度变化要比 B 面上剧烈的多, 迅速从 -1.8 衰减到 -1.2 , 在远离 BC 侧脊线与屋檐角部区域的 C 面其他区域平均风压则变化较为缓慢, 大都处于 $-1\sim -0.6$ 之间。

90° 风向角下的平均风压分布图是四坡屋面如图 2. 21(e)所示。从图中可以看出, 分布图关于 B 面的屋檐的垂直平分线对称分布, B 面的风压从屋面中央区域到边缘从 $0\sim -0.4$ 缓慢变化, 只有在屋檐边缘等压线密集。A、C 面的屋面上全部处于负压区, 但是高负压区分别出现在 AB 侧脊和 BC 侧脊的附近区域, A 面的负压达到 -1.4 , C 面的负压达到 -1.2 。这说明在 90° 风向角下, 来流风在 B 面的屋檐处进行分离, 由于屋面坡度为 30° , 形成的分离区梯度变化比较平缓, 而在两处斜屋脊处进行了二次分离, 才形成了非高斯性较强的高负压区。



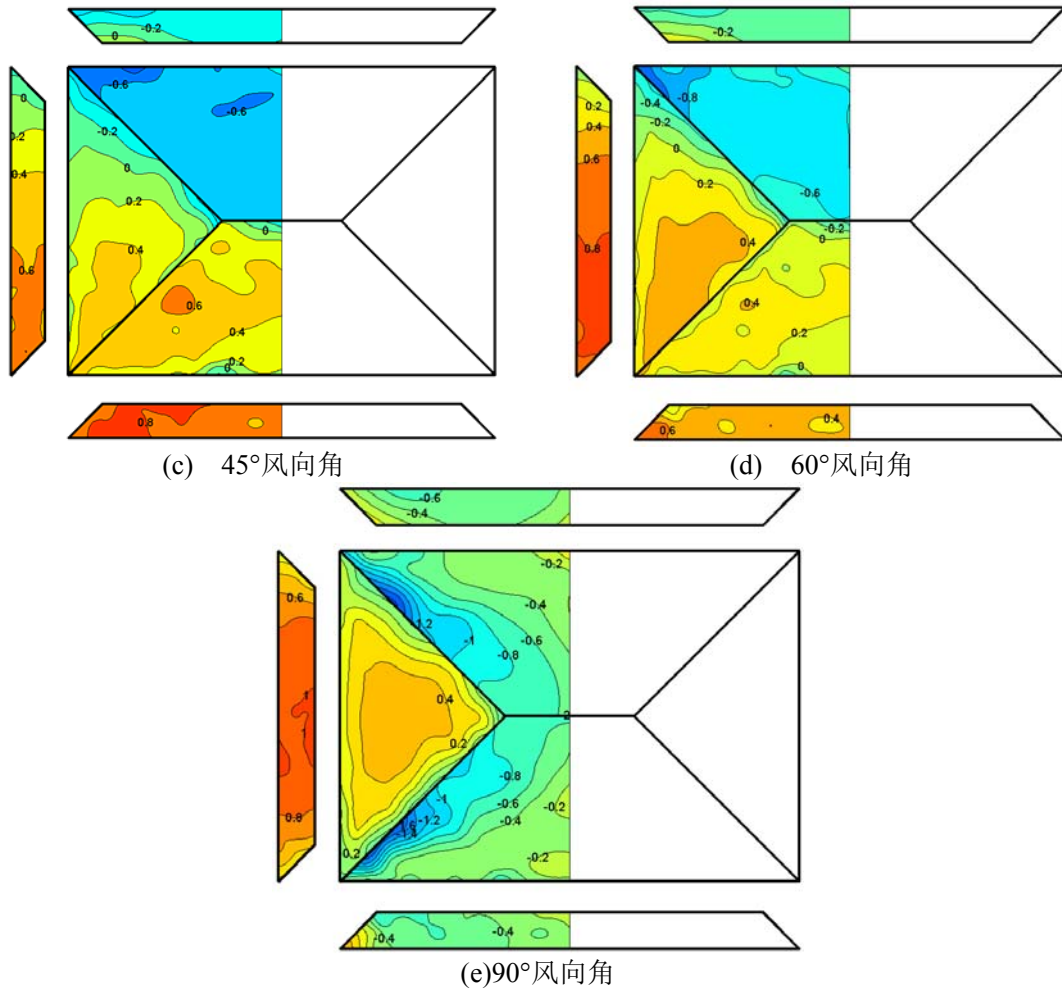


图 2.22 庑殿顶典型风向角下的平均风压系数分布图

图 2.22 是庑殿顶在 5 种典型风向角 (0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90°) 下的平均风压分布图。由于庑殿顶的四个坡面都是内凹形的曲面，前面的四坡屋面的坡面是直线形的。从图(a)中可以看出， 0° 风向角下 A 面的平均风压全部为正压，越是在屋面的中央区域平均风压就越大，中心区域的正压达到 0.8，屋脊线附近和挑檐边缘的平均风压接近为 0，这与四坡屋面是不同的，四坡屋面在 A 面中央区域的正压数值要比庑殿顶小很多，在挑檐边缘的风压会呈现负压状态，而背风屋面 C 面的平均风压均是负压，负压值在 $-0.4 \sim -0.6$ 之间，其数值的绝对值也要比四坡屋面的相同风向角下相同区域的数值大；在 B 面上，庑殿顶在迎风的 AB 钱脊线背风的分离区区域也要比四坡屋面大，因而整个屋面的负压区的数值的绝对值都要比四坡屋面大。

在 30° 、 45° 和 60° 的斜风向角下，庑殿顶也表现出与四坡屋面不同的分布规律。在 30° 风向角下，庑殿顶的 A 面仍然全部呈现正压，正压最大值由 0° 风向角的 0.8 减小到 0.6，而在 B 面上从迎风角部到 B 面中央的三角翼状的区域依然还是呈现小正压 (0.2 左右)，但是在 AB 钱脊线的背风区域以及 AC 钱脊线和挑

檐接合的角部区域出现-0.4~-0.2 的负压带状区域。只有 C 面上同四坡屋面一样全部呈现负压，且绝对值最大的负平均风压都为-0.8，虽然屋面负压的分布略有不同。在 45°风向角下，由于屋面的椽脊线与来流风的风向角重合，气流沿着椽脊线的方向基本没有分离，所以四坡屋面在此风向角下 A、B 面上的分布呈对称分布，而庀殿顶的分布却不太对称，在 A 面上正压值一直减小，B 面上的正压却在增加，负压区被挤压到 AC 椽脊线边缘区域，但是 C 面上的负压区则变化都不大。在 60°风向角下，庀殿顶的 A 面和 B 面上的正的平均风压进一步减小，最大值只有 0.4，只是在挑檐、屋脊线和 AC 椽脊线边缘等区域存在负的平均风压，但是负压的绝对值都很小，也比四坡屋面的负压值（绝对值）要小；但是在同为负压区的 C 面上，尤其是在 AC 椽脊线的背风区域产生的绝对值最大的平均风压，四坡屋面要比庀殿顶要大 25%。

在 90°风向角下，四坡屋面和庀殿顶的分布趋势大体相当，其分布都是关于屋脊线对称分布的。在 B 面上四坡屋面只有中央区域是 0 左右的正压区，其余均为负压区，而庀殿顶则是整个 B 面上大部分区域都是呈现小于等于 0.4 的正压区，只是在屋面的椽脊线边缘产生了很小的负压；A、C 面上全部呈现负压，负压绝对值的最大值产生在椽脊线背风面的分离区，为-1.6，比四坡屋面的负压要大。

由图 2.21 和图 2.22 的描述可知，庀殿顶由于凹曲面的存在使得迎风面以正压为主。但是背风屋面同时产生的负压，在 0°和 90°风向角下庀殿顶的绝对值最大的负平均风压要比四坡屋面大，但是在斜风向角下（30°、45°、60°）却要比四坡屋面小。这说明庀殿顶对于 0°和 90°这样的风向角最为敏感，无论是产生的正的还是负的平均风压，都要大于四坡屋面，而对于斜风向角则差别不大，性能甚至优于四坡屋面。

2.6.2 脉动风压分布

四坡屋面和庀殿顶的脉动风压分布由于坡面的凹凸不同也呈现出不同的分布特性。图 2.23 和图 2.24 分别是两个模型在典型风向角下脉动风压分布图。

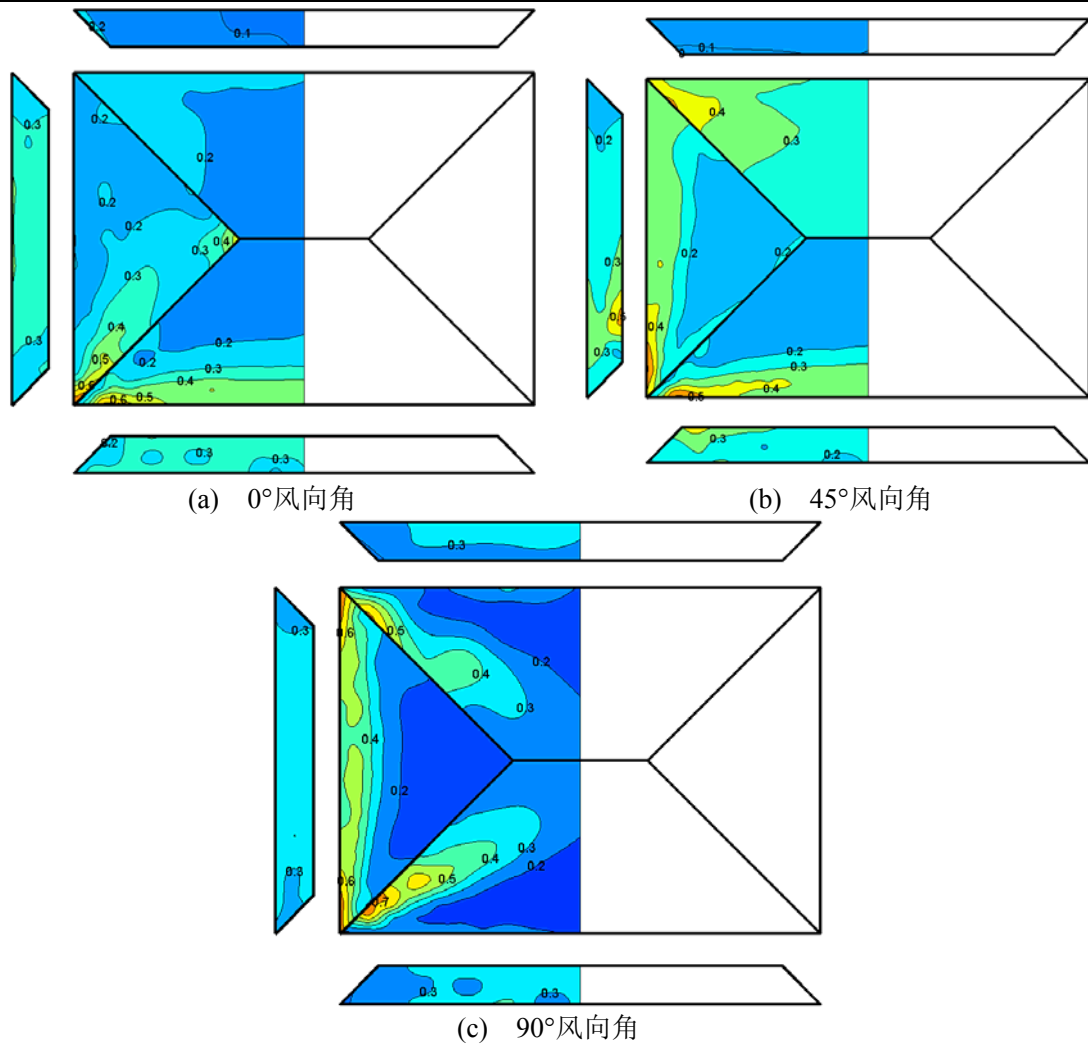


图 2.23 四坡屋面脉动风压分布图

图 2.23 是四坡屋面的脉动风压在三种典型风向角下的分布图。从 0° 风向角下的脉动风压分布图可以看出，脉动风压系数的分布在 A 面上是从 $0.6 \sim 0.2$ ，脉动风压密集的区域集中在戗脊和挑檐的角部区域，B 面的脉动风压等压线密集的区域也是屋脊和挑檐的角部区域，只有在 C 面上脉动风压值数值和变化值都很小。在 45° 风向角下，A 面和 B 面在角部部分的分布呈现的关于 AB 戗脊线的对称分布。但是越是靠近戗脊（或屋脊）线附近的区域，脉动风压越小，越是靠近各个坡面的挑檐边缘，脉动风压越大。屋面大部分区域的脉动风压在 $0.1 \sim 0.2$ 之间，产生较大脉动风压的区域依然还是在坡面的斜屋脊和挑檐的相交的角部区域数值也同 0° 风向角下的脉动风压一样，为 0.6 。但是在 45° 风向角下 C 面也在角部区域出现了较高的脉动风压。

脉动风压在 90° 风向角下的分布是关于屋脊线对称分布的。B 面的迎风挑檐边缘区域由于是气流的分离区产生了比较大的脉动风压值，在最边缘处产生的脉动最大值为 0.7 ，沿着来流风的风向脉动风压逐渐减小，最小在 $0.2 \sim 0.1$ 之

间；在戗脊线背后区域的 A、C 面上产生的泪滴状区域产生的最大脉动风压也为 0.9，其他区域顺着来流风的方向逐渐减小至 0.2 左右。

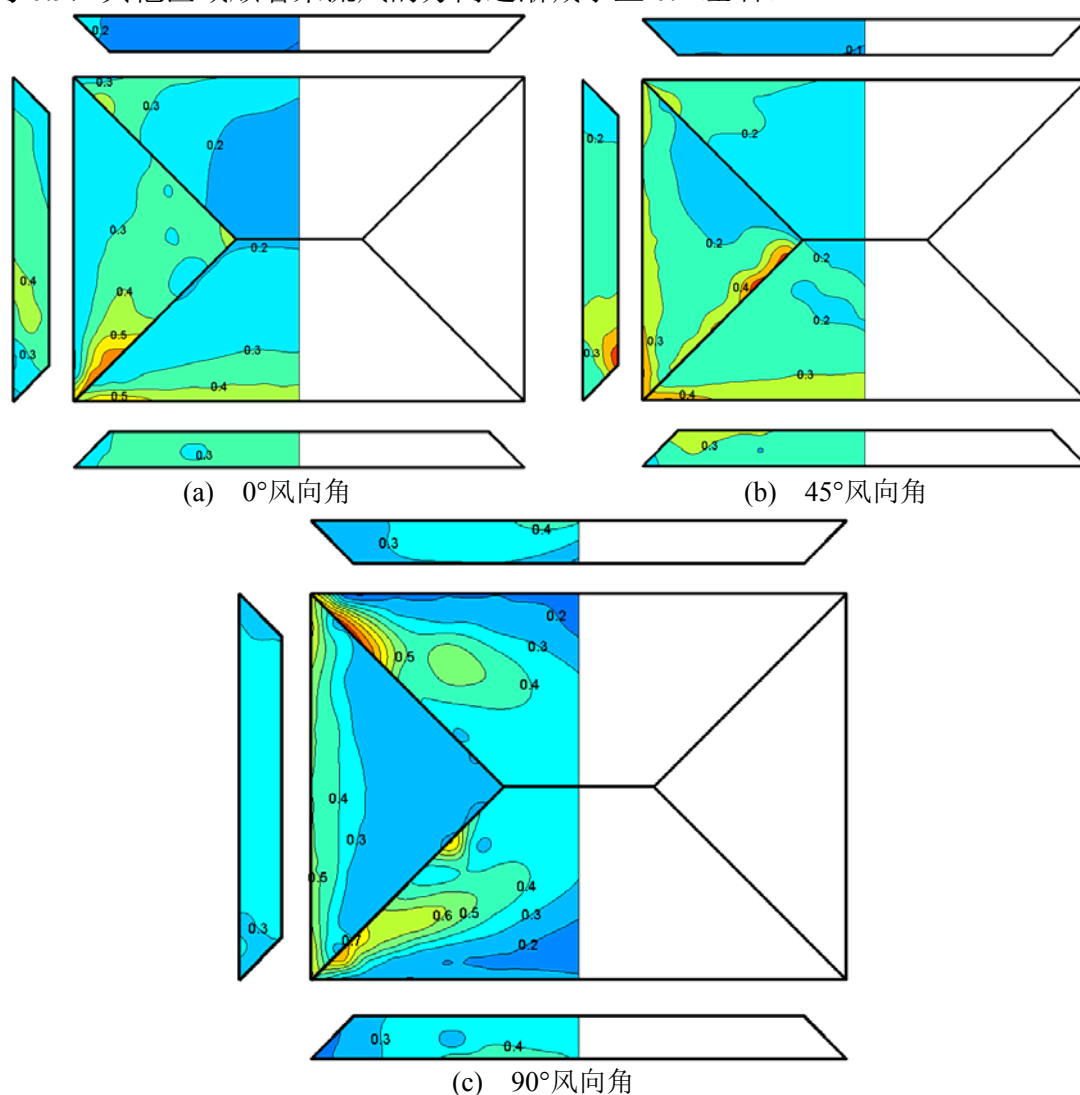


图 2.24 庑殿顶脉动风压图

图 2.24 是庑殿顶的脉动风压在三种典型风向角下的分布图。在 0° 风向角下，气流分离区在 A 面的挑檐边缘以及迎风戗脊背风区域，即 B 面的迎风角部区域，这两个面的脉动风压最大值都是 0.6，庑殿顶的脉动风压在 A、B 面上的分布同四坡屋面一样，在 C 面上庑殿顶却要比四坡屋面大。在 45° 风向角下，庑殿顶的脉动分压分布同四坡屋面显示出不同的分布规律。四坡屋面的脉动风压最大值出现在迎风面的角部区域，且都在迎风挑檐边缘，脉动值是 0.5，另一处区域是在戗脊线的背风面上（即 C 面戗脊线附近）；庑殿顶也是在迎风面的角部区域，且在迎风挑檐边缘出现脉动值为 0.4 的脉动值较大区域，但是另一处出现在迎风戗脊线的一侧区域（B 面上）其脉动风压最大值为 0.5。三个面其他区域的脉动风压分布比较平缓，大致都在 0.1~0.3 之间。 90° 风向角的脉动风压分

布关于屋脊线对称分布。庑殿顶出现脉动风压较大值的区域同四坡屋面基本一致，在 B 面的迎风挑檐边缘、以及 A、C 面上戗脊线附近的背风区域，且都靠近角部区域。不同的是四坡屋面在这三个区域都出现脉动风压最大值 0.7，而庑殿顶在迎风挑檐边缘的脉动风压最大为 0.6，而在戗脊线附近的背风区域出现脉动风压最大值 0.75。三个面的其他区域沿着来流风的风向脉动风压依次减小，最小至 0.1，而四坡屋面减小的剃度比较大，很快衰减至 0.2，庑殿顶却减小的比较缓慢，脉动风压的分布较为均匀。在 B 面上脉动风压最小为 0.3，在 A、C 面上出现的脉动值为 0.2 的区域面积较小。

从以上的分析可以看出：在各典型风向角下庑殿顶的脉动风压分布比四坡屋面更为均匀，梯度变化缓慢，局部脉动风压也比四坡屋面小。这种带有凹形弧度的坡面可以减小屋面的脉动风压。

2.6.3 典型测点风压的特征

四坡屋面是由四片两种形状的单片屋面组成的：一种是梯形屋面，另一种是三角形屋面。A 面是等腰梯形屋面，B 面是等腰三角形屋面。图 2.25 为典型测点示意图。图 2.26、图 2.27 分别是位于这两种屋面上的测点的平均风压系数和脉动风压系数随风向角的变化图。

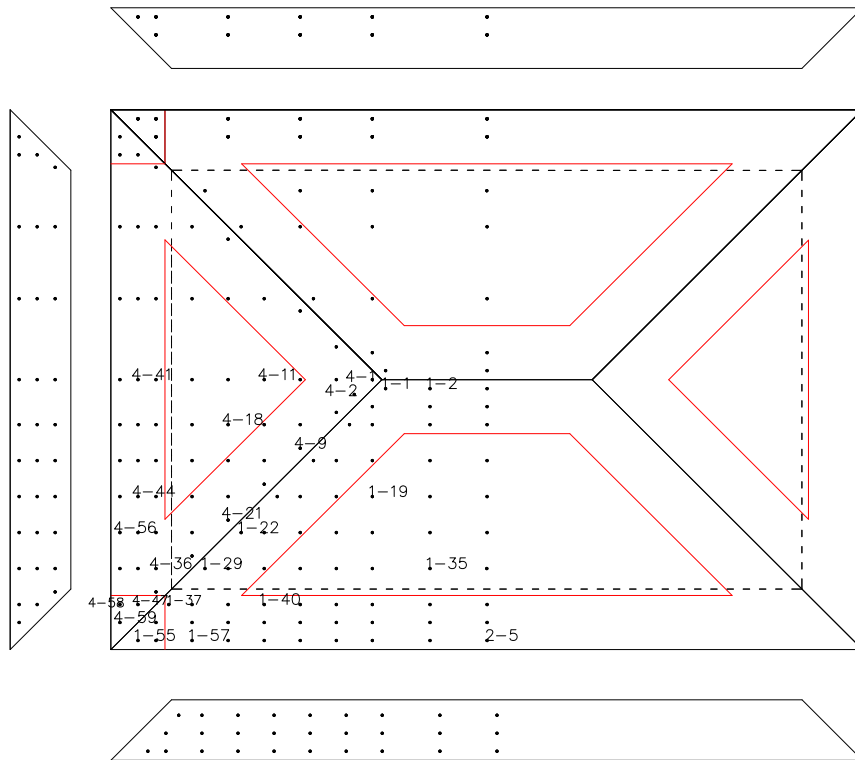


图 2.25 典型测点示意图

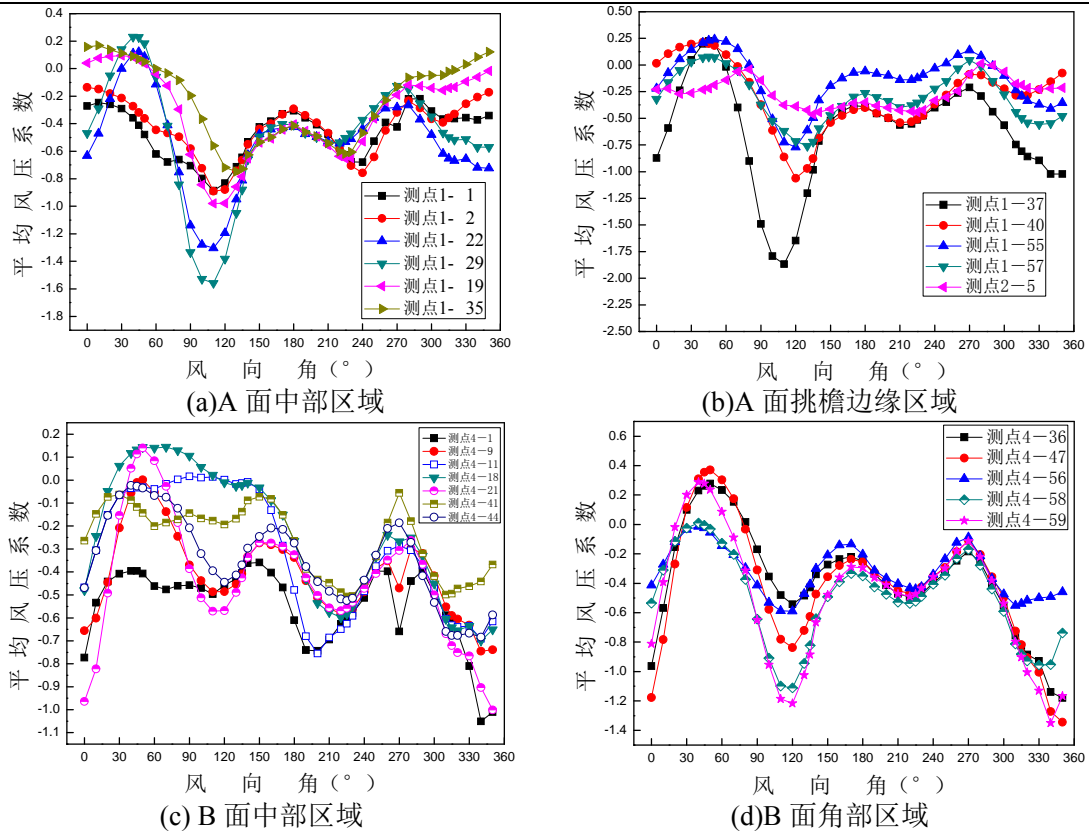


图 2.26 四坡屋面各区域典型测点平均风压系数随风向角变化图

图 2.26(a)图是 A 屋面中部区域的测点的平均风压系数随风向角变化图。测点 1-1、1-2 位于屋面中央区域靠近 A、C 面之间的屋脊线附近区域，测点 1-22、1-29 则是靠近 AB 侧脊线附近，测点 1-19、1-25 则是在屋面的中心区域。从图中可以看出位于 AB 侧脊线附近的区域的测点 1-22、1-29 的平均风压随风向角的变化曲线与其它测点不同，尤其是在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间。测点 1-19、1-35 由于位于 A 面的中央部位，在 0° 风向角时是很小的正压(0.04;0.16)，此后风压一直减小，减至负压，负压绝对值一直在增大，在 120° 时达到负压最大值，分别是 -0.98、-0.75。测点 1-1、1-2 由于靠近 AC 屋脊在 0° 风向角时绝对值较小的正压 (-0.27;-0.13)，之后负压值的绝对值一直增大，在 110° 时达到负压最大值，都是 -0.89。测点 1-22、1-29 在 0° 风向角时有一个绝对值较大的负压值 (-0.63;-0.47)，但是之后负压绝对值逐渐减小，在 45° 风向角时有一个正压值的最大值，分别是 0.12、0.23，之后正压值一直减小，风压变为负压，在 110° 时达到负压绝对值最大值，分别是 -1.3 和 -1.56。在 90° 风向角之后的屋面中部区域的测点随风向角变化的趋势大体一致。从图中可以得到 A 面中部区域的不同位置的测点虽然在不同风向角下达到一个正压的最大值，但是在数值上还是比较小的，但是在屋面上产生的负压则不同，尤其是在靠近侧脊附近区域的地方会产生绝对值较大的负平均风压系数，越是靠近屋面中央区域的地方的平

均风压无论是正压还是负压，其数值的绝对值变化都比较小，而且变化也比较平缓。

图 2.26(b)图中的测点虽然也属于 A 屋面，但是其下表面已经伸出前墙，形成挑檐。从图中各测点的各风向角下的平均风压的变化曲线可以看到挑檐区域的各个测点的变化趋势基本一致，与(a) 图中的测点 1-22、1-29 的变化趋势一样。差别主要是振幅的大小，以及波峰、波谷所对应的风向角。振幅最大即负压绝对值最大的是测点 1-37，负压最大值为-1.87，对应风向角为 110° 。其它测点虽然也在 120° 左右产生绝对值较大的负压值，但是与测点 1-37 相比都要小很多，其中变化最平缓的是位于屋面中线上的测点 2-5。

图 2.26(c)、(d)图均是 B 面的测点的平均风压系数随风向角变化图。(c)图中的测点 4-9、4-21 则是靠近 AB 铰脊线，测点 4-44 则是靠近挑檐，这三个测点的变化趋势一致，都是在 0° (或是 340° 左右) 出现一个绝对值较大的负压，随着风向角的变化，负压绝对值不断减小在 $45^\circ\sim 60^\circ$ 之间达到一个顶峰，但是在 120° 风向角时有出现低谷（负压脉冲），之后的一个变化周期的振幅没有第一个大。这些测点在 0° 和 180° 左右的风向角时容易出现绝对值较大的负的平均风压系数。测点 4-1 虽然位于 B 面的顶角处，但是它和位于屋面中线上的测点 4-11、4-41 以及在屋面的中央区域的测点 4-18 变化趋势一样。它们在 $30^\circ\sim 150^\circ$ 之间的平均风压系数几乎没有变化，其中测点 4-18 出现数值较小的正压，其它测点还是维持数值较小的负压状态。靠近两条铰脊线交汇的测点 4-1 和 4-9 在风向角 270° 时突然出现了负压的脉冲，与其它测点的变化截然相反，这可能是由于气流在形成了区域很小的分离区造成的。出现绝对值较大的负压的测点还是位于铰脊附近的区域。(d)图中所有测点都位于挑檐线和铰脊线相交的三角区域，它们的平均风压系数随风向角变化都一致。从振幅大小可以看出，测点 4-59 位于角部区域的最顶端，受屋面两条边缘线影响最大，风压振幅最大；靠近 AB 铰脊线的测点 4-36、4-47 次之，最小的是靠近挑檐边缘的测点 4-56、4-58。这个区域的测点在 0° 、 120° 左右的风向角比较敏感，容易出现绝对值较大的负的平均风压系数。例如测点 4-59 出现的绝对值最大的负压是-1.35，出现在 350° 。

综上，无论是在 A 面还是 B 面，各区域测点的平均风压系数在 $0\sim 360^\circ$ 下的变化规律随着所在位置不同而不同，但是即使出现正压值，数值都很小，这些测点往往位于屋面的中央位置，而且平均风压随风向角的变化都比较平缓，比较明显的出现在 B 面的中间区域，在一定风向角范围之间几乎没有变化。出现绝对值较大的都是负的平均风压系数，它们大都是位于两个坡面靠近铰脊线附近区域的测点，尤其是铰脊线和挑檐相交的三角区域。铰脊线对于屋面平均风

压的影响要大于挑檐。屋面上的测点出现绝对值较大的平均风压值大都在 0° 或是 120° 左右的风向角，说明四坡屋面这两个风向角比较敏感。这可能是由于屋面长宽比是 3:2 屋面对角线与挑檐夹角为 33.7° ，而 120° 的风向角恰恰是近似垂直于屋面对角线的方向。 0° 风向角则是垂直于屋面挑檐的方向。

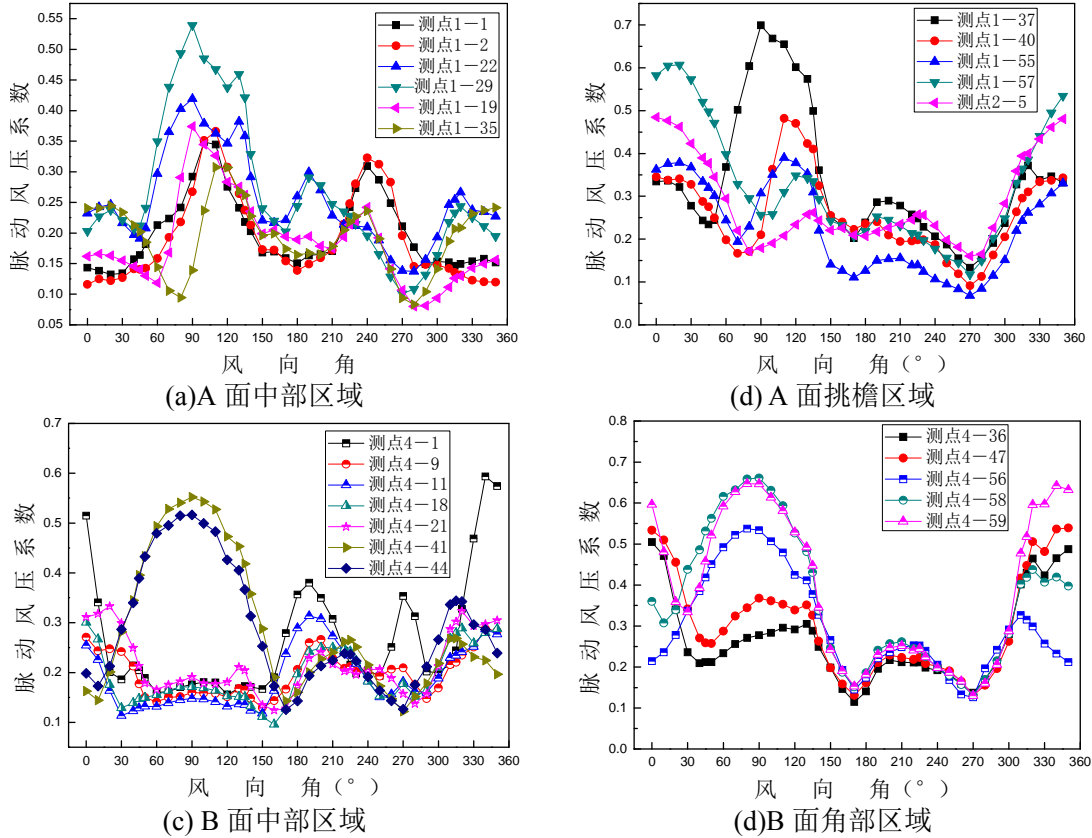


图 2.27 四坡屋面各区域典型测点脉动风压系数随风向角变化图

图 2.27 是 A、B 屋面中各个区域的典型测点的脉动风压随风向角变化图。除去靠近 A、C 面屋脊线区域的测点 1-1、1-2 之外，(a)图中屋面中部的其它测点的脉动风压随风向角变化的趋势基本一致。在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 风向角的变化中，这些测点（测点 1-22、1-29、1-19、1-35）的脉动风压系数是逐渐减小的，在 45° 风向角时，脉动风压系数达到最小，之后脉动风压系数便是一直攀升，在 90° 风向角时各测点达到脉动风压最大值，其中以靠近 AB 脊线附近的测点 1-29 的脉动风压最大，0.5。测点 1-1、1-2 由于靠近 AC 屋脊线，远离挑檐边缘，它们的脉动风压从 0° 到 110° 风向角是一直增加的，在 110° 风向角下的最大脉动风压系数分别是 0.34 和 0.37，仍然比测点 1-22 和 1-29 的最大脉动风压系数小。(b)图的测点位于挑檐区域。这些测点的脉动风压系数随风向角的变化趋势与(a)图中的测点 1-22、1-29、1-19、1-35 基本类似。但是由于(b)图中的测点挑檐边缘区域，气流分离的更加利害，所在区域测点产生的脉动风压就越大，因而在 0° 风向角下，越是靠近挑檐边缘的测点上面所产生的脉动风压就

越大,但是由于AB 椽脊线的存在,靠近椽脊线又在挑檐边缘的测点1-57达到的脉动风压值最大,为0.61,之后(b)图中测点的脉动值开始减小。测点1-37位于AB 椽脊线附近,它在45°脉动值达到最小,其它测点则是在风向角60°~90°之间才达到最小。但是1-37测点的脉动风压值却在90°风向角时达到了脉动风压的最大值,0.7,大于0°风向角时测点1-57产生的最大脉动风压值,也要大于在其他区域所有风向角下产生的脉动值都要大,这说明屋脊线(或椽脊线)对于气流的分离的剧烈程度要大于挑檐的气流分离。

(a)图和(b)图中产生的现象说明由于0°风向角下挑檐对来流风的分离,在屋面上方形成分离泡形式的分离区,直到AC 屋脊线附近才发生气流的再附。在45°风向角下,由于来流风的方向与AB 椽脊线方向一直,气流基本没有分离,屋面上所产生的脉动风压值都很小。90°风向角下AB、BC 椽脊线对于气流的分离作用,使得分离区的气流非高斯性增加,使得A面椽脊线附近出现了数值很大的脉动风压。270°左右的风向角下,(a)图和(b)图中所有测点都是脉动风压全部处于最小值,大部分脉动风压值要小于0.1,说明气流在此区域再附。

(c)、(d)图中的所有测点都位于B面上,(c)图中的测点是屋面中部区域的,(d)图中的测点位于AB 椽脊与挑檐相交的角部区域。在(c)图中位于挑檐边缘的测点4-41和测点4-44的脉动风压变化图与其他测点不同的变化曲线图不同。测点4-41和测点4-44在0°风向角之后脉动风压有短暂的有小幅的减小之后脉动风压值一直都在增加,在90°风向角时脉动达到最大值,分别是0.55和0.52。但是其它测点在0°风向角时的脉动风压都要比这两个测点大(尤其是测点4-1,在0°风向角下脉动值是0.51,340°风向角下它的脉动值为0.59,之后脉动值一直在减小,直到在30°左右的风向角时趋势才得到改变,在30°~150°之间,脉动值只有很小的增加变化,这与靠近挑檐边缘的两个测点的曲线图截然不同。位于挑檐边缘区域的测点的脉动风压最大值出现在90°风向角,而位于B面的其他测点出现风压脉动风压最大值则是在0°左右的风向角。(d)图中B面角部区域的测点的脉动风压的变化有两种规律存在,靠近AB 椽脊线的测点4-36、4-47它们的脉动风压最大值出现在0°(或是340°左右)的风向角;而靠近挑檐边缘的测点4-56、4-58的脉动风压最大值则是出现在90°左右的风向角;处于角部顶端的测点4-59则是在0°(或340°左右)的风向角和90°风向角时都出现了,数值几乎近似的脉动最大值:0°风向角时为0.596,90°风向角时为0.647;340°风向角时为0.642。从(c)、(d)两图中可以看出位于靠近挑檐区域的测点受挑檐边缘影响,会在90°左右的风向角时产生比较大的脉动风压,靠近椽脊区域的测点受椽脊线的影响比较大,会在0°左右(或是340°左右)的风向角产生脉动风压最大值,而位于屋面中央区域的测点还是受椽脊影响较大,会

在 0° 左右的风向角产生脉动风压最大值。同时受到戗脊线和挑檐的影响的屋面顶角的测点都会在 0° 左右 (或是 340° 左右) 的风向角和 90° 左右的风向角都会产生数值很大的脉动风压, 测点 4-1 也位于屋面的顶角, 但是它是同时受两条屋脊线的影响, 所以它会同屋面中央的测点一样在 0° 左右 (或是 340° 左右) 产生脉动风压最大分布值, 只是其数值要比屋面中央区域的其他测点大很多。

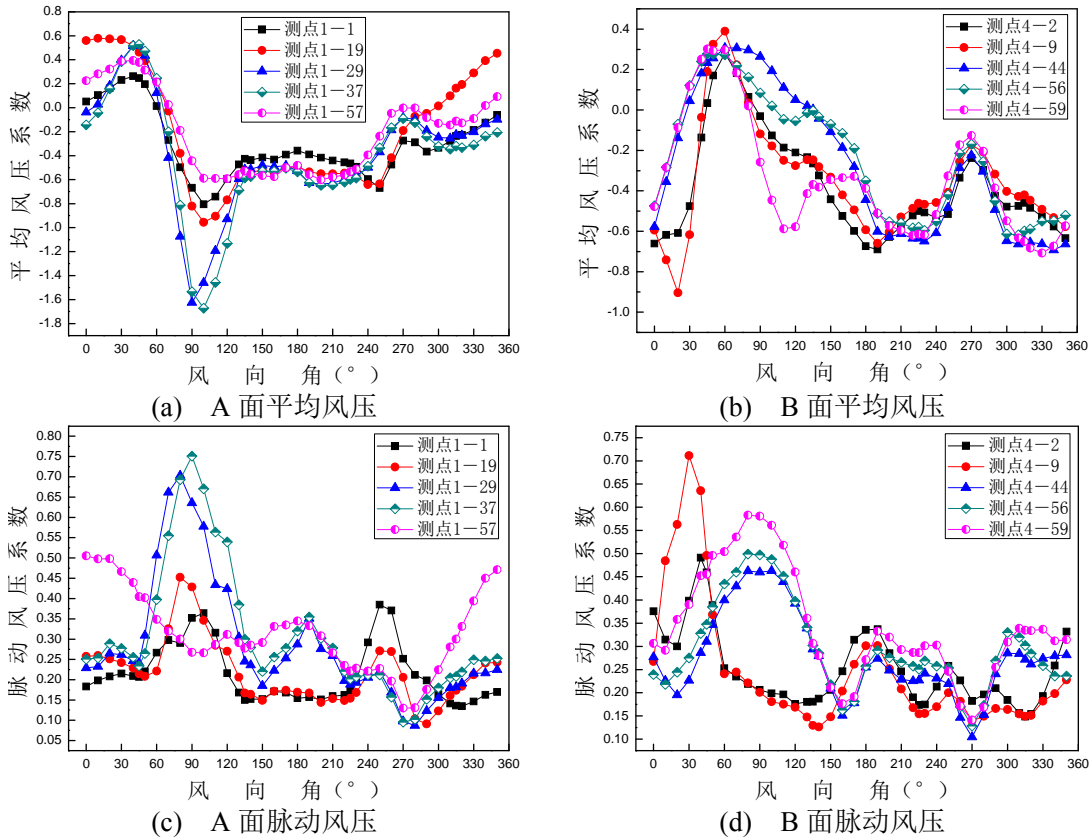


图 2.28 庑殿顶各区域典型测点风压系数随风向角变化图

图 2.28 中的(a)、(b)图是庑殿顶屋面的平均风压系数随风向角的变化图。(a)图是 A 面 (梯形屋面) 的平均风压变化图, 从图中可以看出屋面中央区域的测点的变化曲线与靠近屋脊、戗脊线以及挑檐边缘附近区域的测点的变化规律不同。中央区域测点 1-1 的平均风压的正压最大值出现在 $0^\circ (\pm 10^\circ)$ 左右, 其他区域的测点均出现在 $45^\circ (\pm 5^\circ)$, 而且 A 面上在所有风向角下的平均正风压的最大值也是出现在中央区域的测点, 中央区域的典型测点 1-19 的正平均风压最大值是 0.58。A 面各区域测点的平均负风压的最大值 (绝对值) 都是出现在 90° 风向角左右 (准确的是在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 风向角之间, 但是绝对值比较大的测点出现都集中在 90° 风向角附近), 负平均风压的最大值出现在戗脊线附近的测点 1-29 和 1-37 上, 其中以靠近角部的 1-37 出现的数值绝对值最大-1.62。挑檐边缘的测点 1-57 的正压或是负压的绝对值都很小。(b)图中的 B 面上的典型测点的平均风压随风向角的变化规律大致相同。正压的最大值都出现在 60° 风向角上, 其中正压

值最大的是位于铎脊线附近的测点 4-9，为 0.39。大多数测点的绝对值最大的平均负压出现在 0° 风向角（或是 $310^\circ\sim 340^\circ$ 之间），但是负平均压绝对值最大的测点仍然是 4-9，在 20° 风向角下的平均风压为 -0.9。

图 2.28(c)、(d)图是两种形状的屋面的脉动风压随风向角的变化图。(c)图中 A 面上挑檐附近区域的测点的脉动风压的变化与其它区域的测点的变化规律不同，挑檐附近的测点 1-57 的脉动风压系数最大值出现在 0° 风向角，为 0.5，而其他区域的测点的脉动风压系数最大值都出现在 $90^\circ (\pm 10^\circ)$ 风向角，其中以铎脊线附近且靠近角部的测点 1-37 的脉动风压值最大，是 0.75。B 面上的脉动风压的变化也呈现两种规律，靠近铎脊线附近的测点的脉动风压最大值出现在 30° 左右，其中以测点 4-9 的脉动风压值为最大，为 0.71。其他区域的测点的脉动风压最大均出现在 80° 风向角，其中以位于角部且靠近挑檐边缘的测点 4-59 的脉动风压值最大，是 0.58。A 面和 B 面上的脉动风压系数最大值都出现在铎脊线两侧的区域，两种坡面的挑檐边缘区域的测点即使位于角部区域，其脉动风压值的最大值也要小于铎脊线附近的测点。

庑殿顶屋面的平均风压的正压的最大值要小于负压的绝对值，屋面依然以负压为控制荷载。A 面上的平均风压无论是正压最大值还是负压的绝对值的最大值都要大于 B 面上的测点。正的平均风压较大值多集中在 A 面的中央区域。两个面挑檐附近的测点的平均风压的绝对值要小于铎脊线两测的测点。同样，脉动风压的最大值也是出现在铎脊线两侧的区域，挑檐边缘区域的测点要小一些。A 面上的脉动风压的最大值也要大于 B 面上的测点。这说明庑殿顶曲线的断面，使得挑檐的风压减小，出现数值较大的风压极值的区域多集中在铎脊线两侧区域。

2.6.4 湍流度的影响

在本次试验中选择了两个风场进行了模拟，B 类风场和 C 类风场，C 类风场的湍流度（22%）要大于 B 类风场（19%），下面对四坡屋面和庑殿顶分别在这两种风场下的平均风压系数和脉动风压系数的比较分析湍流度对屋面风压的影响。

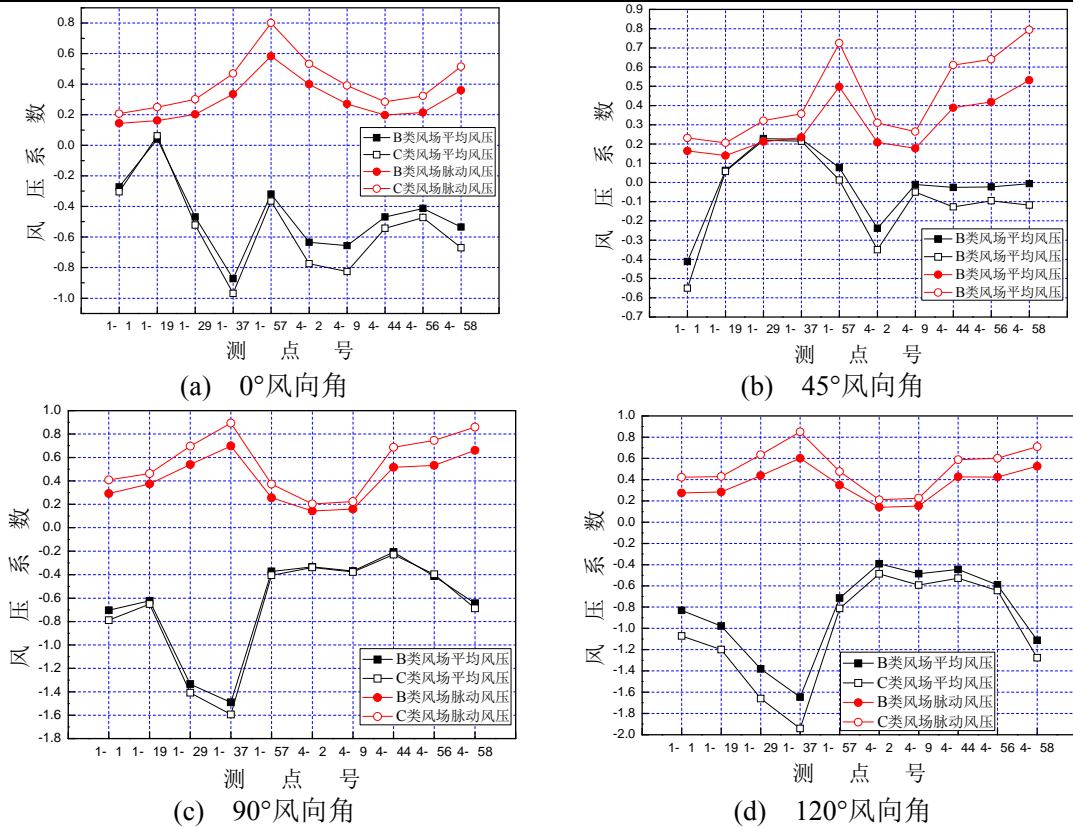


图 2.29 典型风向角下四坡屋面典型测点的风压系数在不同风场下的对比图

由于四坡屋面许多测点在 120°风向角时平均风压系数和脉动风压系数达到最大值，所以选择 0°、45°、90°和 120°四个典型风向角下屋面不同区域的典型测点的风压系数图，如图 2.29 所示。

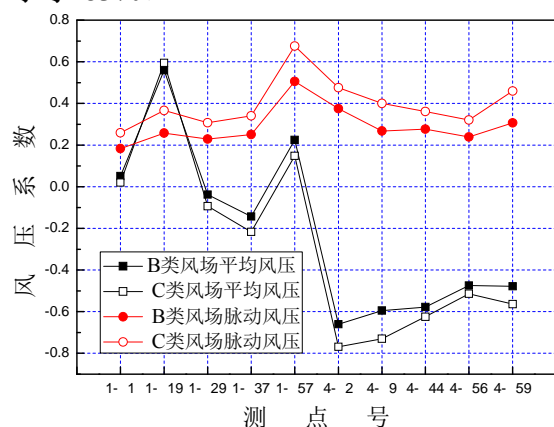
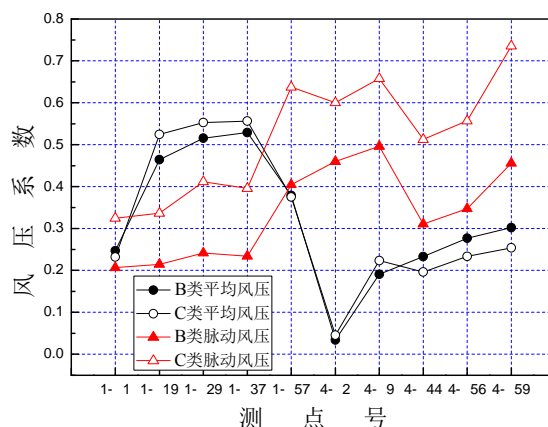
在 0°风向角下，湍流度增加，B 面上的平均风压的绝对值的增加要比 A 面上的明显，测点 4-9 增长最大为 26%，测点 4-2、4-58 的平均风压系数的绝对值也分别增加了 21%和 25%。但是整个屋面上的脉动风压系数增加明显要大得多，均在 33%以上，多集中在 40%~50%，增幅最大的测点是 1-57，脉动风压系数增加了 0.22，测点 1-19 的脉动风压系数则是增加了 54%。脉动风压系数的增加幅度几乎是平均风压系数的两倍。

45°风向角下的屋面的平均风压有正压也有负压，从图中可以看出，处于正压区的测点 C 类风场下的平均风压系数要小于 B 类风场的，尽管大部分测点的数值变化不大，变化均小于 1%，比较明显的是测点 1-57，竟然减小了 83%。平均风压系数为负压的测点的平均风压系数的绝对值则是增加的，最少增加了 33%，B 面上的几个测点都增加了 3~4 倍，（但这些测点的平均风压的绝对值都不大于 0.12）。湍流度的增加使得 45°风向角下的脉动风压都增长了 40%以上，位于椽脊线两侧以及挑檐边缘的测点的脉动风压都增长了 50%左右，增幅最大的是 B 面角部的测点 4-58，脉动系数增加了 0.26，A 面角部的测点 1-57 增加了

0.22, 测点 4-44 则是相对于 B 类风场的脉动风压系数增加的幅度最大的, 它增长了 57%。

由于四坡屋面很多测点的平均风压的绝对值达到最大多集中在 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 风向角之间, 选取这两个风向角也比较有代表性。在 90° 风向角时屋面各区域的平均负压都处于负压控制区, 屋面测点的平均风压的绝对值都随着湍流度的增加而增加, 但是增加的幅度很小均不超过 1%。屋面脉动风压的增幅则比较大, 测点 1-57 的脉动风压系数增加了 45%, 其余都集中在 30%~45%。 120° 风向角下的平均风压系数随湍流度的增加而增加, 但是增幅与 90° 风向角下的相比要大得多, 多数测点的平均风压增加了 20%以上, 最大的增加了 28%, 是测点 1-1。脉动风压的增长大都集中在 40%~53%, 增幅最大的同样也是测点 1-1, 是 53%。

从上面的分析数据可以看出, 湍流度的增加使得屋面在各个风向角下的脉动风压都有非常显著的增加, 增加都在 30%以上, 多数集中在 40%~50%, 最大的增幅是 57%, 是在 45° 风向角下。平均风压系数的变化则要复杂的多, 湍流度增加, 平均风压系数的绝对值有的增加, 有的会减小, 在多数区域多个风向角下平均风压的变化都不大, 无论是增加还是减小, 但是在个别风向角下的一些区域会出现比较大的变化, 在 0° 风向角下的迎风角部区域的测点、脊线两侧的测点, 增长 26%; 120° 风向角下的屋脊线角部区域的测点则增长了 28%; 45° 风向角有些特殊测点的平均风压系数变化的非常剧烈, 虽然在 C 类风场出现的平均风压系数都很小 (大约都 0.1 左右), 但都增加了 33%以上, B 面的很多测点比 B 类风场增长了 3 倍, 甚至更多。A 面的角部的测点 1-57 则是剧烈减小了 83%。

(a) 0° 风向角(b) 45° 风向角

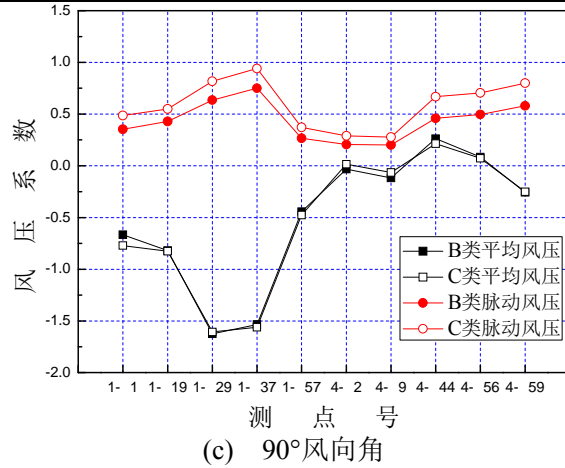


图 2.30 典型风向角下庑殿顶典型测点的风压系数在不同风场下的对比图

图 2.30 庑殿顶在典型风向角下典型测点的风压系数在不同风场下的对比图。从 0° 、 45° 和 90° 风向角的庑殿顶的各个区域的典型测点在 B、C 两种风场的平均风压和脉动风压的对比总的说来，湍流度对脉动风压的影响要大于平均风压，而对平均风压的影响不同风向角不同测点是不同的。

在 0° 风向角下，湍流度的增大对于屋面不同部位的测点的脉动风压影响大致相同，C 类风场下的脉动风压比 B 类风场的都增长 30%以上，三角形坡面（B 面）迎风角部的测点 4-59 增长最多，为 50%。对平均风压来说，大部分区域的测点基本没有变化或是变化不大，只有在三角形坡面（B 面）的钹脊线附近的测点 4-9 在 C 类风场的平均风压的绝对值比 B 类风场增加 23%。测点 1-1、1-57 在 C 类风场的平均风压的绝对值要比 B 风场的小，1-1 测点本身的平均风压系数的绝对值很小，都小于 0.1，它的变化可以忽略，但是测点 1-57 在 C 类风场下的平均风压比 B 类风场减小 34%，但同时其脉动风压增加 34%。

在 45° 风向角的图中可以明显地看到：在这个风向角下湍流度的增大使得屋面各个区域的脉动风压系数增大，大都集中在增加 55%~69%之间，梯形坡面（A 面）的钹脊线附近的测点 1-29 的脉动风压增幅最大为 71%，三角形坡面（B 面）的迎风角部测点 4-59 的脉动风压系数在 C 类风场比 B 类增加 0.28，是所有典型测点中增量最大的。湍流度增大，各区域测点的平均风压系数表现各不相同：屋面上的测点平均风压大都略有增大或是基本不变，增加最多的也只有 17%，在测点 4-9 上。但是在 B 面上测点 4-44、4-56、4-59 的平均风压在 C 类风场下反而比 B 类风场减少 16%（测点 1-1 的平均风压也有所减小，但是减小的数值很小，可以近似认为不变）。

在 90° 风向角下，湍流度的增大，屋面脉动风压系数的变化的增幅大体相当，大部分测点增加 30%~41%，B 面迎风挑檐边缘的测点 4-44 脉动风压增幅最大，为 45%。平均风压的变化非常小，增加稍微明显的是测点 1-1，脉动风压

增加 16%。

由此可知，湍流度对于脉动风压的影响较大，而且它的影响也与风向角有关，在 45° 风向角时影响最大；而对于平均风压的影响不如脉动风压那样显著，并且更加复杂，湍流度增加，有的区域的测点增加，有的基本不便，有些反而减小。

2.7 本章小结

本章通过一系列刚性模型表面压力测量风洞试验，分析了两种不同风场下的低矮建筑双坡屋面、平屋面以及四坡屋面系列的平均风压系数和脉动风压系数的分布特征，得到如下结论：

(1) 风向垂直于屋脊时，四种双坡屋面形式的迎风面上的平均风压除挑檐的边角处外均呈现为正压，而背风屋面呈现为负压；在风向平行于屋脊时，整个屋面全部呈现为负压；风向与屋檐斜交时，屋面除局部区域平均风压偶尔出现正值外，绝大部分表现为负压。

(2) 双坡屋面在屋脊及屋面边缘附近的平均风压系数绝对值要比屋面内部区域大一些。在针对屋面的结构设计中，屋面风压系数的取值应该分区域设计。

(3) 双坡屋面的脉动风压系数随湍流度增大而增大，一般在迎风屋檐附近比较大。对于不对称屋，当长屋面迎风时，在背风屋面产生的脉动风压系数较其它模型的小。

(4) 当风向垂直于屋脊时，三角挑檐屋面、硬山屋面以及悬山屋面的平均及脉动风压系数沿着屋面中线的变化趋势基本一致，仅不对称屋面与其他三种屋面差别较大，这说明屋檐形式的变化对于屋面整体的风荷载影响不大，但对于局部风荷载有一定的影响。

(5) 双坡屋面的挑檐形式的变化只会影响屋面的局部风压，对于屋面的整体风压则影响不大。在迎风挑檐处，在屋檐上表面的负压和下表面的正压的共同作用下，三角挑檐屋面要比硬山挑檐屋面在挑檐边缘部分更容易受到破坏，结构设计中应该引起重视。

(6) 平屋面系列中，女儿墙以及盃顶的附属结构的存在可以减小平屋面平均风压，但是挑檐的存在可以在局部增加屋面的平均风压。不同形式的附属结构所产生绝对值较大的负压所对应的风向角也是不同的，即比较敏感的风向角不同。长方体、出檐平屋面对斜风向 (45° 、 135° 、 225° 和 315°) 比较敏感。带女儿墙和平屋面和盃顶则是对正风向 (0° 、 90° 、 180° 和 270°) 比较敏感。

(7) 挑檐的存在增加了平屋面的脉动风压；女儿墙和盪顶等遮挡物的存在会减小屋面的脉动风压，但是相应地女儿墙本身墙体的脉动风压却会增加；盪顶这种既有伸出屋顶的挑檐部分又有高出屋面的墙体部分的特殊的屋面附属结构同样使得屋面的脉动风压减小，但是在盪顶的局部区域脉动风压会出现比较大的数值（不同风向角对应不同的部位）。

(8) 在 0° 风向角下，四坡屋面的分离区集中在了 A 面和 B 面之间的屋脊线附近，只有在这个区域出现绝对值比较大的高负压区，三个面中央区域的风压绝对值都比较小。在 90° 风向角下，来流风在 B 面的屋檐处进行分离，由于屋面坡度为 30° ，形成的分离区剃度变化比较平缓，而在两处斜屋脊处进行了二次分离，才形成了非高斯性较强的高负压区。

(9) 在斜风向角（ 30° 、 45° 和 60° ）下，四坡屋面的高负压区多集中在 A 面和 C 面的铎脊线以及 B 面 C 面的铎脊线附近的区域，尤其是在气流二次分离的 B 面 C 面的铎脊线两侧的区域。在 60° 风向角时，负压可以达到 -1.2 以上。

(10) 由于庑殿顶的四个坡面都是内凹形的曲面，前面的四坡屋面的坡面是直线形的。 0° 风向角下 A 面的平均风压全部为正压，越是在屋面的中央区域平均风压就越大，中心区域的正压达到 0.8，屋脊线附近和挑檐边缘的平均风压接近为 0，这与四坡屋面是不同的，四坡屋面在 A 面中央区域的正压数值要比庑殿顶小很多，整个屋面的负压区的数值的绝对值也要比四坡屋面大。 90° 风向角下庑殿顶则是整个 B 面上大部分区域都是呈现小于等于 0.4 的正压区，只是在屋面的铎脊线边缘产生了很小的负压；A、C 面上全部呈现负压，负压绝对值的最大值产生在铎脊线背风面的分离区，为 -1.6，比四坡屋面的负压要大。

(11) 庑殿顶由于凹曲面的存在使得迎风面以正压为主。但是背风屋面同时产生的负压，在 0° 和 90° 风向角下庑殿顶的绝对值最大的负平均风压要比四坡屋面大，但是在斜风向角下（ 30° 、 45° 、 60° ）却要比四坡屋面小。这说明庑殿顶对于 0° 和 90° 这样的风向角最为敏感，无论是产生的正的还是负的平均风压，都要大于四坡屋面，而对于斜风向角则差别不大，产生的平均风压的绝对值小于四坡屋面。

(12) 0° 风向角下迎风面的脉动风压密集的区域集中在屋脊线、铎脊线附近的区域和挑檐的角部区域，B 面的脉动风压等压线密集的区域也是屋脊和挑檐的角部区域，背风屋面上脉动风压值数值和变化值都很小。在 45° 风向角下，A 面和 B 面在角部部分的分布呈现的关于 AB 铎脊线的对称分布。但是越靠近越是铎脊（或屋脊）线附近的区域，脉动风压越小，越是靠近各个坡面的挑檐边缘，脉动风压越大。背风屋面的脉动风压则比 0° 风向角下有很大的增加。脉动风压在 90° 风向角下的分布是关于屋脊线对称分布的，在铎脊线背后区域的 A、C 面

上产生的泪滴状区域产生的最大脉动风压也为 0.9。

(13) 0° 风向角下, 庑殿顶的脉动风压分布同四坡屋面一样, 只是在背风屋面上脉动风压值要比四坡屋面大; 45° 风向角下, 庑殿顶同时在迎风面的角部区域和迎风铰脊线的一侧区域同时出现脉动风压较大等压线密集的区域; 90° 风向角的脉动风压分布关于屋脊线对称分布。庑殿顶出现脉动风压较大值的区域同四坡屋面基本一致, 不同的是四坡屋面在这三个区域都出现脉动风压最大值 0.7, 而庑殿顶在迎风挑檐边缘的脉动风压最大为 0.6, 而在铰脊线附近的背风区域出现脉动风压最大值 0.75。

(14) 四坡屋面许多测点在 120° 风向角时平均风压系数和脉动风压系数达到最大值。湍流度的增加使得四坡屋面在各个风向角下的湍流度都有非常显著的增加, 增加都在 30% 以上, 多数集中在 40%~50%, 最大的增幅是 57%, 是在 45° 风向角下。平均分压系数的变化则要复杂的多, 湍流度增加, 平均风压系数的绝对值有的增加, 有的会减小, 在多数区域多个风向角下平均风压的变化都不大, 无论是增加还是减小, 但是在个别风向角下的一些区域会出现比较大的变化。庑殿顶中湍流度对脉动风压的影响要大于平均风压, 而且它的影响也与风向角有关, 在 45° 风向角时影响最大; 而对平均风压的影响并不显著, 不同风向角不同测点是不同的。

(16) 在四坡屋面中无论是 A 面 (梯形迎风屋面) 还是 B 面 (三角形屋面), 各区域测点即使出现正的平均风压, 数值都很小, 且随着风向角的变化都比较平缓, 出现绝对值较大的平均风压都是负压, 它们大都位于两个坡面靠近铰脊线附近的区域, 尤其是铰脊线与挑檐相交的角部区域。铰脊线对于屋面平均风压的影响要大于挑檐。屋面上出现绝对值最大的平均风压大都在 ($340^\circ \sim 0^\circ$) 或 ($90^\circ \sim 120^\circ$) 这两个风向角区域。四坡屋面的脉动风压的较大值出现在挑檐边缘区域和铰脊线及屋脊线的边缘区域, 屋面上出现脉动风压数值最大的测点位于挑檐和铰脊线相交的角部区域, 出现的风向角也多集中在 ($340^\circ \sim 0^\circ$) 或 ($90^\circ \sim 120^\circ$) 这两个风向角区域。但是由于屋面铰脊线的存在存在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的斜风向角会出现脉动风压降低的趋势, 这是与双坡屋面不同的地方。

(17) 庑殿顶则是在 0° 风向角下在 A 面 (梯形迎风屋面) 的中央区域产生较大的正的平均风压, 在 90° 风向角时产生绝对值最大的负的平均风压, 负平均风压的绝对值要大于正平均风压。在 B 面 (三角形屋面) 则是所有风向角下均产生负的平均风压, 绝对值较大的负压出现在 90° 左右的风向角下的铰脊线相交的角部区域。庑殿顶整个屋面依然以负压为控制荷载。A 面上的平均风压无论是正压最大值还是负压的绝对值的最大值都要大于 B 面上的测点。两个面挑檐附近的测点的平均风压的绝对值要小于铰脊线两测的测点。同样, 脉动风

压的最大值也是出现在戗脊线两侧的区域，挑檐边缘区域的测点要小一些。A 面上的脉动风压的最大值也要大于 B 面上的测点。这说明庑殿顶曲线的断面，使得挑檐的风压减小，出现数值较大的风压极值的区域多集中在戗脊线两侧区域。

第3章 山墙风压分布规律以及山墙形式对屋面风压分布的影响

3.1 引言

经常遭受台风袭击的中国东南部以及南方沿海地区是人口比较稠密的区域，在历史上由于深受徽派建筑的影响加上防火的需要，山墙往往要高出屋顶。最具有代表性的山墙形式莫过于马头墙了，其他比较常见的还有三角形的山墙以及圆弧形山墙（圆弧在顶部比较平缓的也俗称观音兜），如图 3.1 所示。

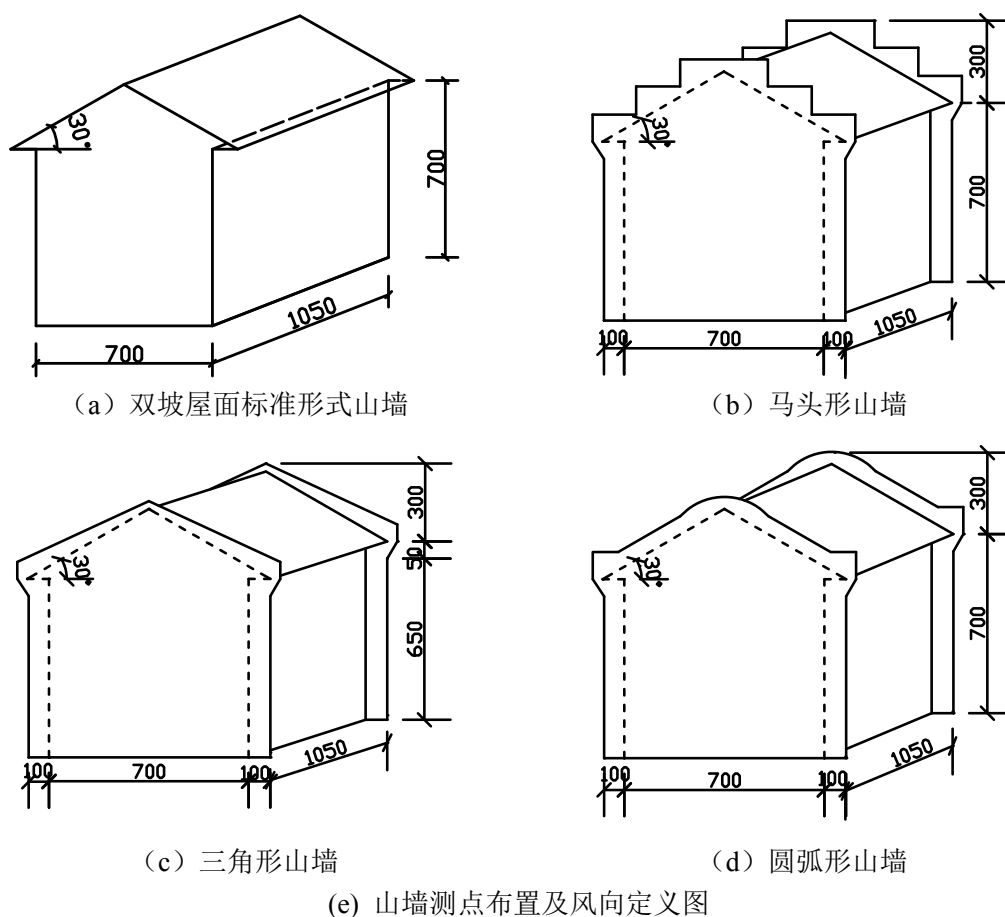


图 3.1 四种类型的山墙

本章研究的内容是山墙表面的风压分布特征以及山墙的形式对屋面风压分布的影响。为了描述的方便，这里将 0° 风向角时山墙的迎风边缘在其它风向时也称为迎风边缘，另一侧则始终称为背风边缘，如图 3.2 所示。这三种带有特色山墙的双坡屋面的模型在山墙布置了大量测点，但是由于试验中扫描阀数量有限而且双坡屋面左右对称，因此只在屋面的一半区域上布置了测点，得到的风压分

布图均只显示一半。

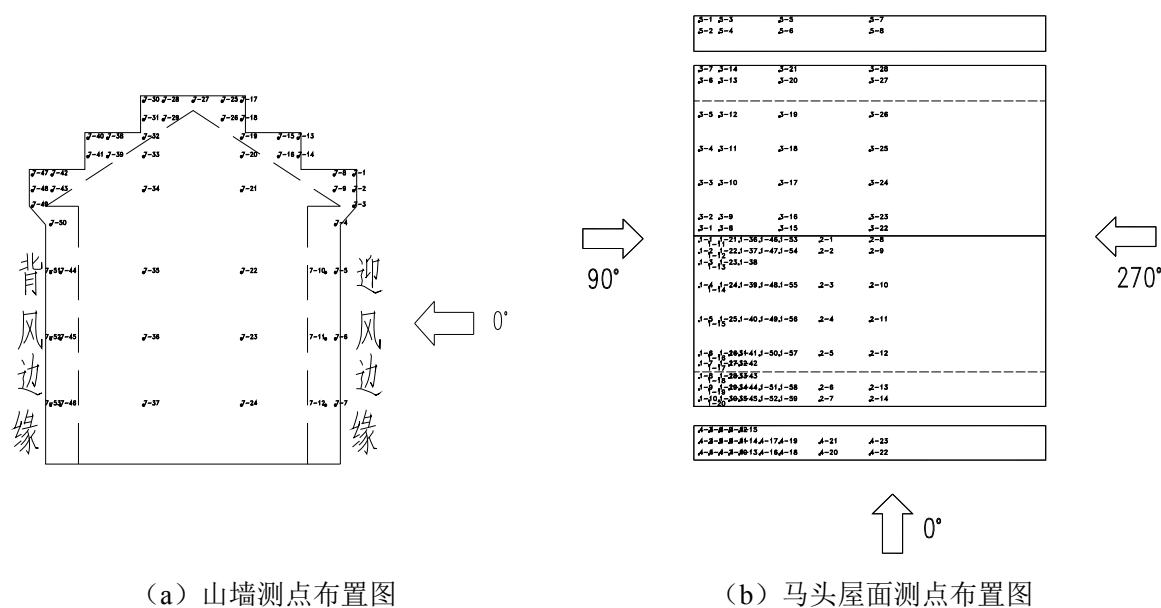
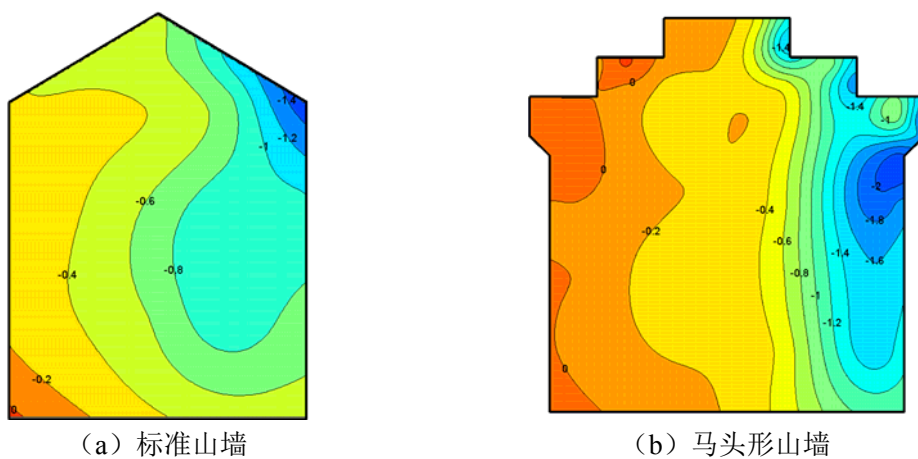
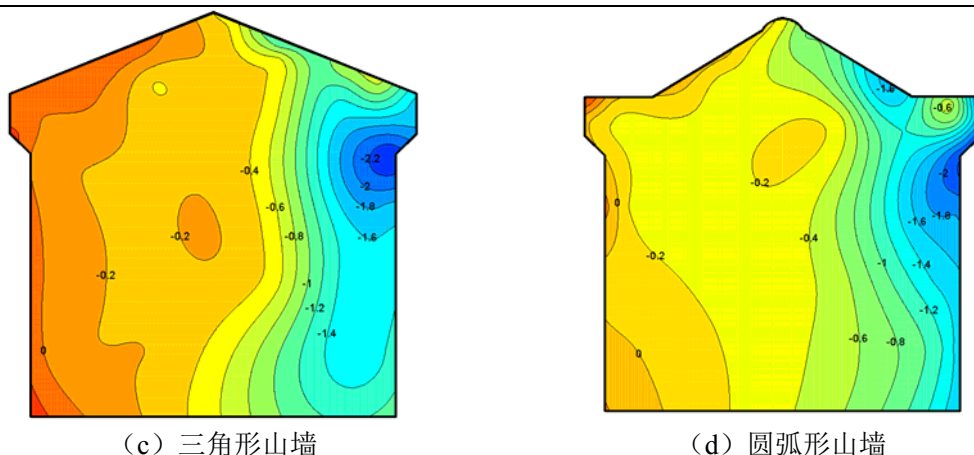


图 3.2 带有特色山墙的双坡屋面模型测点布置图

3.2 山墙表面的风压分布特性

3.2.1 平均风压分布





(c) 三角形山墙

(d) 圆弧形山墙

图 3.3 四种山墙在 B 类风场 0° 风向角下的平均风压分布图

图 3.3 给出的是四种山墙形式的平均风压的分布图，这四种模型屋面坡度、形式以及长宽比、高宽比完全一致，只是山墙的形式不同。从图中可以看出在 0° 风向角下，山墙表面基本上处于负压控制。标准山墙在前墙与屋面迎风面边缘的角部出现绝对值最大的平均风压系数，其他三种山墙由于在屋檐高度处迎风边缘形状发生突变，这个角部区域的平均风压的绝对值为墙面最大值。背风边缘以及山墙底部的负压的绝对值都比较小。风压系数趋近于 0。三种典型山墙从高度上（从底部向上）看在迎风边缘上第一个突变处产生绝对值较大的负压，但是会在第三个突变处的台阶处产生一个绝对值相对周围测点比较小的负压，三角形山墙再向上没有其他突变点，没有出现突变的泡状的负压区，圆弧形山墙向上又有一处突变处，便出现了一个绝对值较大的泡状的负压区，而最明显的是马头形山墙，由于有三个阶梯状的突变，所以产生了三个泡状的负压区。这是由于来流风在墙体迎风边缘产生分离，由于墙体的形状产生多个分离点，泡状负压区的产生源于在突变尖点产生多个分离泡所致。

0° 风向角下的山墙平均风压分布图中那个可以看到标准山墙的绝对值最大的负的平均风压系数为 -1.4，马头形山墙的是 -2，三角形山墙和圆弧形山墙均为 -2.4，但是三角形山墙的 -2.4 的等压线所围的区域要大于圆弧形山墙。这说明三角形山墙所受到的吸力作用是这四种山墙中最大的。

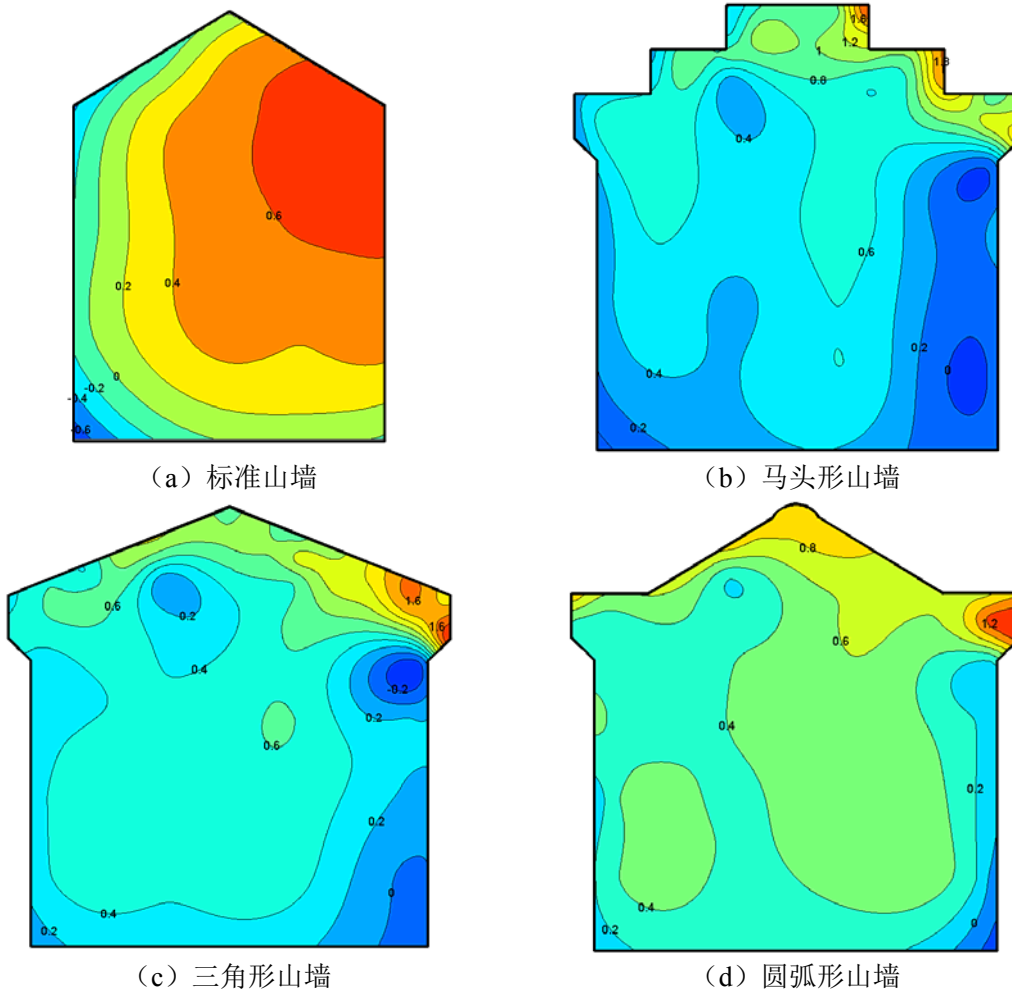
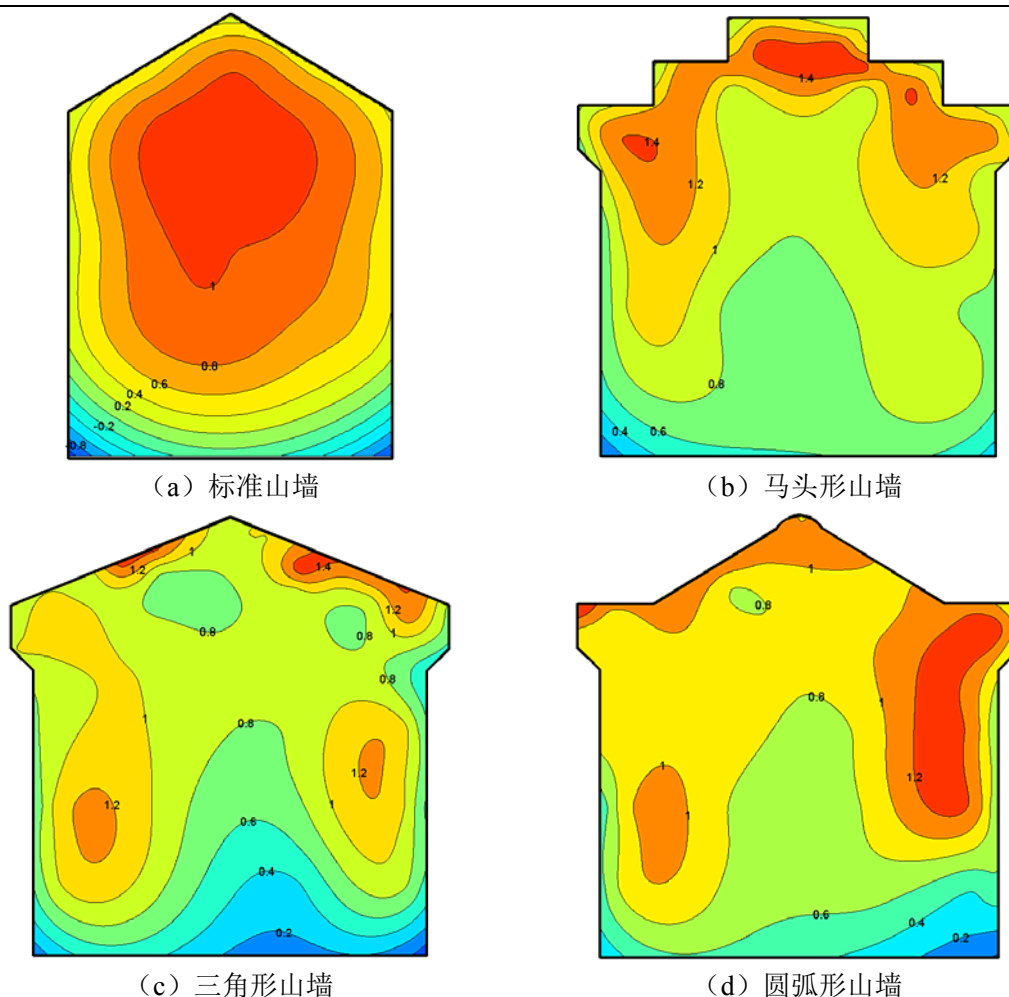


图 3.4 四种山墙在 B 类风场 45° 风向角下的平均风压分布图

图 3.4 是山墙表面在 B 类风场 45° 风向角下的平均风压分布图，由于马头形山墙、三角形山墙和圆弧形山墙有一部分边缘区域分别高出屋面、伸出前墙和后墙，因而墙体的边缘部分两个表面都受风压同时作用，计算时采用的净风压。从 0° 风向角的平均风压分布到 45° 的风压分布图可以看到随着风向角的变化，墙面的迎风边缘开始出现正的平均风压系数，负的风压系数的区域不断缩小。标准山墙的正压区域出现在屋面前墙的角部区域，三角形山墙和圆弧形山墙在墙体第二处以及第三处突变处出现较大的正的平均风压系数，马头形山墙数值较大的正压区域则是出现在每一个阶梯的突变处。标准山墙的正压最大值为 0.6，其他三种山墙的平均风压最大值均大于 1，尤其以马头形山墙的最大，达到 1.8，三角形山墙次之，为 1.6，圆弧形山墙的最小，也要达到 1.2。在 45° 风向角下这三种形式的山墙表面测点的平均风压系数的最大值都要比标准山墙的大 2 倍多。

图 3.5 四种山墙在 B 类风场 90° 风向角下的平均风压分布图

B 类风场 90° 风向角下的山墙的平均风压分布图如图 3.5 所示。在 90° 风向角下，来流风正面吹向山墙。标准山墙整个表面都是正压，中间区域为风压系数为 1，向四周边缘和山墙底部正压依次减小，在底部减小到 0。其他三种山墙整个墙面也都是正压控制，但是他们的平均风压分布与标准山墙相比呈现了很大的不同。马头形山墙和三角形山墙出现的最大平均风压系数都是 1.4，圆弧形山墙最大则为 1.2。马头形山墙在阶梯型的山墙顶部出现了正平均风压系数最大的区域，三角形山墙则是在山墙顶部和左侧边缘附近区域同时出现，圆弧形山墙只在两侧边缘区域出现。但是这三种山墙在墙面底部风压还是逐渐衰减到 0。

从 90° 风向角的平均风压分布图可以很明显的看到，山墙在顶部和两侧边缘的形状上的改变，不仅增加了墙面的局部风压，还改变了墙面的平均风压的分布特征，比较大的风压区域从屋面中部迁移到延伸出屋顶和前后墙的山墙顶部和两侧的边缘部分。

3.2.2 脉动风压分布

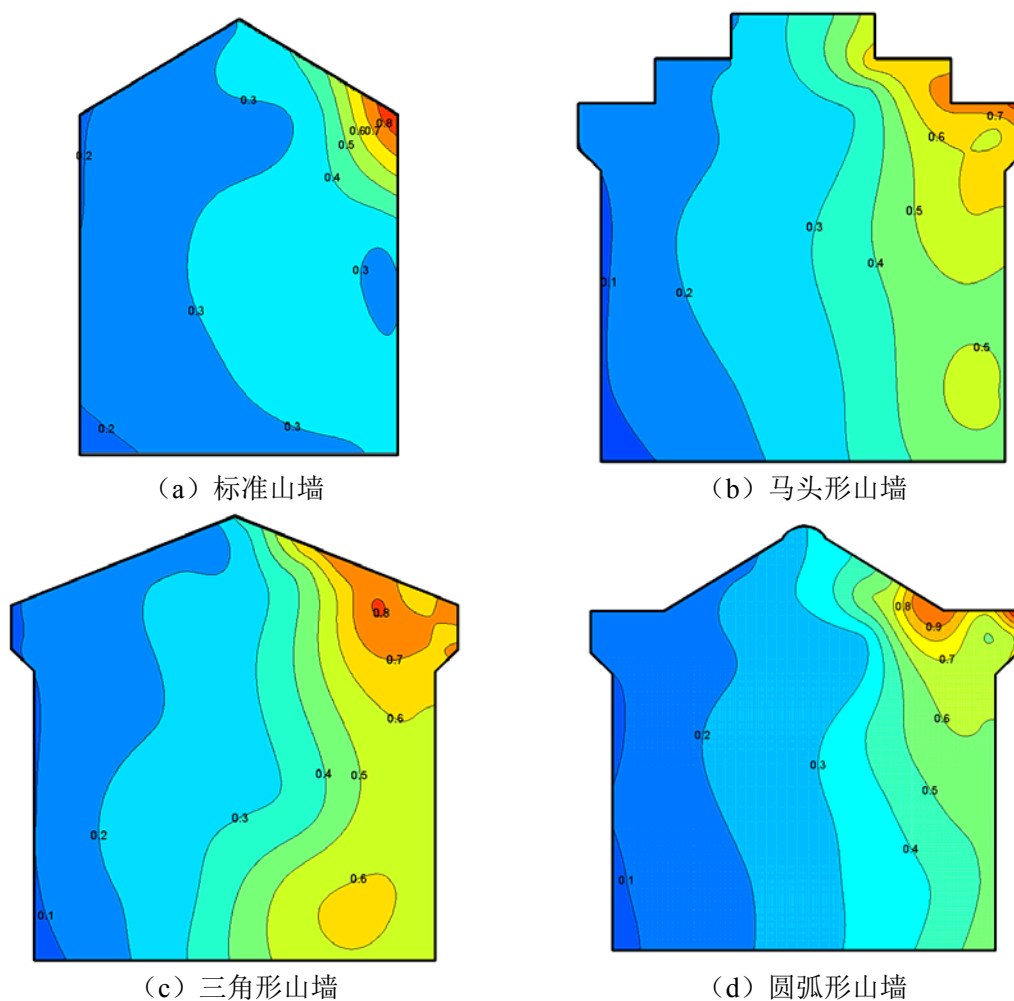


图 3.6 B 类风场 0° 风向角下四种山墙的脉动风压系数分布图

脉动风压系数分布图可以显示风向角、来流风的湍流度和墙面面测点位置对脉动风压系数有较大影响。图 3.6、是四种山墙的脉动风压分布图。在 B 类风场的 0° 风向角下，标准山墙的脉动风压系数的最大值在 0.8~0.9 之间，出现在墙面的屋面边缘与前墙的角部区域，与标准山墙在相同工况下的平均风压系数的绝对值最大的区域基本重合，这意味着标准山墙在这个区域会产生最不利荷载。马头形山墙的脉动风压系数的最大值要小一些在 0.45~0.5 之间，三角形山墙在 0.5~0.6 之间，圆弧形山墙则是在 0.9~1 之间。这三种山墙产生的脉动风压系数最大值的区域在墙面顶部的迎风边缘。迎风边缘的形状改变会减小墙面的脉动风压系数，改变的拐点越多脉动风压系数减小的也就越多。

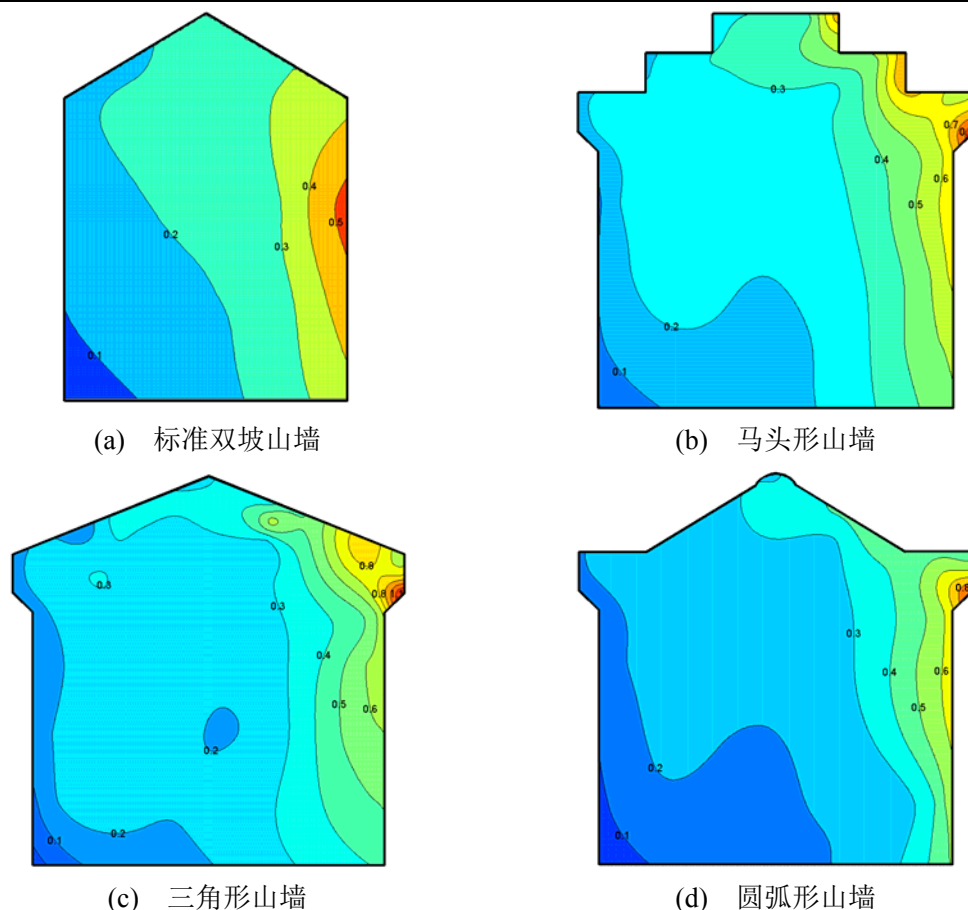


图 3.7 B 类风场 45° 风向角下四种山墙的脉动风压系数分布图

在 45° 风向角下（见图 3.7），脉动风压的分布比较泾渭分明，在墙面的迎风边缘脉动风压高而且等压线密集，其它地方的脉动风压则很小。这一点在三种典型山墙的体现比标准双坡山墙更加明显。在此风向角下三种山墙上脉动风压的最大值都要比标准双坡山墙的脉动风压最大值大。标准双坡山墙的脉动风压最大值是 0.5，马头形山墙和圆弧形山墙最大值是 0.9，三角形山墙的脉动最大值为 1.2。

在 90° 风向角下（见图 3.8），来流风的方向垂直于山墙表面，四种形式的山墙产生的脉动风压系数都不大。标准双坡山墙几乎一般的区域的脉动风压为 0.3 左右，其他三种形式的山墙产生的最大脉动风压为 0.4，产生的区域几乎都位于山墙顶部边缘的形状突变区域，比较对称。马头形山墙等三种特色山墙大部分的区域的脉动风压均处于 0.4~0.3 之间。这说明在 90° 风向角下，山墙表面的中央及底部区域的脉动风压受山墙形式的影响不大，但是在形状改变明显的山墙顶部区域的局部脉动风压则增加，山墙顶部边缘改变的拐点越多，受其影响脉动风压增加的区域也越多。

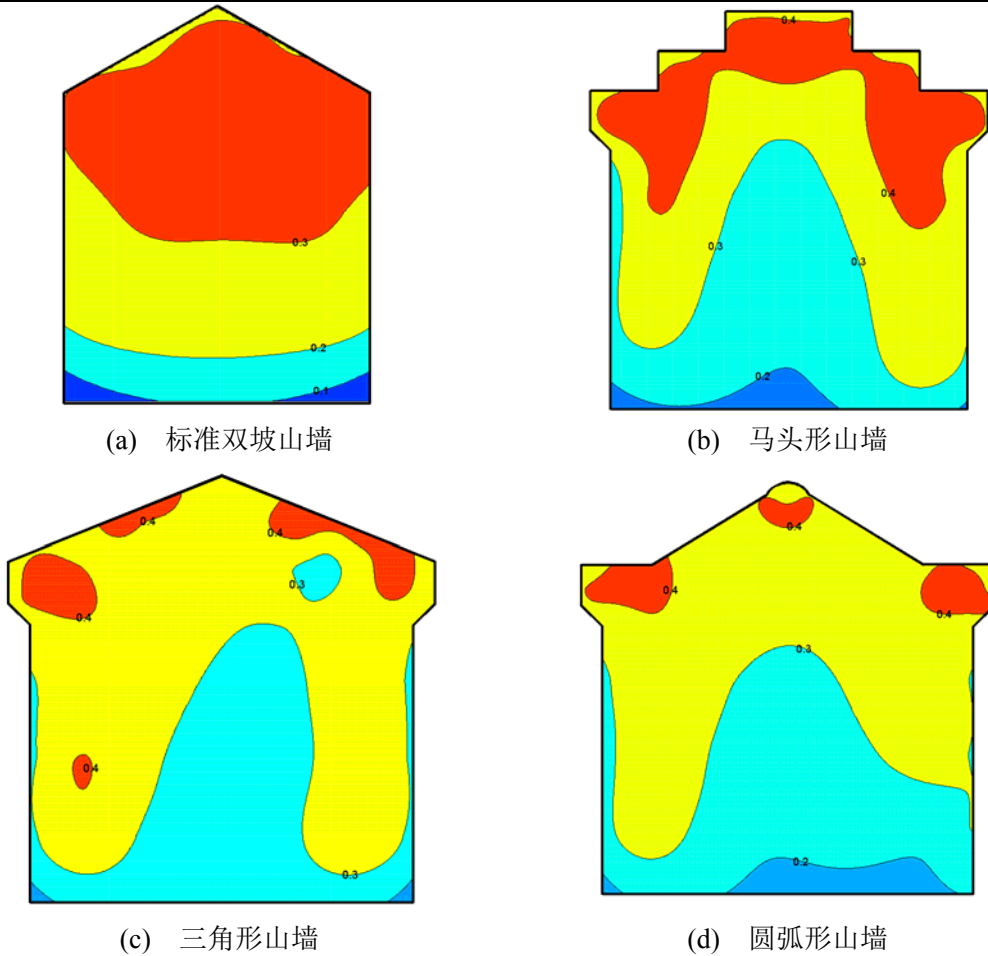
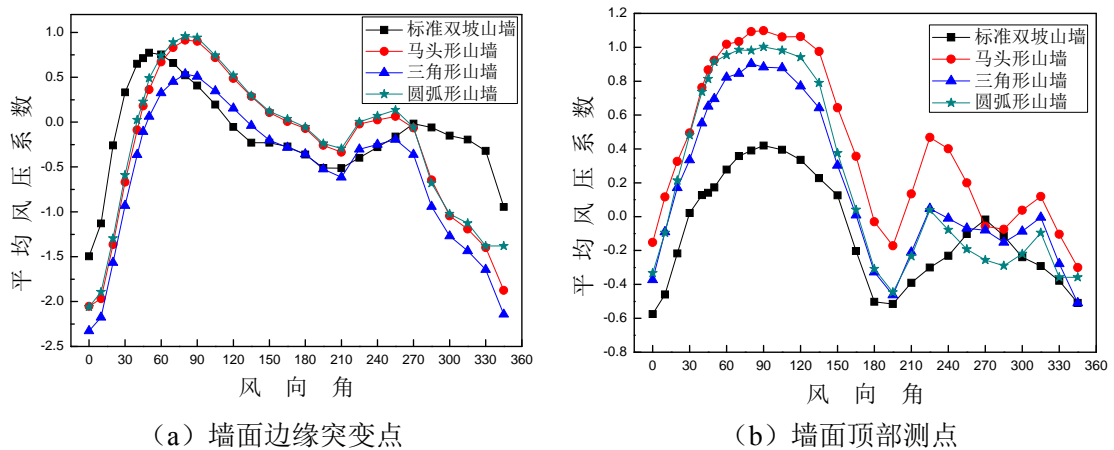


图 3.8 B 类风场 90°风向角下四种山墙的脉动风压系数分布图

3.2.3 风向角对山墙表面风压的影响

不同的风向角下，由于来流风的分离的位置不同，出现平均风压最大值的区域，不同区域的测点往往是不同的。下面通过山墙表面各个区域的测点随风向角变化的曲线图，来寻求各区域的最敏感风向角。



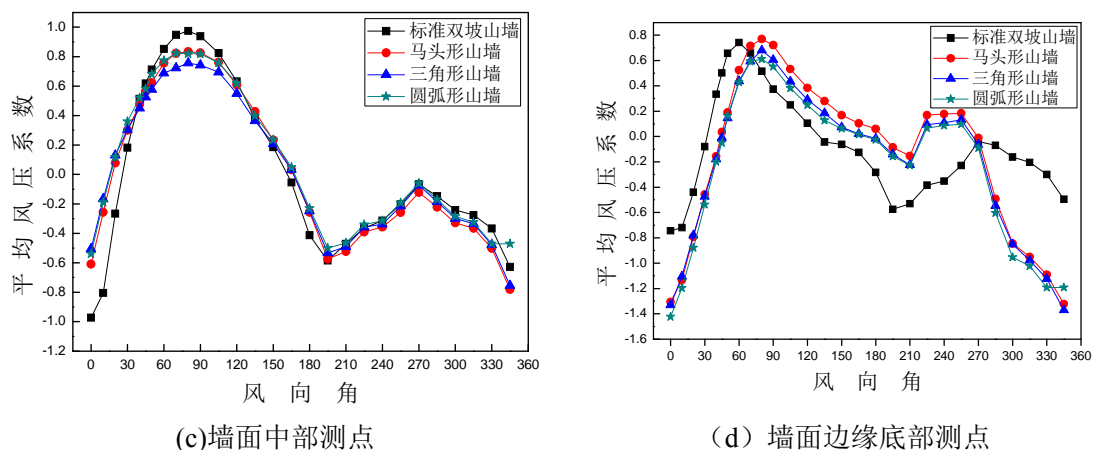


图 3.9 墙面典型测点平均风压系数随风向角变化图

在 B 类风场下，四种山墙墙面上位于四个区域内的典型测点的平均风压系数随风向角的变化曲线图如图 3.9 所示。(a)图中的测点是墙面边缘上突变点，标准双坡墙面表现在山墙与屋檐交界点，在其他三种山墙则表现在山墙边缘的第一个突变点（从下向上）。这个位置的测点都是在 0° 风向角时出现绝对值最大的平均风压系数，即吸力最大值。在这四种山墙中在这个区域产生吸力最大的是三角形山墙，为 -2.33；马头形山墙和圆弧形山墙次之，分别为 -2.05 和 -2.06；标准双坡山墙吸力最小为 -1.49。这个区域的测点的正的平均风压系数的最大值都不是出现在 90° ，标准双坡山墙是 0.75 出现在 60° 的风向角；其他三种山墙均出现在 80° 风向角，马头形山墙是 0.92，三角形山墙是 0.53，圆弧形山墙 0.96。这三种典型山墙形式使得墙面角部区域的负平均风压系数的绝对值增大，其中以三角形山墙增幅最大增大了 56%。马头形山墙和圆弧形山墙这两种形式同时也增加了墙面突变点角部平均风压的最大值，但是三角形山墙在此处的平均风压要比标准双坡墙面小 30%。

四种山墙在墙面顶部区域的测点的平均风压随风向变化图如图(b)所示。图中可以看到在这个区域产生的正压的最大值要大于负压绝对值的最大值。四种形式的山墙顶部区域测点在 $80^\circ \sim 105^\circ$ 风向角范围内出现正平均风压系数最大值，标准双坡山墙的最小，是 0.39；三角形山墙次之，为 0.9；再就是圆弧形山墙为 1；最大的是马头形山墙是 1.1。在顶部区域，马头形山墙等三种典型山墙的正压是标准双坡墙面的 1.3 倍以上，最大的可达到 1.8 倍。这说明典型山墙的形式增大了山墙顶部区域的正压，尤其是马头形山墙。这种区域的测点的吸力分别在 0° 、 195° 和 345° 达到一个相对较大的数值，四种山墙形式都有这种规律，山墙顶部位置对于这三个方向角比较敏感。

(c)图显示的是位于墙面中部区域的测点，从图中可以看出这四种形式的山墙在这个区域的平均风压所受山墙形式的影响最小。四种山墙平均风压系数随

风向角变化的曲线几乎都是重合的，但是同标准双坡山墙相比，其他三种山墙的负平均风压系数的绝对值最大值和正风压系数的最大值都有所减小，分别平均减小 43%和 17%，尤其以三角形山墙的中部测点减小最多，减小了 48%，图中在 0° 风向角和 90° 风向角可以明显看出。

(d)图中墙面边缘底部测点的平均风压系数随风向角的变化曲线，标准双坡墙面同其他三种山墙的变化趋势不太一致。出现负平均风压系数绝对值最大的风向角，标准双坡山墙和圆弧形山墙是在 0° ，而马头形山墙和三角形山墙是出现在 -345° 。马头形山墙等三种典型山墙的负压最大值(绝对值)要比标准双坡山墙增大 78%以上，数值最大的圆弧形山墙增加了 91%。标准双坡山墙的正压最大值出现在 60° 风向角上，其他三种山墙在此区域则出现在 80° 风向角上。马头形山墙和标准双坡山墙基本相同，三角形山墙和圆弧形山墙比它们的数值要小一些。

综上所述，三种典型山墙形式使得墙面角部区域的负平均风压系数的绝对值增大（其中以三角形山墙增幅最大），增大了山墙顶部区域的正压（尤其是马头形山墙）和墙面边缘底部区域的负压最大值（圆弧形山墙增幅最大），但同时也降低了墙面中部区域的平均风压（与标准双坡山墙相比）。三种典型山墙出现平均风压最大值的比较敏感的风向角是 0° （ $\pm 5^\circ$ ）、 80° 和 195° 。

3.2.4 湍流度对墙面风压的影响

来流风场的湍流强度是决定来流在墙面分离程度的一个重要因素，湍流度高可以增加流体波动率并减小剪切层的曲率半径，导致后来的流体提前再附在流场顺风向的表面，并在分离区产生大的风吸力^[88]。由于通常用标准差风压系数来表示来流风中的脉动分量，如果来流风的湍流度比较大，那说明其本身的脉动比较强烈。根据准定常的假定，那么作用于墙面的脉动风压必然会受到很大的影响。

图 3.10 是各种山墙位于不同区域的测点的脉动风压系数随风向角的变化曲线图。从图中可以看出，墙面不同区域的测点的脉动风压系数随风向角变化趋势是不同的，但是 B 类风场下的脉动风压系数全都小于 C 类风场的。马头形山墙边缘突变点的角部以及三角形顶部的测点的等山墙突出尖端部位都是在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 风向角之间脉动值达到最大；位于山墙中间区域是在 90° 风向角时脉动最大；山墙底部边缘区域的测点是在 0° 附近的脉动最大。从脉动风压的绝对数值来说，马头形山墙位于山墙边缘突变的角部测点的在所有风向角下产生的脉动风压是最大的，要比其他三种山墙所产生的最大脉动风压值都要大 2 倍。在 20° 风向角时 B 类风场是 0.94，C 类时达到 1.2，增加了 0.26，增幅也比其他三

种情况大,这说明,湍流度的变化对于马头形山墙的边缘突变区域的影响最大,其他区域脉动值也有增加,但是增加的幅度相对均衡。

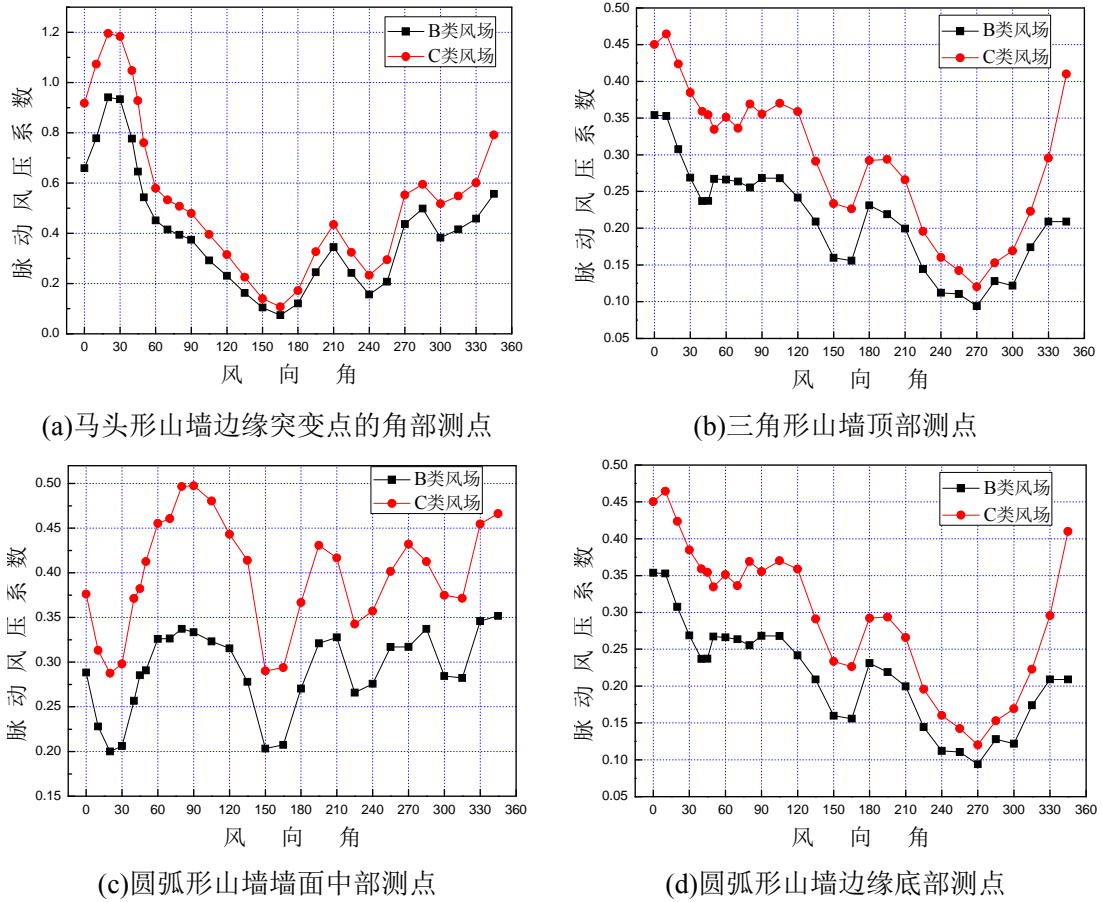


图 3.10 各种山墙位于不同区域的测点的脉动风压系数随风向角的变化曲线图

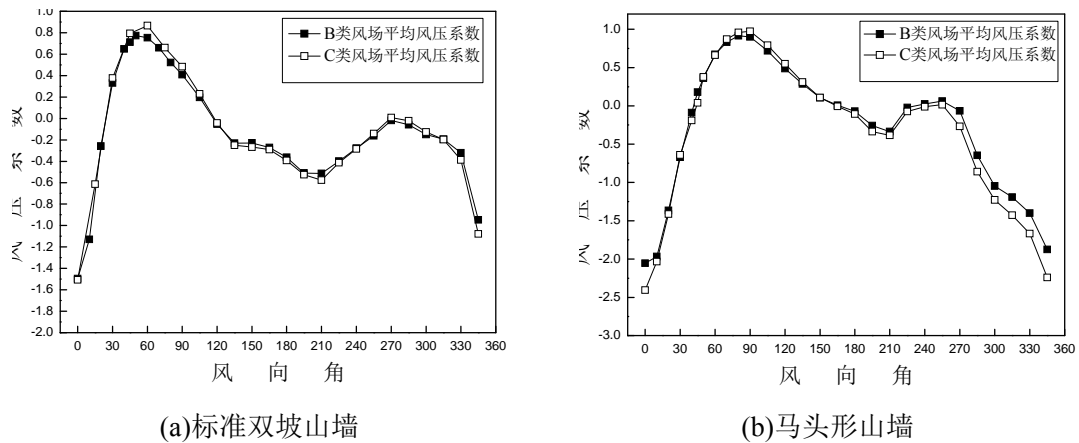


图 3.11 不同风场下山墙平均风压系数随风向角变化曲线图

由于马头形山墙、三角形山墙和圆弧形山墙的平均风压系数随风向角的变化基本相似,所以在每个区域的测点曲线图选取这三个模型的马头形山墙代表三个模型。从图 3.11 中可以看出,标准双坡的山墙和其他三种典型山墙在不同

风场条件下，湍流度对于平均风压的影响，在马头形山墙等三种典型山墙表面要比标准双坡的山墙表面要大得多。在平均风压分布上，湍流度越大，对于不同风向角下的影响是不同的，标准双坡屋面的山墙表面平均风压系数在 $60^\circ \sim 105^\circ$ 之间影响最大，湍流度越大，正平均风压就越大。在 60° 风向角时，B、C 类风场下的平均风压系数达到最大（B 类为 0.755、C 类为 0.867）。标准双破屋面的山墙的负平均风压绝对值最大值发生在 0° 风向角（B 类为 -1.49，C 类为 -1.51），但是从图 3.10(a)可以看出，产生负平均风压的风向角区间湍流度的影响非常微小。马头形山墙的正平均风压的最大值出现在 90° 风向角下（B 类为 0.9、C 类为 0.974），负平均风压最大值同标准双坡屋面的山墙一样出现在 0° 风向角（B 类为 -1.49、C 类为 -1.51）。湍流度对于马头形山墙影响最大的是在 $240^\circ \sim 360^\circ$ 之间产生负平均风压的风向区间。

从上面的分析可以看出，马头形山墙在两种风场下的正、负平均风压系数的最大值均大于标准双坡模型的山墙，在 C 类风场下马头形山墙的负平均风压的绝对最大值要比标准双坡山墙增加 60%，而在 B 类风场只增加 38%，这说明湍流度的增加对于马头形、三角形这种凸出屋面的山墙形式影响更大，在相同风场条件下，这种山墙要比标准双坡山墙更容易遭到破坏。

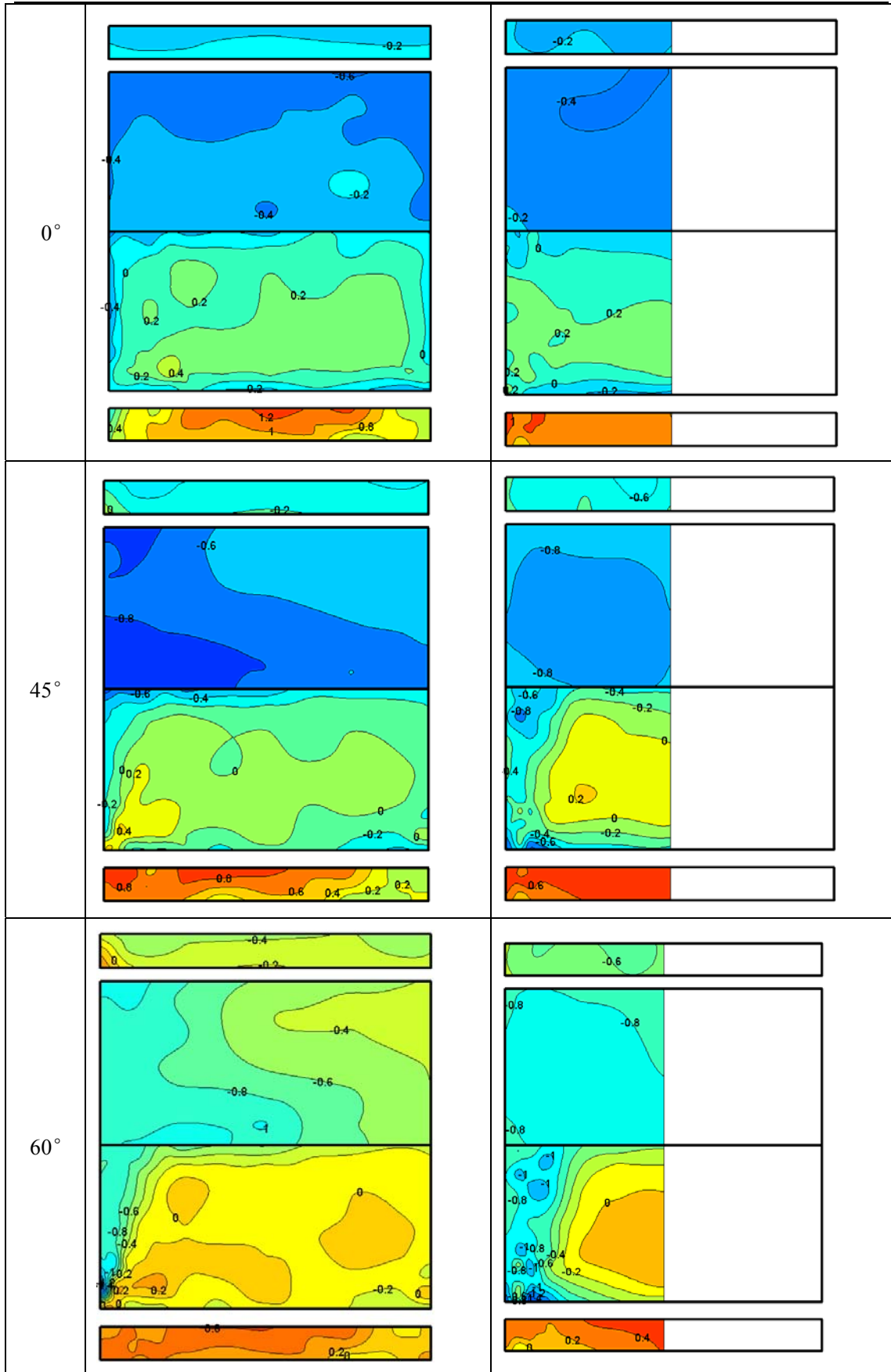
3.3 山墙对屋面风压分布特征的影响

3.3.1 平面风压分布

不同形式的山墙对于屋面不同位置的平均风压影响不同，而且风向角对于屋面分布的影响更加敏感。

风向角	硬山双坡屋面	带马头形山墙的双坡屋面
-----	--------	-------------

第3章 山墙风压分布规律以及山墙形式对屋面风压分布的影响



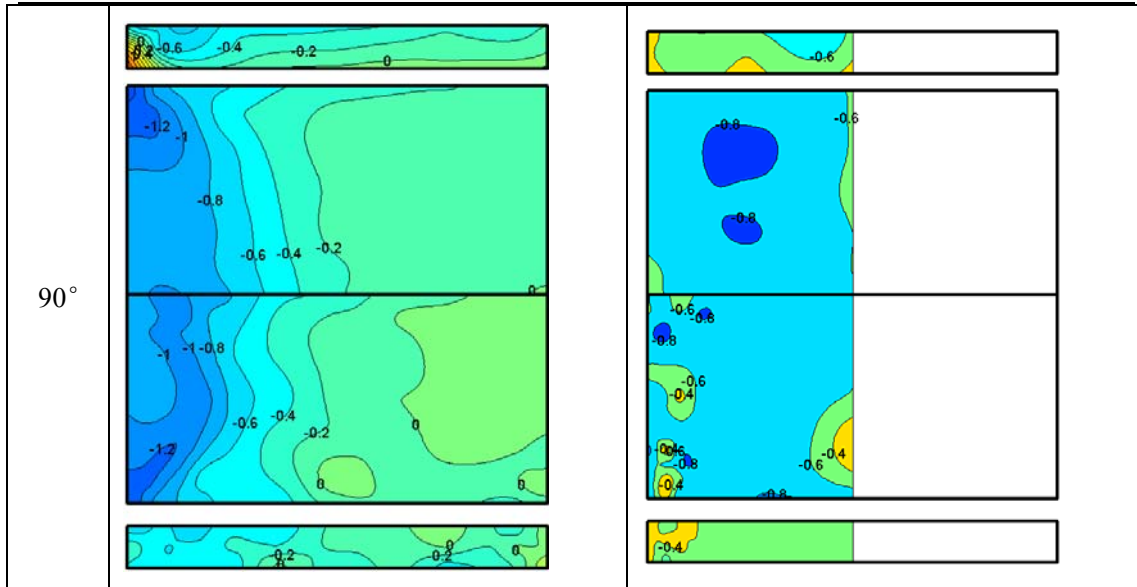


图 3.12 典型风向角下双坡屋面的平均风压分布图

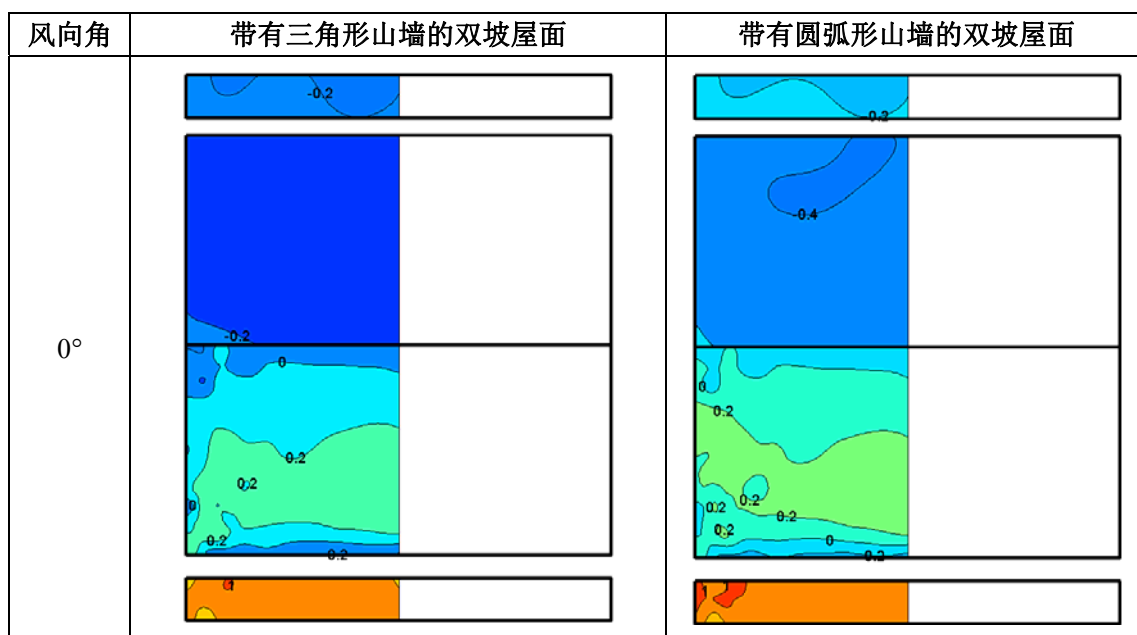
图 3.12 中显示的是硬山双坡屋面在没有山墙和有马头形山墙的情况下分别在 0° 、 45° 、 60° 和 90° 风向角下的平均风压分布图；图 3.13 中显示的是带有三角形山墙的双坡屋面和带有圆弧形山墙的双坡屋面在 0° 、 45° 、 60° 和 90° 风向角下的平均风压分布图。由于试验中扫描阀数量有限而且双坡屋面左右对称，因此只在屋面的一半区域上布置了测点，得到的风压分布图均只显示一半。由于下风向的风压不起控制作用，这里不再特别讨论。

从图 3.12 中可以看出：在 0° 风向角下标准双坡屋面的迎风屋面除了在挑檐上表面的边缘以及屋面靠近山墙的边缘区域出现负的平均风压，屋面其他部分均是正压，最大正压为 0.4，背风屋面的平均风压全部为负压，绝对值最大的负平均风压系数是 -0.6；迎风挑檐中部下表面的平均风压系数为 1.2 左右，由中部向边沿方向平均风压系数逐渐减小，在最边沿处减小到 0.2~0.3 之间。此时，背风挑檐下表面平均风压系数均在 -0.2 左右。带有马头形山墙的双坡屋面在 0° 风向角下，迎风屋面仅仅在屋面挑檐上表面的边缘区域出现负压，大约在 -0.2 左右，其他区域均为正压，数值在 0.2~0，与标准双坡相比基本分布相似，但是正的风压在数值上要小，并且在屋面两侧靠近山墙的区域等压线变得平缓，而且成为正压。背风屋面变化不大，还都是呈现负压，只是负压值在 -0.4~-0.2 之间。迎风挑檐的下表面的平均风压系数中部为 1（标准双坡为 1.2），与标准双坡相比，背风屋面在数值和分布上没有变化。带有三角形山墙和圆弧形山墙的双坡屋面的变化不同，同马头墙的其本相似。这可能是由于三种山墙的马头伸出前墙和屋面，吹向边缘区域的气流提前在墙体处分离，吹向屋面中部的气流仍然还是屋檐前沿分离，实际上是将同时吹向屋面的气流的分离泡打碎，使

屋面风压的绝对值减小。

在 45° 和 60° 的斜风向角下的平均分压分布图可以很明显的看到气流作用到屋面形成的锥形涡的位置的变化，在标准双坡屋面的迎风屋面除了迎风屋角附近及屋面中部区域为正压以外，屋檐边缘以及屋脊附近的大部分区域以及整个背风屋面均为负压，且背风屋面负压值比风向角为 0° 时的负压值更大更不均匀，尤其是在迎风屋面角部 45° （或是 60° ）的边线与屋面左侧山墙边缘所夹的区域等压线密集，平均风压系数由 0.4 迅速减小到 -0.2（ 60° 风向角时等压线更加密集，平均风压系数由 0.2 快速变化到 -1.2）。带有其他三种形式山墙的双坡屋面在这两个斜风向下则有明显的不同。屋面的迎风屋面在距离山墙一定距离的地方出现了一条剃度比较缓和的带状区域，这个区域内的平均风压系数均在 -0.8~ -1 之间（三角形山墙在 -0.6~-1 圆弧形山墙的在 -0.8~-1），而锥形涡状的分布更加靠向屋面中部了。这主要是由于山墙的遮挡作用，使得气流的分离点变化了，分离区域的变化直接导致了屋面风压分布的变化。由此可见，来流风的分离现象是影响屋面风压分布数值变化的主要因素。

在 90° 风向角下，标准双坡屋面在迎风边缘（两个屋面）等压线比较密集屋面平均风压从 -1.2 减小到 -0.2 之后，变化减缓，一直到另一侧边缘风压减小至 0。但是带有三个典型山墙的屋面的气流分离区更加靠近屋面中线位置，在屋面左侧边缘和分离点之间的区域，屋面平均风压在 -0.8~-0.6 之间，在分离点之后平均风压由 -0.6 降低到 0。这说明山墙的形式变化使得来流风在屋面的分离区域发生变化，而只有在分离区风压变化的剃度才大，在流体的再附后的风压趋于常数。



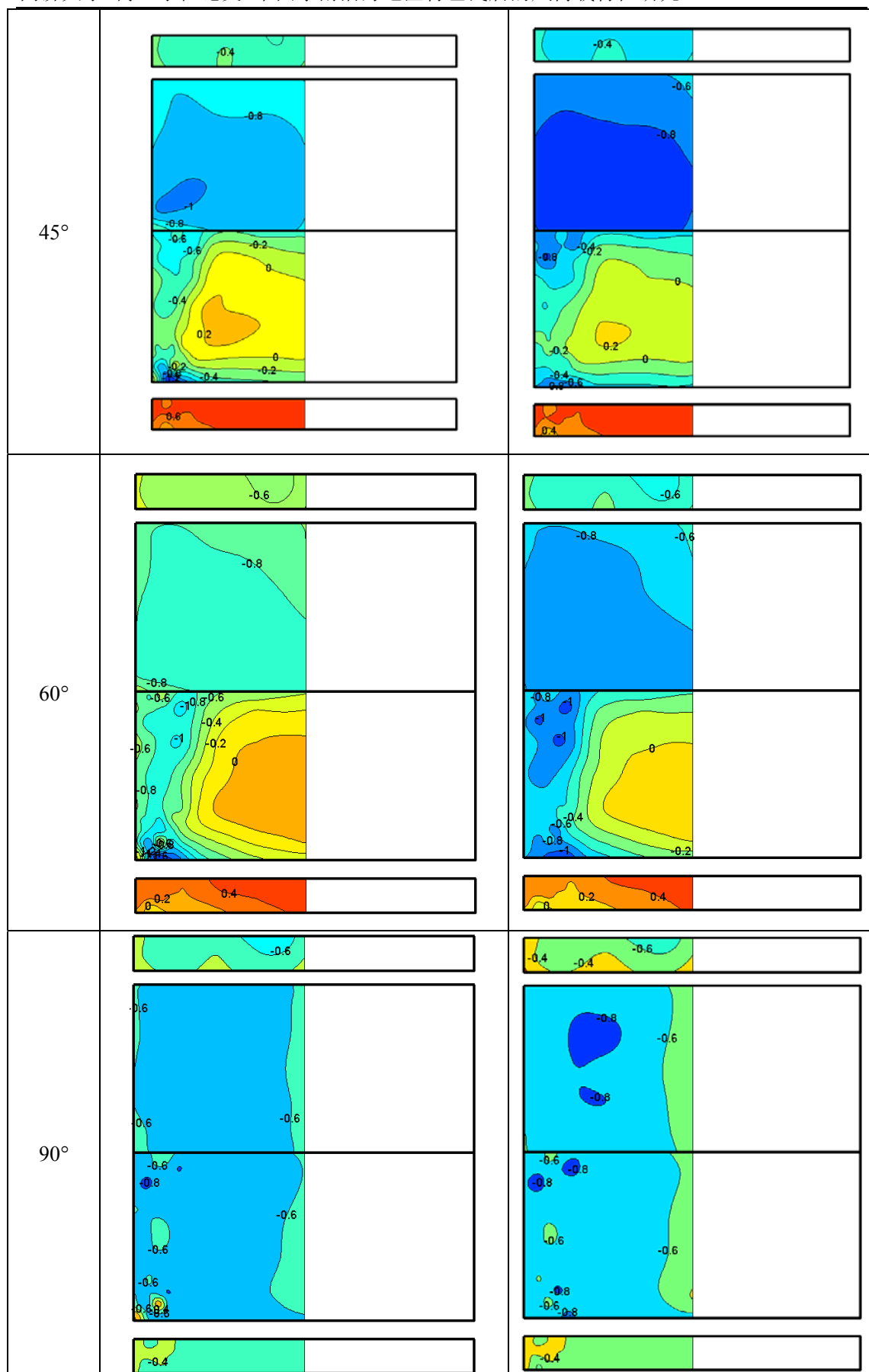


图 3.13 带有三角形山墙、圆弧形山墙的双坡屋面在各风向角下的平均风压分布图

3.3.2 山墙对屋面的脉动风压的影响

山墙对屋面的影响从脉动风压的分布来看，由于风压的分离区发生了变化，位于分离区的风压的非高斯性比较明显。从双坡屋面的 6 个不同的区域选择 12 个典型测点进行比较。选取的屋面测点的位置图如图 3.14 所示。

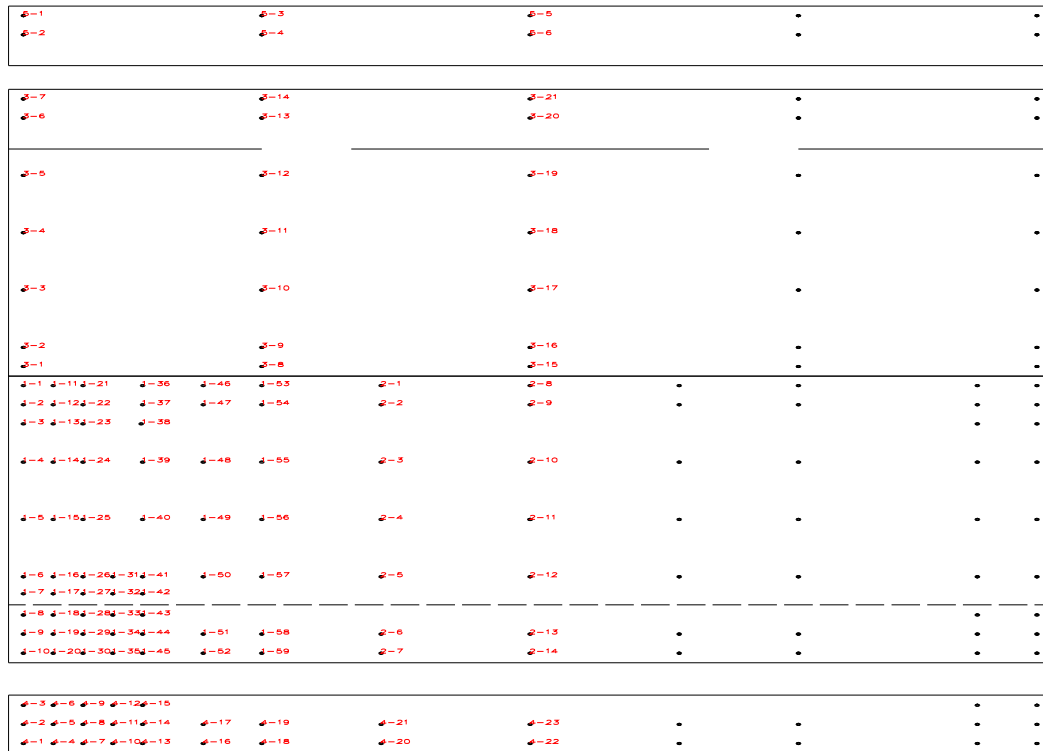


图 3.14 屋面测点布置图

图 3.15 中的(a)、(b)图 1-2 测点和 1-11 测点是屋面上位于山墙和屋脊角部区域的测点。从图中可以看到这个区域的测点脉动风压系数的在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间随风向角的变化趋势基本是一致的。在 $0^{\circ} \sim 195^{\circ}$ 风向角之间时标准双坡屋面的脉动风压系数都大于其他三种带有典型山墙的双坡屋面的脉动风压系数，最大差可达 50%，但是在 $210^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间则出现了这三种带有典型山墙的双坡屋面的脉动风压系数都大于标准双坡屋面，其中波动最大的马头形山墙、三角形山墙，这是因为由于山墙顶部形状的不同，对于不同测点的影响也就不同。在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 风向角之间，带有三种典型山墙的双坡屋面的脉动风压的最大值要大于标准双坡屋面，这说明这三种山墙形式虽然对近端的山墙屋脊角部区域有遮挡作用（脉动风压减小），但是对于远端的相应区域却有放大作用，而且增大的幅度要大于遮挡所减小的幅度。总的来说，这三种山墙增大了屋面的山墙屋脊角部区域的脉动风压的最大值。

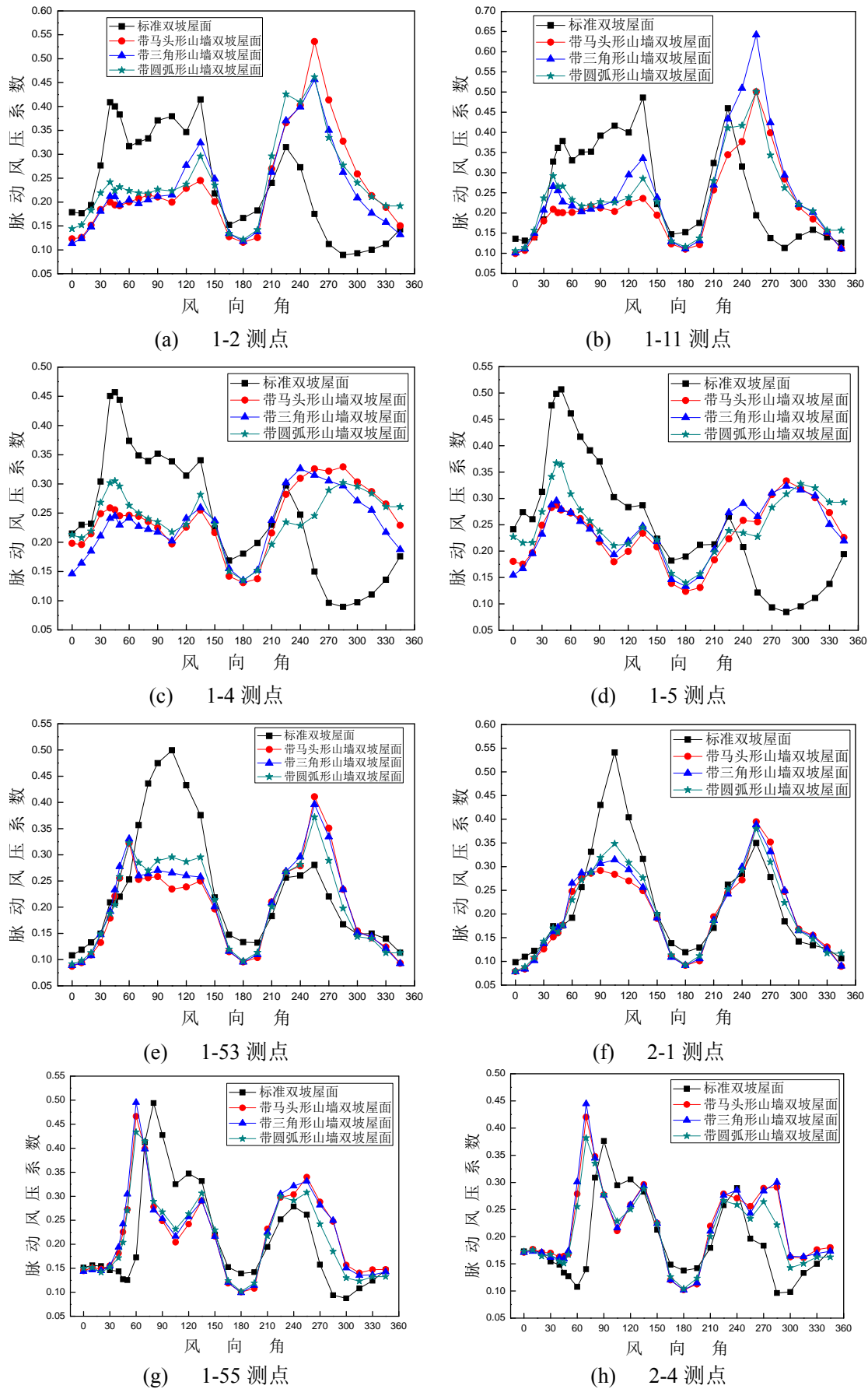


图 3.15 屋面各区域典型测点的脉动风压系数随风向角变化曲线图

(c)、(d)图中的测点 1-4、1-5 位于屋面靠近山墙边缘的区域。在 $0^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间，所有模型的脉动风压随风向角的变化一致，标准双坡屋面在此区间的脉动风压要大于带有其他三种山墙的双坡屋面，尤其是在 $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间更加明显，最大差距可达到 50%以上，其中脉动风压最小的是带有三角形山墙的双坡屋面。在 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间标准双坡屋面同其他三个模型呈现完全相反的变化趋势，在这个区间标准双坡屋面的脉动风压要小于其他三种屋面。总体上可以看到三种带有山墙的模型的脉动风压变化曲线的波动比标准双坡屋面平缓很多。从这两个图上可以看到，标准双坡屋面所产生的脉动风压最大值要大于其他三种模型，可见由于这三种山墙的遮挡作用，屋面山墙边缘区域的脉动风压要减小 50%左右。

(e)图、(f)图中测点 1-53、2-1 位于屋面的屋脊附近区域的测点。四种模型在 1-53 测点随风向角的变化除在 $60^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间的变化不同，其余各风向角变化一致。标准双坡屋面在此区间出现脉动风压的最大值 0.5（在 90° 风向角），而带有三种山墙的双坡屋面在此区间的脉动风压基本没有变化，大体保持在 0.3~0.25 之间，其中脉动风压最小的是马头形山墙。山墙的遮挡作用最明显。在 $210^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 之间带有三种山墙的双坡屋面的脉动风压大于标准双坡屋面，并且都在 270° 左右达到脉动风压最大值，分别是 0.41（马头形山墙）、0.4（三角形山墙）、0.37（圆弧形山墙），都要小于双坡屋面在 90° 是产生的脉动最大值。(f)图中四种模型在 2-1 测点的脉动风压随风向角变化曲线基本一致。双坡屋面在 90° 产生的脉动风压最大值 0.55，要大于带有山墙的三种模型在 270° 产生的脉动最大值 0.4。从这两幅图中可以看出，三种带有山墙的双坡屋面在屋脊附近区域的脉动风压最大值小于标准双坡屋面在此区域的脉动风压最大值，遮挡作用明显。

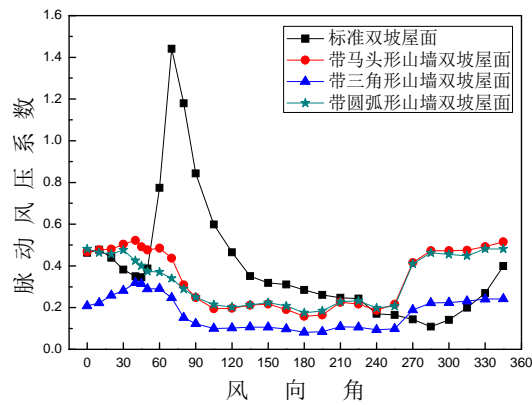
测点 1-55 和 2-4 位于屋面的中央区域，图(g)和图(h)中各模型的脉动风压随风向角的变化曲线显示在此区域，他们的变化一致，数值上也很接近，只是在达到最大值时的风向角不同。由此可以知道，山墙的遮挡作用对于屋面中央区域基本没有影响。

通过上面的分析可以看到，三种山墙对于屋面各部分的影响是不同的。首先产生脉动风压最大值的风向角与标准双坡屋面是不同的，标准双坡屋面一般出现在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间，而带有山墙的三种模型则是出现在 $210^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间，而且在 $0^{\circ} \sim 210^{\circ}$ 之间带有这三种山墙的双坡屋面的脉动值都要小于标准双坡屋面。其中，在屋面大部分区域以带有马头形山墙的双坡屋面的脉动风压值最小（带有三角形山墙的双坡屋面在屋面靠近山墙边缘区域的脉动风压最小）。而在 $210^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 出脉动风压最大值时，又以马头形山墙的双坡屋面得到脉动风压值最大，

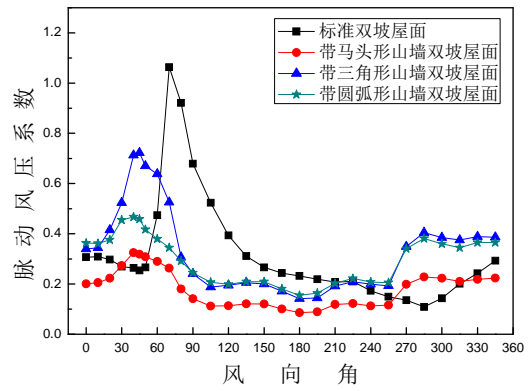
马头形山墙对于屋面的脉动风压在不同风向角下的增加或是减小的影响是最明显的。这说明马头形山墙这种形式对于局部区域的遮挡作用显著，同时对于另外的区域的风场则产生了脉动增强的效应。

其次，山墙增大了屋面的山墙屋脊角部区域的脉动风压最大值；屋面靠近山墙边缘附近区域以及屋脊附近区域的脉动风压最大值却因为山墙的存在而减小了很多；山墙对屋面中央区域的脉动风压则基本上没有影响。

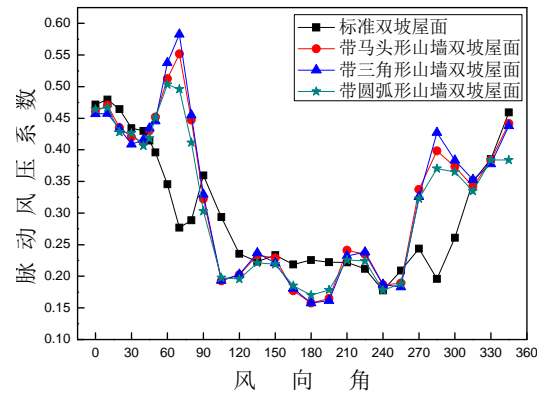
3.3.3 山墙对屋檐的影响



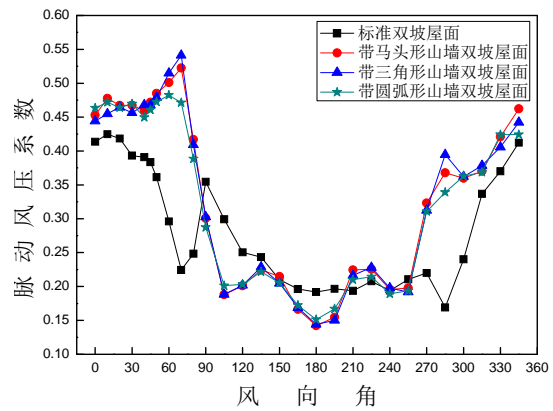
(a) 1-10 测点



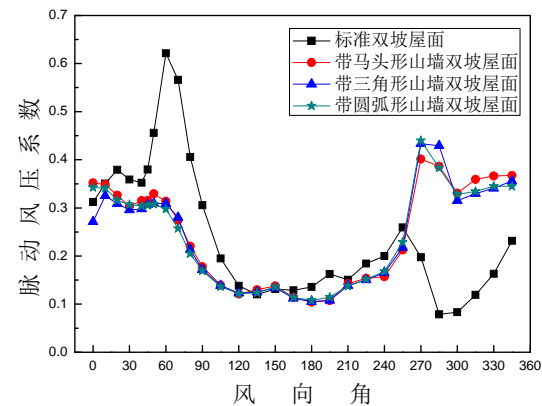
(b) 1-19 测点



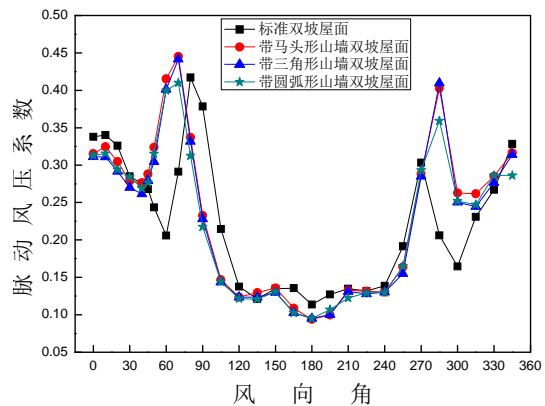
(c) 2-7 测点



(d) 2-6 测点



(e) 4-3 测点



(f) 4-21 测点

图 3.16 屋檐不同区域测点的脉动风压变化图

图 3.16(a)、(b)中的测点 1-10 和 1-19 位于挑檐上表面的挑檐山墙角部区域。1-10 是角部最顶点的位置，在此区域，带有三种典型山墙的双坡屋面的脉动风压随风向角的变化波动比较平缓，不像标准双坡屋面的脉动风压在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间出现一个极大的最大值 1.5。带有三角形山墙的双坡屋面是这四种模型中脉动风压最大值最小，随风向角的变化也最平缓，它的脉动最大值出现在 45° ，仅仅为 0.32，带有马头形山墙的双坡屋面的脉动最大值 0.52 也是出现在 45° ，圆弧形山墙则出现 0° 左右，为 0.48。从(a)图和(b)图中曲线图还可以看出，这三种山墙还改变了双坡屋面从 $255^\circ \sim 360^\circ$ 之间脉动风压随风向角的变化趋势。四种模型的在此区域的脉动风压最大值可以看出，这三种山墙使双坡屋面在挑檐山墙角部区域的上表面脉动风压最大值至少了 65%，最大可降低至原来的 1/5，而且也是脉动风压的变化减缓很多。

(c)图和(d)图中的测点 2-7 和 2-6 是位于挑檐上表面边缘的第一排测点中。它们的脉动风压随风向角的变化趋势同(a)图、(b)图中的测点有很大的不同，变化曲线的波动性明显增大。在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 和 $255^\circ \sim 300^\circ$ 两个区间带有三种典型山墙的双坡屋面的脉动风压变化趋势与标准双坡屋面的完全相反。在 60° 风向角时带有三种山墙的双坡屋面达到脉动最大值，其中以带三角形山墙的双坡屋面的脉动最大值最大（测点 2-6 达到 0.58，测点 2-7 达到 0.54）。标准双坡屋面则是在 10° 左右达到脉动最大值（测点 2-6 达到 0.48，测点 2-7 达到 0.42）。从这两个测点的脉动风压随风向角变化图可以看出，这三种山墙增大了挑檐边缘上表面的脉动风压。

(e)图和(f)图中的 4-3、4-21 两个测点是分别位于挑檐下表面的角部和中间区域的测点，从他们的脉动风压随风向角的变化曲线图可以看出，带有三种典型山墙的双坡屋面的位于挑檐角部区域的测点的脉动风压的最大值要远远小于标准双坡屋面，而位于挑檐中央区域的测点则是带有三种典型山墙的双坡屋面的脉动风压系数的最大值均要大于标准双坡屋面。在(e)图中可以明显的看到在 60° 风向角时标准双坡屋面的风压的脉动达到最大值，与此相对应的是带有其他三种山墙的双坡屋面的脉动风压值要小很多，它们的变化趋势同挑檐上表面的山墙角部区域的测点一致。在 $255^\circ \sim 360^\circ$ 之间脉动风压随风向角的变化趋势标准双坡屋面与其他带有典型山墙的双坡屋面完全相反。这说明这三种山墙对于挑檐山墙角部区域的上表面和下表面的影响相同，都是大大降低了其脉动风压。

(f)图中 4-21 测点同 2-6 测点位于屋面挑檐同一位置，2-6 测点在上表面，4-21 测点在下表面。从图中可以看出，带有三种典型山墙的双坡屋面在 4-21 测

点的脉动风压最大值比标准双坡屋面的大，但是差值很小。四种模型在此区域的脉动风压随风向角变化趋势基本一致，与(d)图中的 2-6 测点相比影响很小。从这两个图可以看出，这三种山墙对于挑檐边缘上表面的影响要远远大于下表面。

三种山墙对于挑檐山墙角部的影响非常大，无论上表面还是下表面由于山墙的遮挡，其脉动风压都减小很多，尤其是带有三角形山墙的双坡屋面。但是山墙对挑檐边缘的下表面的脉动风压则影响不大，但是增大了挑檐上表面的脉动风压。

3.4 本章小结

本章主要介绍了带有三种典型山墙的双坡屋面的墙体和屋面的平均风压系数分布特征、脉动风压系数分布特征，并且研究了山墙对屋面的风压分布的影响，得到的主要结论如下：

(1) 三种典型山墙从高度上（从底部向上）看在迎风边缘上第一个突变处产生绝对值较大的负压， 0° 风向角下的山墙平均风压分布图中那个可以看到三角形山墙所受到的吸力作用是这四种山墙中最大的。在 45° 风向角下这三种形式的山墙表面测点的平均风压系数的最大值都要比标准山墙的大 2 倍多，尤其以马头形山墙的最大。 90° 风向角下，山墙在顶部和两侧边缘的形状上的改变，不仅增加了墙面的局部风压，还改变了墙面的平均风压的分布特征，比较大的风压区域从屋面中部迁移到延伸出屋顶和前后墙的山墙顶部和两侧的边缘部分。

(2) 三种山墙产生脉动风压系数最大值的区域在墙面顶部的迎风边缘。迎风边缘的形状改变会减小墙面的脉动风压系数，改变的折点越多脉动风压系数减小的也就越多。

(3) 墙面边缘上突变点，标准双坡墙面表现在山墙与屋檐交界点，在其他三种山墙则表现在山墙边缘的第一个突变点（从下向上）这个位置的测点都是在 0° 风向角时出现绝对值最大的平均风压系数，即吸力最大值。在这四种山墙中在这个区域产生吸力最大的是三角形山墙；在顶部区域，马头形山墙等三种典型山墙的正压是标准双坡墙面的 1.3 倍以上，最大的可达到 1.8 倍。这说明典型山墙的形式增大了山墙顶部区域的正压，尤其是马头形山墙。山墙顶部位置对于 0° 、 195° 和 345° 这三个方向角比较敏感。

(4) 标准双坡的山墙和其他三种典型山墙在不同风场条件下，湍流度对于平均风压的影响，在马头形山墙等三种典型山墙表面要比标准双坡的山墙表面

要大得多。

(5) 0° 风向角下, 三种山墙使屋面风压的绝对值减小, 背风屋面在数值和分布上没有变化。在 45° 和 60° 的斜风向角下屋面的迎风屋面在距离山墙一定距离的地方出现了一条梯度比较缓和的带状区域, 锥形涡状的分布更加靠向屋面中部了。 90° 风向角下, 等压线比较密集的区域由标准双坡屋面的边缘变化到了屋面的中部, 并且梯度都减小了。

(6) 三种带有典型山墙的双坡屋面的脉动风压系数都大于标准双坡屋面, 其中波动最大的马头形山墙、三角形山墙, 这是因为由于山墙顶部形状的不同, 对于不同测点的影响也就不同。

(7) 三种山墙对于挑檐山墙角部的影响非常大, 无论上表面还是下表面由于山墙的遮挡, 其脉动风压都减小很多, 尤其是带有三角形山墙的双坡屋面。但是山墙对挑檐边缘的下表面的脉动风压则影响不大, 但是增大了挑檐上表面的脉动风压。

第4章 低矮房屋的屋面风压的非高斯特性研究

4.1 引言

在自然界和社会现象中,有许多随机变量大都服从或是近似服从正态分布(也称为高斯分布),所以在概率论和数理统计的研究和工程应用中,服从正态分布的随机变量起着重要的作用。关于结构表面瞬时风压的极值分布,许多学者都进行了分析研究。在低矮房屋的表面风压的研究中,Davenport 等许多学者往往也都假定风压分布服从高斯分布。Davenport^[93]于1964年假定结构表面的风压时程为高斯过程,概率分布服从正态分布,并基于此假定推导出在某一时间段 $[0, T]$ 内风压极大值的概率密度函数。但是在后来,国外多个学者也进行了大量的风洞试验,并提出了不同的假设^{[94][95][96]},他们认为在迎风面,Davenport的假设是可以接受的,但是在结构表面来流发生的分离和再附着的区域,采用正态分布的假设往往与实际相差较大。同时,他们认为在来流分离和再附着的区域采用对数正态分布能更好的对瞬时风压的极值进行描述。

Marshall^[96]和 Stathopoulos^[97]分别通过现场实测和风洞试验研究了低矮建筑表面风压的概率分布,并指出建筑表面风压可以分成两类,一类是接近高斯分布的风压,另一类是有高偏态分布的非高斯风压。风压的非高斯特性对风压极值估计的影响很早就受到研究人员的关注。基于来流风速服从高斯分布的假定^[119],根据风速和风压的非线性关系得到了风压的概率分布,通过对比发现,计算得到的概率分布与湍流强度为20%时,风洞试验测得的迎风面风压的概率分布很接近。

4.2 风压的概率分布特性

4.2.1 风压的高斯性与非高斯特性的数学描述

目前,对处于大气边界层中的低矮房屋表面的风压服从何种分布并无明确的定论,国内外许多学者都提出不同的数学模型。这些模型主要是分为高斯分布(正态分布)和非高斯分布,而非高斯分布又细分为极值分布、对数正态分布等等。对于低矮房屋表面的风压分布是否服从高斯分布,则需要对随机变量(所采集的风压时程)的进行正态性检验^{[98][99]}。

对于服从高斯分布的随机变量，其概率分布完全可以由前两阶统计矩（数学期望和方差）来描述。但是非高斯分布的随机变量要想寻求它的概率密度函数是相当困难的，通常是采用随机变量的多阶统计矩（主要是三阶和四阶统计矩）对概率密度函数的特征进行描述。三阶和四阶统计矩分别称为偏度（skewness）和峰度（kurtosis），偏度和峰度是用来描述分布曲线形状的两个重要的特征量。

偏态系数定义如下式所示，它是三阶中心矩与均方差的三次方的比值，又称为偏度，记为 C_s ：

$$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (4.1)$$

当 $C_s > 0$ 时，分布曲线为正偏态曲线，说明正偏差大于负偏差，因此正偏态曲线的长尾部在横轴正方向；当 $C_s < 0$ 时，分布曲线为负偏态曲线，说明负偏差大于正偏差，因此负偏态曲线的长尾部在横轴负方向。

随机变量的四阶中心矩能够描述分布曲线顶峰的突起程度，所以在实际应用中，采用四阶中心矩与均方差的四次方的比值，即 $\frac{\mu_4}{\sigma^4}$ ，来描述曲线的凸起程度，所以定义

$$C_e = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (4.2)$$

称为峰度系数或是简称峰度。

如果假定风压系数服从高斯分布，那么概率密度曲线是关于均值对称的，曲线的两端都存在长尾部。众所周知，一个随机变量的正、负极值都是位于概率密度分布图的两个端部，如果概率密度分布曲线存在长尾部，那么该随机变量的正负极值就位于概率密度分布图的长尾部。当 $C_s > 0$ 时，曲线为右偏态，曲线的长尾部出现在横轴的右端，即概率分布较之高斯分布偏向正值；当 $C_s < 0$ 时，曲线为左偏态，偏向负值，曲线的长尾部出现在横轴的左端。所以当概率分布曲线呈现偏态时，其长尾部所占比例要大于正态分布曲线中相应的比例，而横轴另一段尾部比较短，其所占比例相应地要小于正态分布。当 $C_e < 3$ 时，表示分布曲线的峰度比正态曲线低，即比较平坦，称为低峰度线；当 $C_e > 3$ 时，曲线比较尖锐，称为高峰度曲线。因为 μ_4 受两个端部的影响比方差 σ_4 受端部的影响要大，故高峰度曲线的两尾部比较长。偏度侧重描述风压偏离均值的多少，峰度则体现风压峰值出现的强度，它们是从不同角度来体现风压分布偏离高斯分布的程度。

统计学家们对检验正态总体的种种方法进行了比较，根据奥野忠一等人于 20 世纪 70 年代进行的大量模拟计算结果，认为正态性检验方法中，总的来说，

以“偏度、峰度检验法”及“夏皮罗-威尔克法”较为有效^[100]。本法运用偏度、峰度检验法检验样本资料是否服从正态分布。当频数分布为正态时，偏度系数 $C_s=0$ ，峰度系数 $C_e=3$ ，但从正态分布总体中抽出的随机样本，由于存在抽样误差，其样本偏度系数 C_s 与样本峰度系数 C_e 不一定为 0 和 3，为此，需检验 C_s 、 C_e 与 0 和 3 的相差是否有显著性。

4.2.2 风压的概率密度分布

风洞试验中采集的大量的屋面风压实验数据是否符合正态分布，首先要检验的是其概率分布中 C_s 、 C_e 与 0 和 3 的相差是否有显著性。风压的非高斯特性是相对高斯分布而言的，为了直观地描述低矮建筑屋面风压的非高斯特性，本文基于试验数据通过概率图描述了脉动风压的概率分布。将来流分离区脉动风压的概率图与高斯拟合图作了比较，为了对比研究同时也给出了非高斯性较弱区域的概率比较图。另外，为了使两边偏离高斯分布的拖尾显示出来，这里将纵坐标改为对数坐标。文章中以长宽比为 3:2（长 10.5m 宽 7m）的三角挑檐双坡屋面的模型为例，绘制了不同测点 0° 、 45° 和 90° 风向角下关键部位测点的概率密度分布图。对所有测点进行了概率密度分布曲线的绘制，并形成偏度系数和峰值系数分布图，比较全面地对屋面的概率密度分布进行了分析。

2-7	2-14		2-21		2-28		2-35		2-42		
2-6	2-13		2-20		2-27		2-34		2-41		
2-5	2-12		2-19		2-26		2-33		2-40		
2-4	2-11		2-18		2-25		2-32		2-39		
2-3	2-10		2-17		2-24		2-31		2-38		
2-2	2-9		2-16		2-23		2-30		2-37		
2-1	2-8		2-15		2-22		2-29		2-36		
1-1	1-11	1-21	1-36	1-46	1-53	2-1	2-8	2-15	2-22	2-29	2-38
1-2	1-12	1-22	1-37	1-47	1-54	2-2	2-9	2-16	2-23	2-30	2-39
1-3	1-13	1-23	1-38							2-31	2-40
1-4	1-14	1-24	1-39	1-48	1-55	2-3	2-10	2-17	2-24	2-32	2-41
1-5	1-15	1-25	1-40	1-49	1-56	2-4	2-11	2-18	2-25	2-33	2-42
1-6	1-16	1-26	1-31	1-41	1-50	1-57	2-5	2-12	2-19	2-26	2-43
1-7	1-17	1-27	1-32	1-42							
1-8	1-18	1-28	1-33	1-43						2-35	2-44
1-9	1-19	1-29	1-34	1-44	1-51	1-58	2-6	2-13	2-20	2-27	2-45
1-10	1-20	1-30	1-35	1-45	1-52	1-59	2-7	2-14	2-21	2-28	2-46

图 4.1 屋面测点布置图

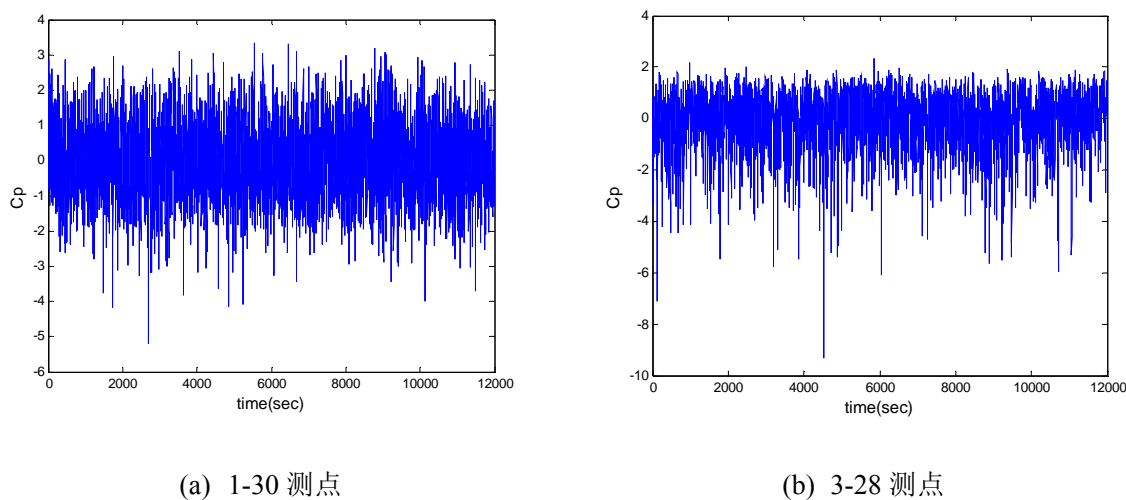


图 4.2 典型测点风压时程曲线图

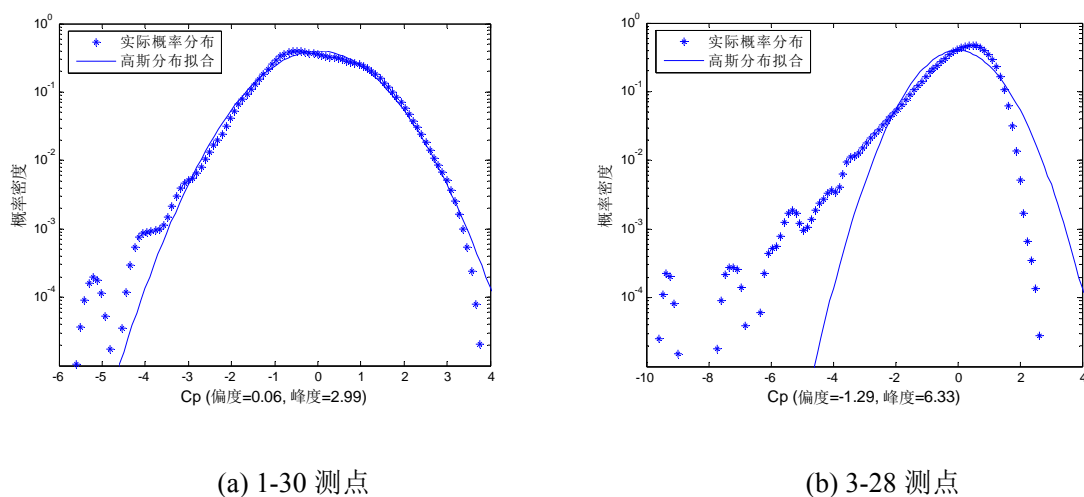


图 4.3 典型测点概率密度分布曲线图

图 4.2、图 4.3 所示的是 0° 风向角下典型测点的时程曲线图和概率密度分布图，其他各区域的共计 23 个典型测点的时程曲线图和概率分布图详见附录 A。1-30 测点和 3-28 测点分别位于迎风屋面屋檐的边缘处和背风屋面屋檐的边缘。从图 4.1 中可以看出这两处的测点都处于气流的分离区，不同的是 1-30 测点在来流风的分离区内，而 3-28 测点位于来流风二次分离（屋脊处）的再附区内。从它们的风压时程曲线图中可以看出，1-30 测点的风压时程曲线，峰值围绕其均值分布对称，而 3-28 测点的风压时程曲线相对其均值是不对称的并且在下方带有幅值很大的峰值脉冲，其幅值要比测点 1-30 的大很多，而这恰恰是高吸力的主要体现。在这两个测点的概率密度分布图中 1-30 测点的偏度和峰度分别是 0.06 和 2.99，均非常接近高斯分布的偏度值 0，峰度值 3，属于服从高斯分

布的风压信号，而 3-28 测点的偏度为-1.29，峰度为 6.33 都远远的偏离高斯分布，具有非常典型的非高斯特性。从这里可以看出，正是由于风压时程中严重不对称的峰值脉冲使得风压的概率曲线严重偏离了高斯分布，是风压呈现非高斯特性的主要原因。

屋脊与山墙角部的屋面测点 1-1 在三个风向角下的概率密度曲线如图 4.4 所示。从图中可以看出位于屋脊山墙角部屋面区域的测点在多个风向角下都呈现非常明显的非高斯特性，概率密度大多呈现负偏态，并且在 45° 斜风向角下偏度系数绝对值最大，峰度系数也都大于 3，偏度系数越大，其概率密度分布曲线偏离高斯分布就越厉害。

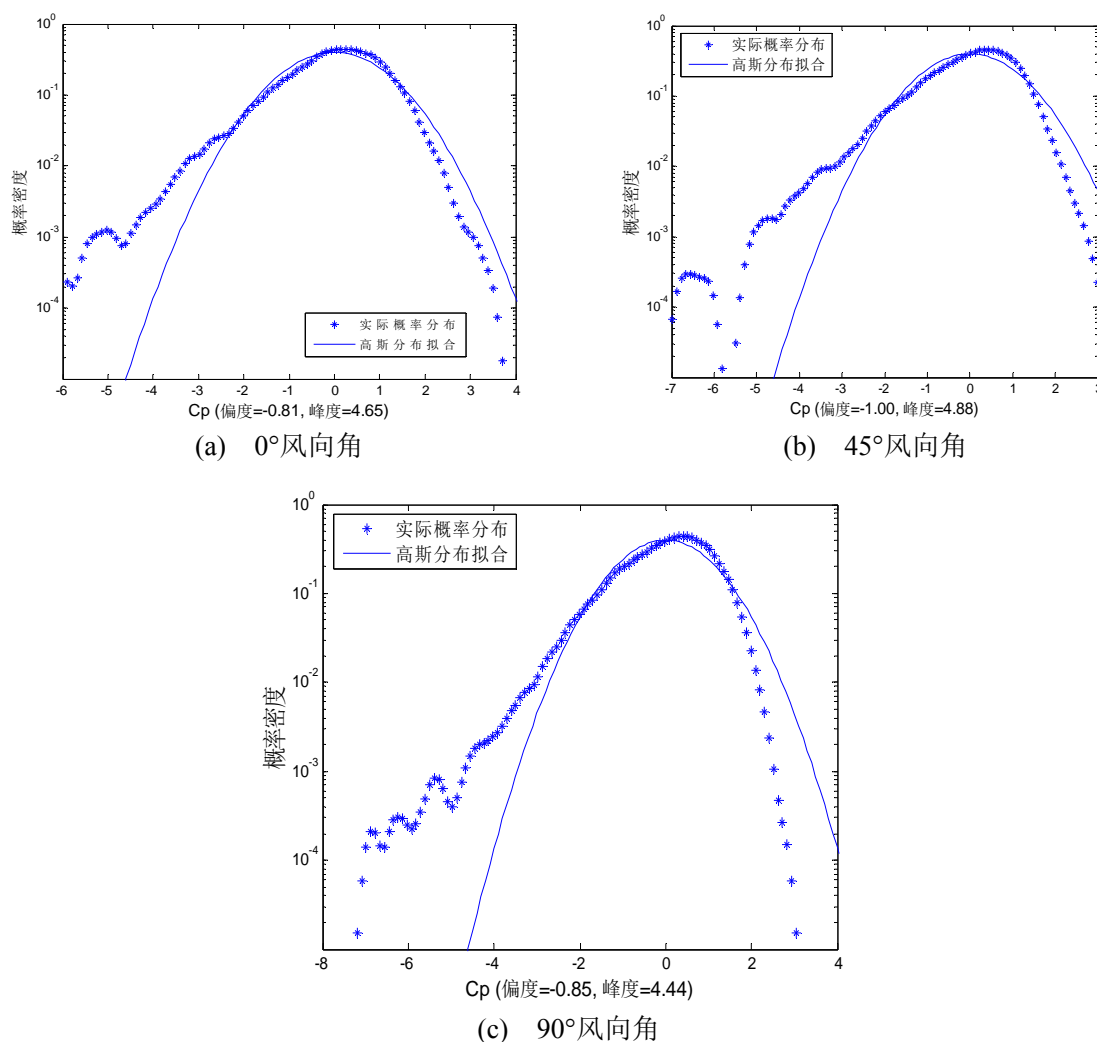


图 4.4 测点概率密度分布曲线

从表 4.1 中可以看出，屋面各部位的测点的偏度的绝对值和峰度的大小与风向角有密切的关系，即与来流风的分离区的部位有很大的关系。迎风屋面屋脊山墙角部的测点 1-2 在 90° 风向角时偏度的绝对值和峰度达到最大值。迎风屋面中央区域的测点 2-11 也是在 90° 风向角时偏度的绝对值达到最大值，峰值

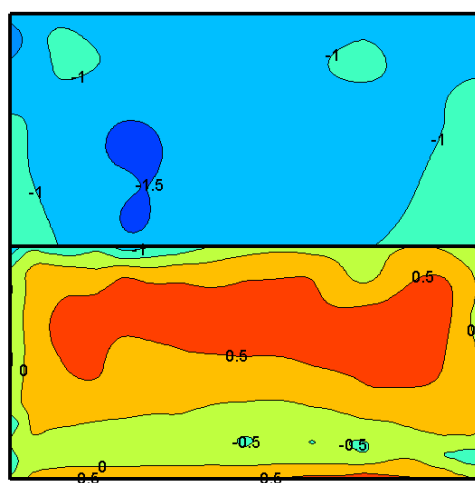
最大却是在 45° 风向角。迎风屋面挑檐山墙角部测点 1-9 和迎风屋面挑檐边缘测点 1-20 则是在 45° 风向角时偏度的绝对值达到最大，而在 90° 风向角时峰度为最大。背风屋面中央区域的测点 3-25，都是在 0° 风向角时偏度的绝对值和峰度达到最大。但是，位于背风屋面屋脊山墙角部的测点 3-1 则是在 45° 风向角是偏度的绝对值和峰度均达到最大。从表中的数据可以看出，只有迎风屋面挑檐边缘的测点 1-20 在 0° 风向角下可以认为其偏度为 0，峰度为 3，符合高斯分布，除此之外所有的工况的偏度值和峰度值从统计学的严格定义上来说其概率分布都属于非高斯分布。测点表现出最高的偏度绝对值或是峰值时往往是测点所在的区域处于气流的分离区之内。

表 4.1 屋面典型测点在不同风场中典型风向角下的偏度和峰度表

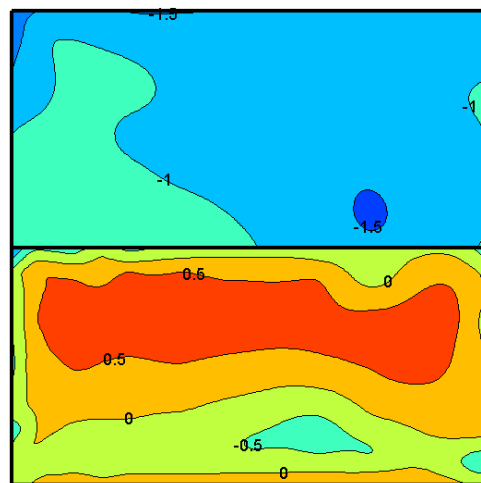
区域部位	测点号	风向角	B 类风场		C 类风场	
			偏度	峰度	偏度	峰度
迎风屋面屋脊山墙角部	1-2	0°	-0.23	4.01	-0.12	4.39
		45°	-0.10	3.25	-0.39	3.47
		90°	-0.79	4.19	-1.02	5.07
迎风屋面挑檐山墙角部	1-9	0°	-0.49	4.58	-0.32	4.03
		45°	-1.80	7.06	-1.95	7.98
		90°	-1.56	7.18	-1.80	8.73
迎风屋面挑檐边缘	1-20	0°	-0.07	2.98	-0.10	3.59
		45°	-0.82	4.61	-0.85	4.88
		90°	-0.81	4.57	-0.93	4.39
迎风屋面中央	2-11	0°	0.46	3.65	0.36	4.29
		45°	0.24	4.72	0.19	4.73
		90°	-0.86	4.48	-1.05	6.62
背风屋面屋脊山墙部位	3-1	0°	-0.71	4.43	-0.84	4.41
		45°	-2.24	12.43	-2.60	17.23
		90°	-0.99	5.69	-1.25	6.36
背风屋面中央	3-25	0°	-1.19	7.72	-1.19	8.10
		45°	-0.82	4.49	-1.02	4.97
		90°	-1.01	5.27	-1.20	7.04

表 4.1 中还可以看出，在相同风向角下同一测点在 B、C 两类风场测得的数

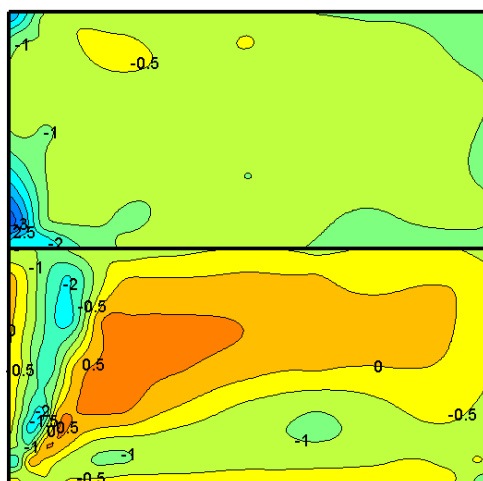
据的偏度和峰度也是不同的，绝大多数测点在 C 类风场的偏度的绝对值和峰度值要大于 B 类风场（C 类风场的湍流度要大于 B 类风场）。这说明来流风的湍流度对屋面风压的概率分布也有着极其重要的影响。



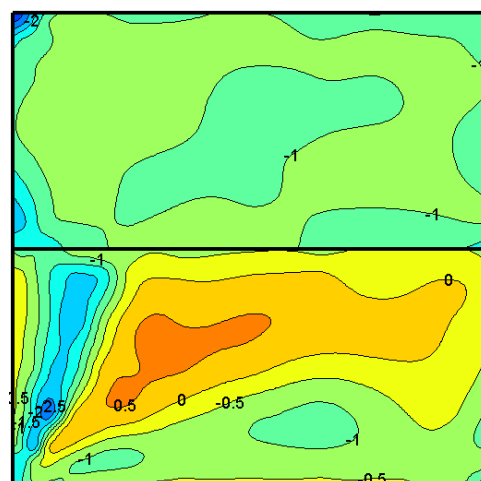
(a) 0° 风向角 B 类风场



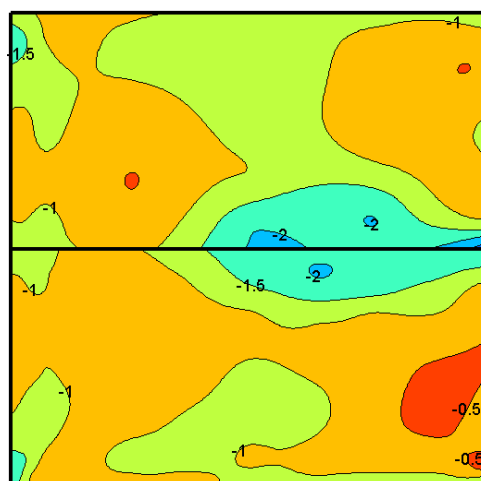
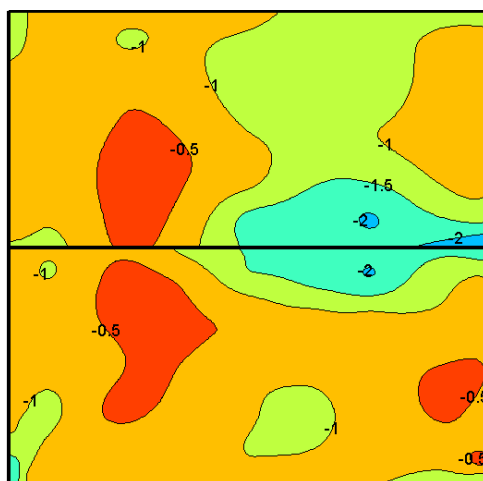
(b) 0° 风向角 C 类风场



(c) 45° 风向角 B 类风场



(d) 45° 风向角 C 类风场

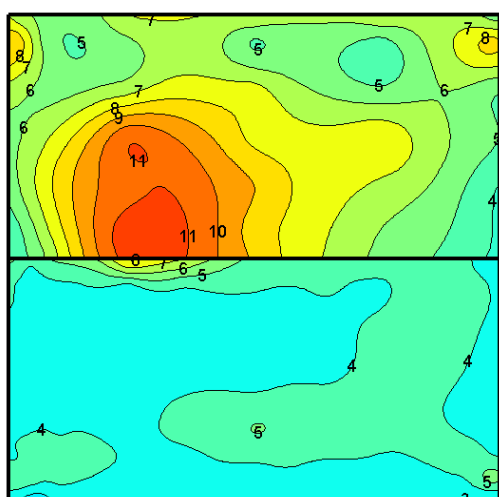


(e) 90° 风向角 B 类风场

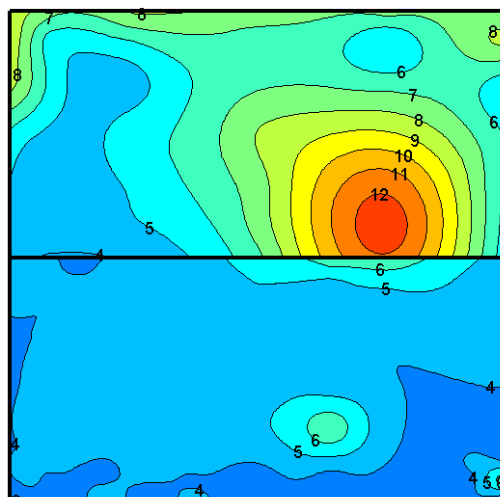
(f) 90° 风向角 C 类风场

图 4.5 三角挑檐双坡屋面两种风场不同风向角下的偏度系数分布图

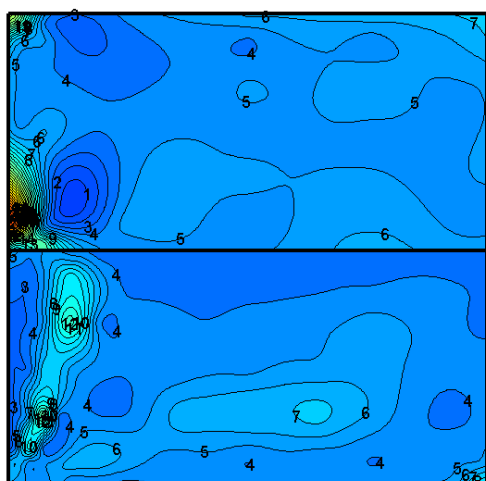
以三角挑檐双坡屋面为例，在湍流度不同的两种风场中三个风向角下的偏度系数分布图如图 4.5 所示。从图中可以看出在 0~90° 风向角下，整个背风屋面风压均是左偏态的非高斯分布，并且湍流度越高，偏度系数的绝对值越大，非高斯性就越强。0° 和 45° 风向角下在迎风屋面的风压右偏态的非高斯分布，高斯分布以及左偏态的非高斯分布同时并存，但是从 0° 到 45°，左偏态非高斯的风压分布区域不断增加，高斯分布以及右偏态非高斯分布的区域不断缩小，到 90° 是迎风屋面同背风屋面一样全部呈现左偏态的非高斯风压分布。在相同风向角下，湍流度越高，偏度系数的绝对值就越大。



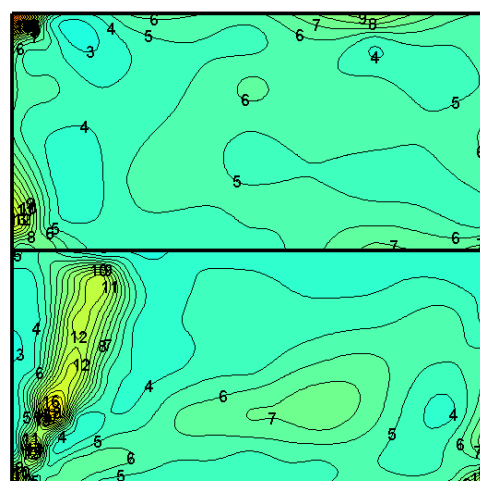
(a) 0° 风向角 B 类风场



(b) 0° 风向角 C 类风场



(c) 45° 风向角 B 类风场



(d) 45° 风向角 C 类风场

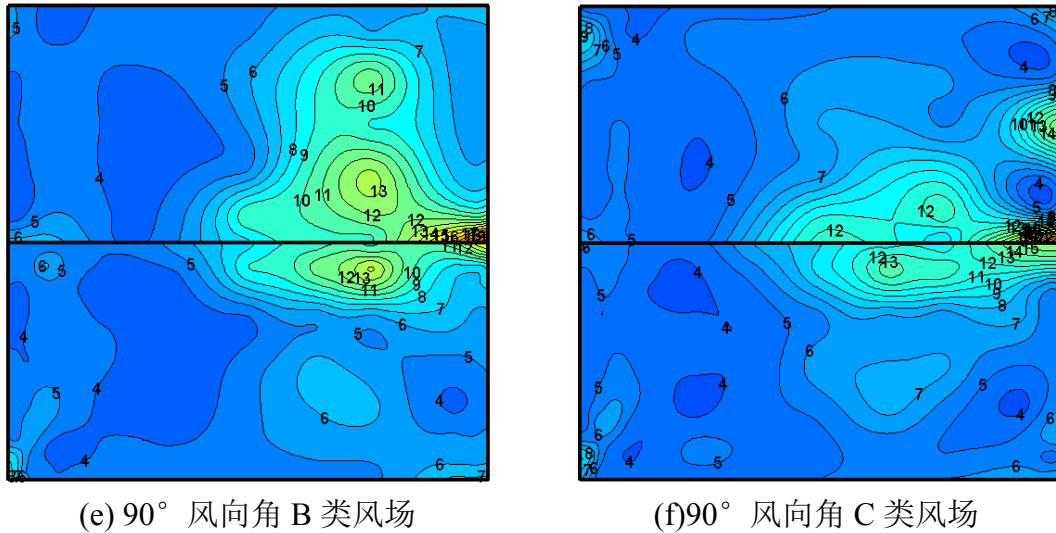


图 4.6 三角挑檐双坡屋面两种风场不同风向角下的峰度系数分布图

图 4.5 偏度系数分布图和图 4.6 的峰度系数分布图说明在屋面的来流分离区, 各测点风压时程的概率分布呈现明显的非高斯性, 具有明显的负偏态。这里需要说明的是由于本试验来流风场的湍流强度较大 (C 类风场湍流度为 25%), 导致风压非高斯性普遍较强, 峰度很少接近 3 的情况。0° 风向角下 (图 (a) 和图 (b)), 迎风面屋檐第一排测点在 B 类风场下显示出近似的高斯性, 不论峰度和偏度接近高斯分布, 而迎风屋面的末排测点则是非常明显地偏离了高斯分布, C 类风场下则整个迎风屋面均明显地显示了风压的非高斯特性。背风屋面在两种风场下均呈现出明显的非高斯性。45° 风向角下 (图 (c) 和图 (d)), 图中两个区域都是来流的分离区, 可以看出这两区域的测点都有较大的峰度和偏度, 屋面角部区域测点的非高斯性相当强烈, 并且概率密度呈现不规则的形状。90° 风向角下 (图 (e) 和图 (f)) 可以看出在迎风屋面和背风屋面在靠近屋脊的两侧区域的风压都具有较强的非高斯性, 而迎风面第一排测点的非高斯性并不是很强, 这主要是本模型工况的屋面倾角较大, 迎风屋面来流的分离并不强烈缘故。

由前一部分单个测点、典型区域中的典型测点以及整个屋面的统计特性的研究可以看出屋檐、屋角和屋脊区域的偏度和峰度较大, 风压呈现较强的非高斯性, 这是屋面结构易受破坏的直接原因。因而, 风压的非高斯特性对风压极值估计的影响很早就受到研究人员的关注^[119]。对于非高斯特性产生的原因以及非高斯风压在空间和时间上的传递状况也做了较多的研究。就其原因目前已经达成较为一致的认识, 从宏观来讲, 主要是来流剪切层的分离及随后产生的漩涡和来流的重附。而这些则取决于来流的特性、来流的方向和结构的几何形状。不过已经认识到垂直来流时产生二维的分离泡和倾斜来流时产生的三维锥形漩涡是风压呈现非高斯性的直接原因。从微观来讲, 风压呈现非高斯性的主

要原因是来流风的分离破坏了流体的内部结构^[101]。

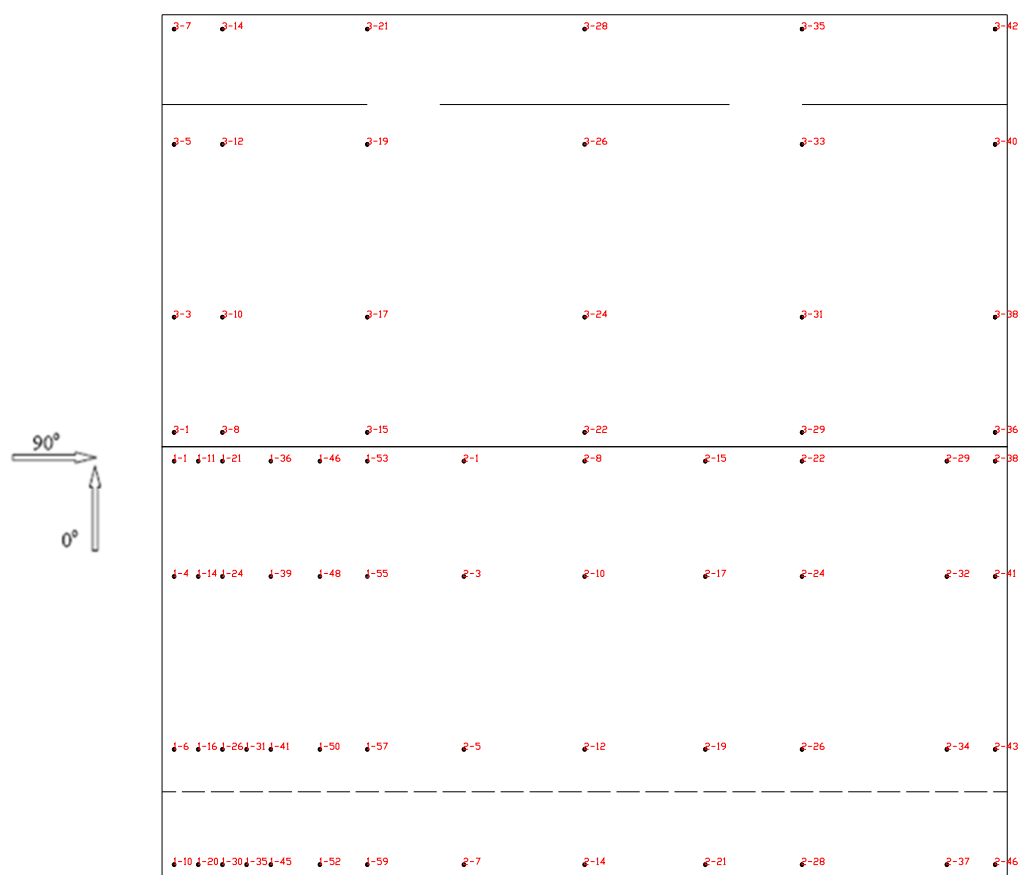
4.3 非高斯特性与风压的空间相关性

Ham^[102]认为屋盖表面风场的涡旋运动与屋面风压的这种大幅值的风压峰值脉动现象有着密切的关系，而大幅值的风压峰值现象是导致屋面局部构件破坏的主要原因。大气中包含有许多不同尺度的涡旋，而空间每一点都可能是强度随机变化的涡旋的中心点，并由该点向周围传送能量，并在接触到的壁面上产生压力，这是空气动力学中点涡的模型的基本思想^[103]。作用在屋面上的风压可以看成是屋面上方大量的点涡叠加作用的结果，而对于大面积上的风荷载，由于流场中的空间相关性衰减得很快，相关性很小，因而可以认为空间每个点涡的作用是相互独立同分布的，由中心极限定理（中心极限定理表明在大量随机变量相互独立同分布的前提下，只要有足够多的随机变量相加则随机变量之和的分布将会趋于高斯分布。）可以得知其作用之和可以体现为高斯分布的性质。但是，如果屋面局部区域其上方存在有组织的涡旋结构，或是屋面处于尺寸比较大的气旋之中时，那么作用于屋面的风压的空间相关性会很强，此时中心极限定理的前提条件已经不满足了，因而风压信号就会表现出非高斯特性。

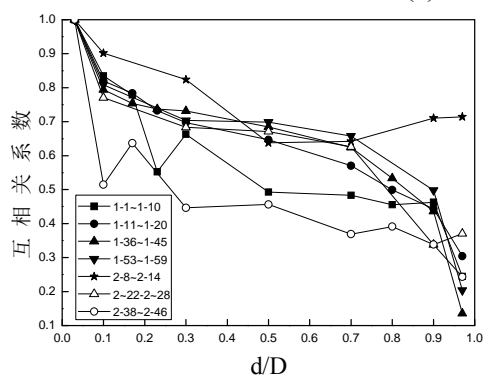
每一个屋面测点的风压都是一个随时空变化的随机变量，在实际应用中人们往往运用相关系数来判断任意两个测点上的风压的相关程度。任意两个测点风压的互相关系数还能够反映屋面空间流场的结构及其传播方式。相关系数没有单位。在-1~+1 范围内变动，其绝对值愈接近 1，两个变量间的直线相关愈密切，愈接近 0，相关愈不密切。相关系数若为正，说明一变量随另一变量增减而增减，方向相同；若为负，表示一变量增加、另一变量减少，即方向相反。一般来说相关系数的绝对值在 0~0.3 表示相关程度低普通，0.3~0.5 表示相关程度普通，0.5~0.7 表示相关程度显著，0.7~0.9 表示相关程度高，0.9~1.0 表示相关程度极高。

（1）三角挑檐双坡屋面

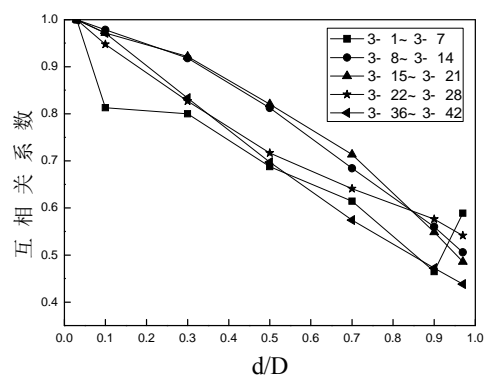
从图 4.7 可以看出，0° 风向角下迎风屋面顺风向，各排测点的相关性基本一致，只有屋面中央的一排测点全部处于强相关，其它各排测点在气流分离区的前三排测点的空间相关性很强，其它测点相关性很弱，屋面边缘的测点与屋脊线附近的测点基本上不相关，在屋脊处气流进行二次分离，整个背风屋面的非高斯性都很强，而背风屋面测点的相关性（除去最边缘的一排点）相关性都很强，这说明整个背风屋面的非高斯特性非常明显，出现负极值的几率要比迎风屋面大很多。



(a) 风向及测点布置图



(b) 迎风屋面



(c) 背风屋面

图 4.7 0°风向角 B 类风场顺风向相关图

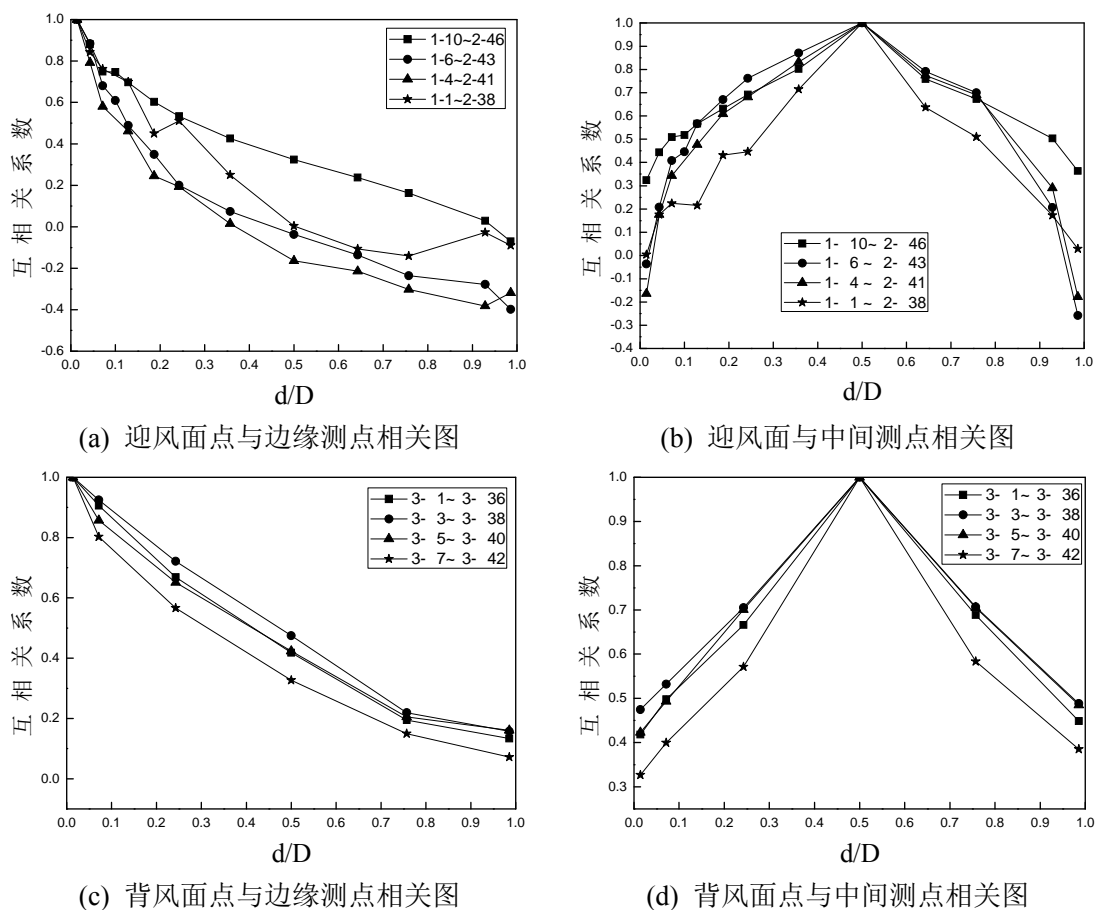
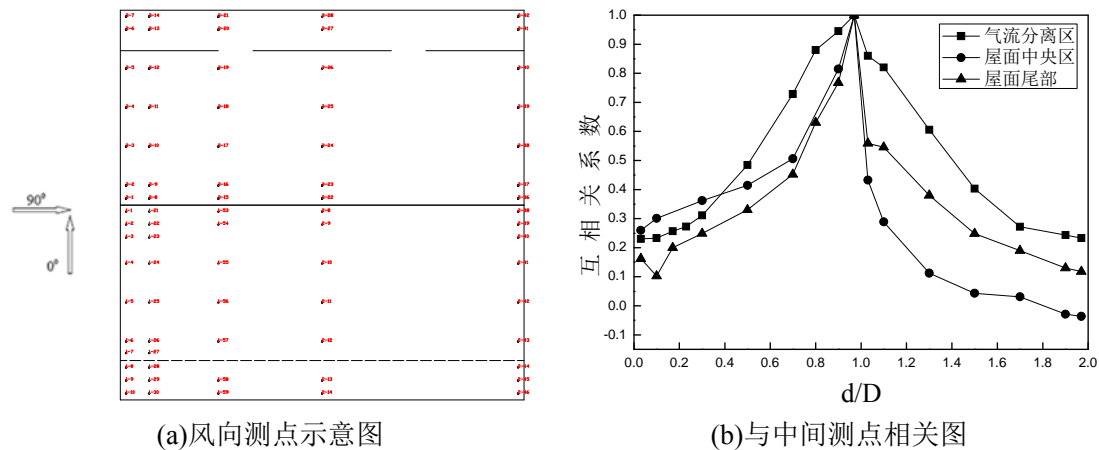


图 4.8 0° 风向角横风向相关图

0° 风向角下横风向的测点的空间相关性曲线基本一致（见图 4.8）。在横风向测点的空间相关性展现的是作用于屋面表面涡旋的特性，涡旋横断面的一侧测点与在距离山墙大于 0.1 倍的建筑物长度的距离的其它测点的相关性由强相关迅速衰减的相关性依次减弱，直至弱相关，甚至到负相关。屋面中心测点与其它测点的相关性呈对称递减。可以看到屋面中心部分的非高斯性比较强，风压脉动的幅值比较大。



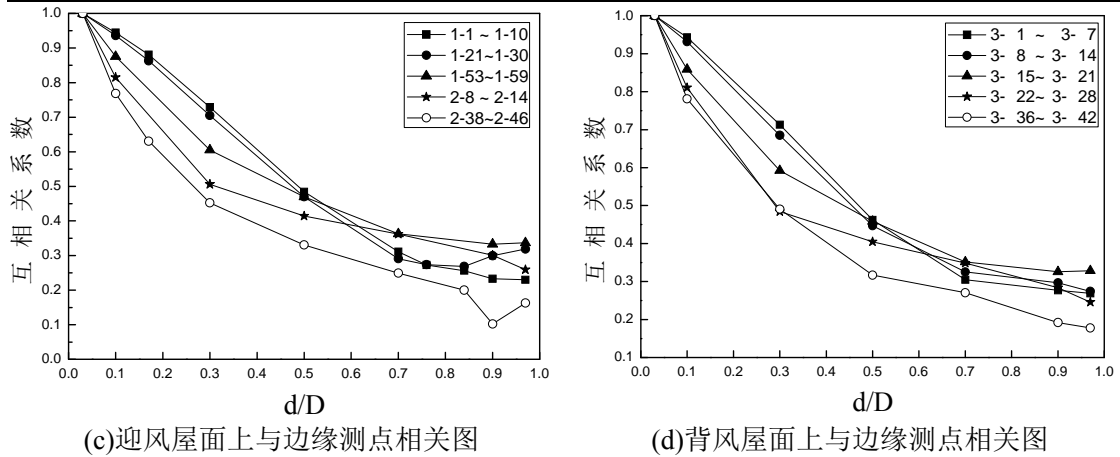


图 4.9 B 类风场 90° 风向角横风向相关图

90° 风向角下在横风向下两个屋面上各排点的相关性曲线也基本一致(各排测点连线均垂直于屋脊线, 见图 4.9)。分别选取在迎风边缘气流分离区、屋面中央区和屋面尾部区的三排测点, 各排屋脊测点与其他测点的相关性如图所示。在距离屋脊线大约 0.2 倍的建筑物宽度的测点相关性极强, 之后屋脊测点与其它测点的相关性迅速减小, 直到弱相关, 屋面中央区和尾部区的衰减速率要比迎风边缘来得大。

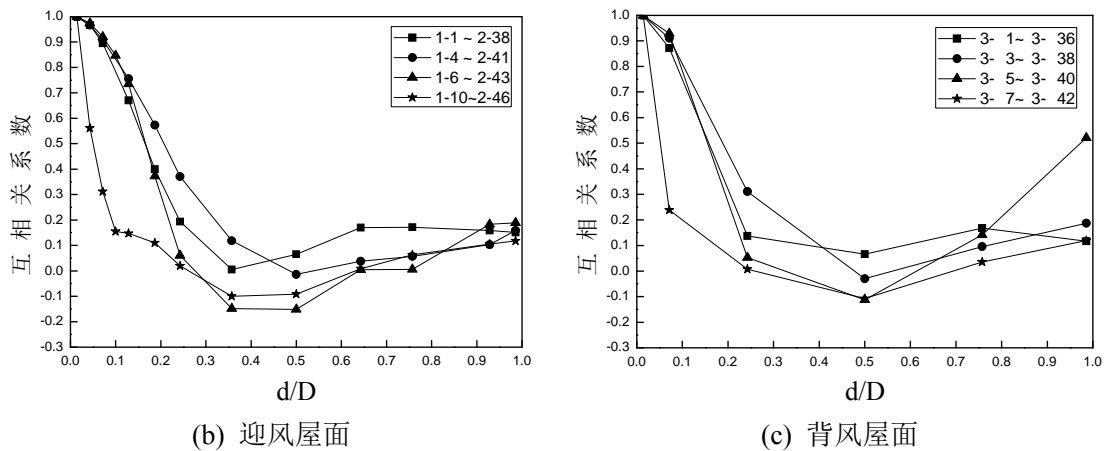
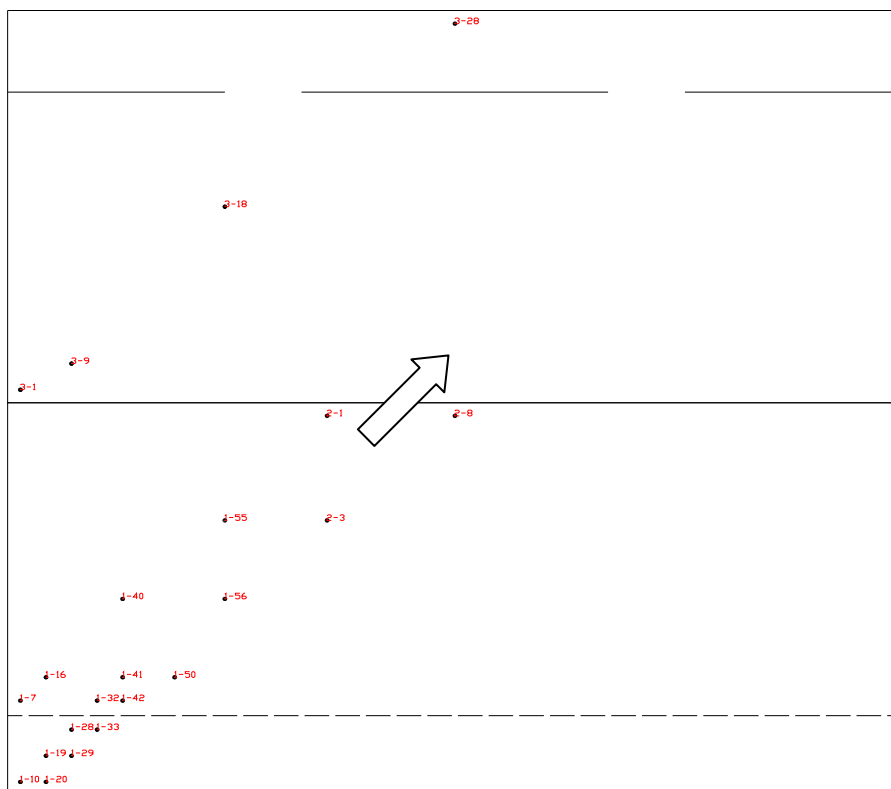
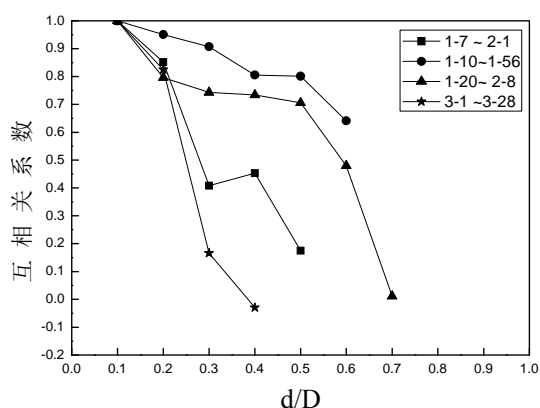


图 4.10 B 类风场 90° 风向角顺风向相关图

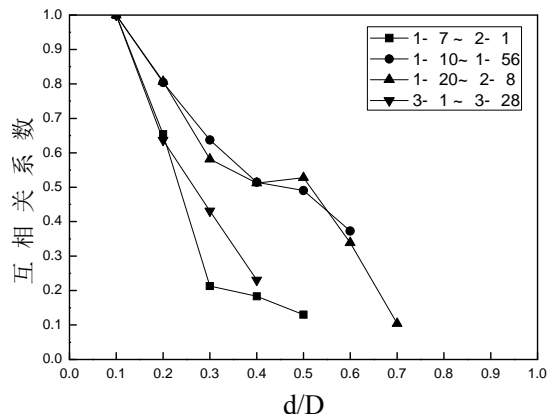
双坡屋面在 90° 风向角下在顺风向下(与屋脊线平行)各排测点分别与各自屋面分离区的测点的相关系数如图 4.10 所示。迎风屋面和背风屋面在 90° 风向角下的流场中是关于屋脊线对称的, 因而两个屋面的相关系数曲线所呈现的规律十分相似。在顺风向上, 风压的脉动在各列测点的传播是一致的。由于在迎风屋面布置测点比较密集, 所呈现的规律更加明显, 从图中可以看出大约在距离迎风分离边缘 0.2 倍的建筑物长度的区域的测点相关性很强, 但之后中部以及后缘区域的测点衰减的很快, 均为弱相关, 甚至在屋面中部的点还出现了几乎不相关, 很弱的负相关。



(a) 风向及测点布置图



(b) 顺风向



(c) 横风向与边缘测点相关图

图 4.11 B 类风场 45° 风向角屋面相关图

在 45° 风向角下，来流风由迎风屋面的 45° 斜线吹来，在顺风向除 45° 连线方向的测点相关性较强（见图 4.11），并沿着连线方向逐渐衰减，其他同方向的测点间的相关性也都比较强，只是在末端的点相关性很差，几乎不相关，但是在背风屋面只有靠近屋脊山墙顶部的测点相关性强，其余测点几乎不相关；在横风向各个测点的相关系数曲线衰减的很快，这说明在 45° 风向角下只有在顺风向的带状区域内风压呈现非高斯性，其他区域测点的相关性很弱，几乎不相关，可以认为近似属于高斯分布。

(2) 平屋面

平屋面 0° 顺风向指的是来流风的方向与平屋面的短边平行，顺风向以及横风向选取的测点布置如图 2.5 (b) 所示，在顺风向的这四排测点大致都是在距离分离边缘 0.2 倍的边长的测点之间有比较强的相关性。1-1~1-14 这一排测点最靠近屋面边缘，可以发现随着距离迎风边缘（气流的分离边缘）越来越远，测点之间相关性下降的速率是这四排点中最快的，越是在屋面中央的测点顺风向相关系数则下降比较慢，相关性比较强。从第二章的图 2.18(a)平屋面脉动风压分布图可以验证在 0° 风向角下中央区域要比两侧的边缘区域梯度变化缓慢，数值也要大。相关性比较强的区域，脉动风压也比较大，也就是非高斯性更加明显。

图 (b) 中在 0° 风向角的横方向可以发现处于分离前缘的第一排侧点 (1-14~1-29) 的相关性最强，相关系数大部分都在 0.5 以上，可以认为是相关性显著，第二排次之，有三个点小于 0.5 可以认为是弱相关了，后面三排点几乎只有相邻的两个测点相关性显著了。图 (a)、图 (b) 可以充分说明 0° 风向角下，在垂直于风向距离分离边缘 0.2 倍 d/D 带状区域内，所有测点具有很强的相关性，这也是风压脉动性最强，非高斯性最强的区域。

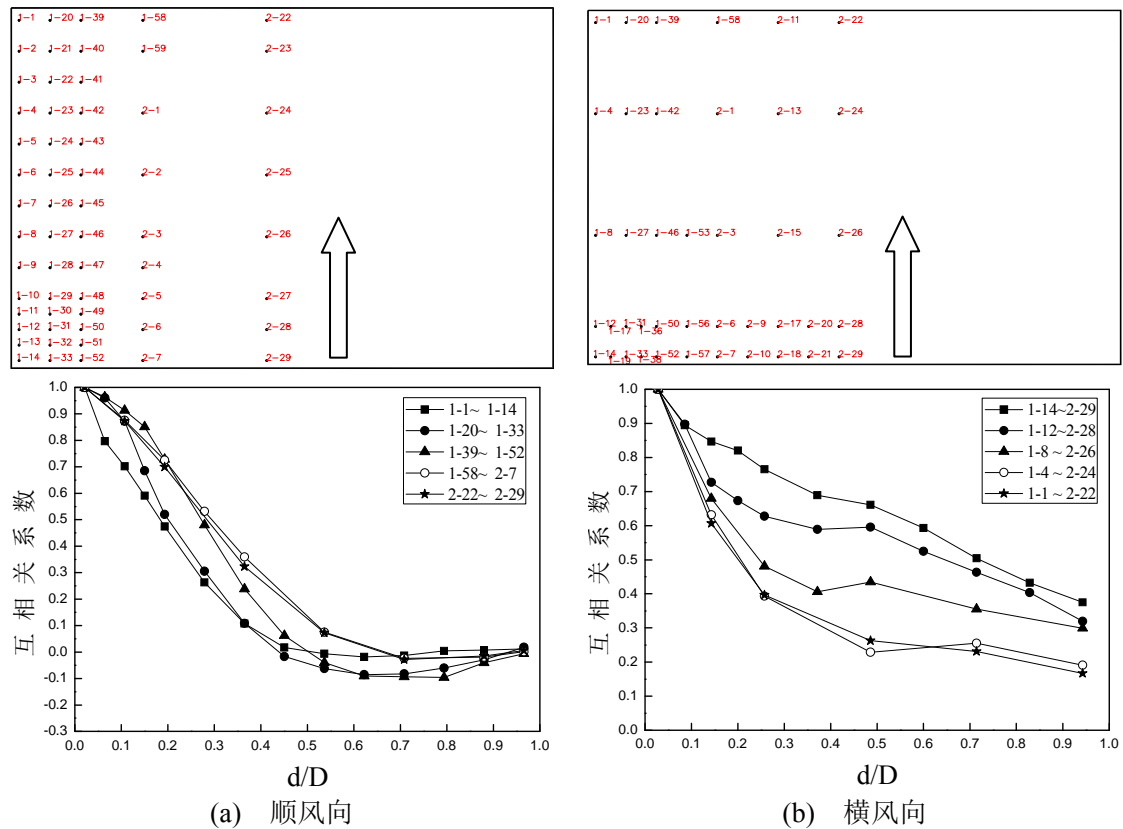


图 4.12 B 类风场 0° 风向角测点布置示意图及屋面风压相关性图

45° 风向角下选取的测点是在屋面 45° 角平分线两侧的平行带状区域（见

图 4.13)。图 (a) 中可以明显地看到位于 45° 角平分线上的那一排测点在 0.1 倍的 d/D 区域内才有比较强的相关性, 而且顺着风向相关性迅速下降到不相关, 位于 45° 角平分线的其他四排侧点相关性下降更加迅速, 这说明在斜风向角下, 相关性显著的区域是沿着风向角方向距离气流分离点很近的角部区域。

(b) 图中的垂直与 45° 风向的横向相关性折线图可以看到, 只有与屋面边缘夹角很小的狭长扇形区域的测点的相关性很强, 中间很多区域测点的风压系数几乎不相关, 这与图 2.19 (a) 中显示平屋面 45° 脉动风压分布图相吻合, 高脉动区域真是与屋面边缘形成的两条扇形区域, 关于 45° 角平分线对称。这些相关性显著的测点所在的区域正是屋面非高斯性强的区域。

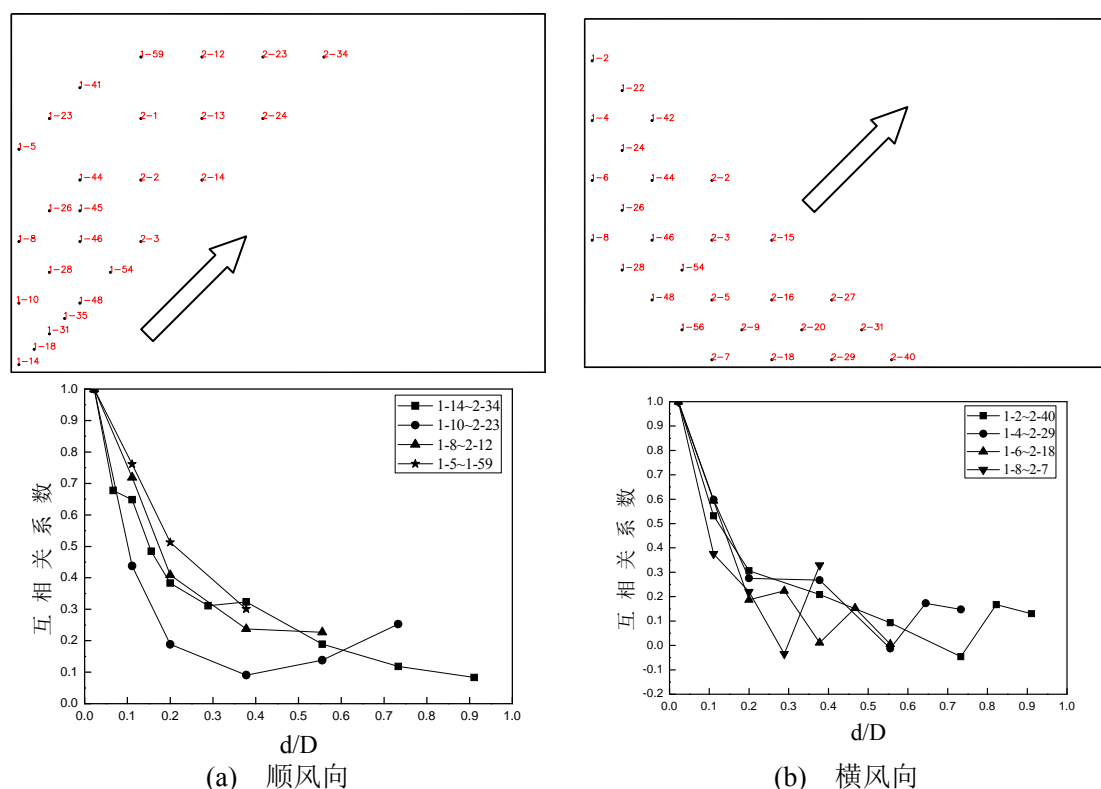


图 4.13 B 类风场 45° 风向角测点布置示意图及屋面风压相关性图

4.4 屋面风压的概率分布

低矮房屋传统的设计方法一般是假定表面风荷载服从高斯分布, 国内外的许多风荷载规范都是以此假定为基础的研究制定的。这种假定如果计算结构荷载或是等效静力荷载分布还是比较安全的, 但是如果计算低矮房屋的围护结构尤其是风灾中最容易破坏的屋面结构显然很不合理的。在围护结构的设计和荷载计算中, 设计人员最关心的是结构的最不利风荷载, 也就是表面测点的最大极值系数和最大负极值系数。由前文的研究可以知道, 在屋面风压的概率分布

并不是一直遵从高斯分布的（尤其是气流分离区域的风压），只有部分测点在某些工况下可以认为是服从高斯分布，而这些区域的非高斯风压的最大极值荷载往往是整个屋面设计的控制荷载。那么所有测点的风压如果都按照高斯分布进行计算，所得的结果就可能偏于不安全。因而寻找并确立适合的数学模型（或数学方法）能够准确的描述风压的概率分布，是确定围护结构表面风压极值的关键。由于意识到局部风压的非高斯特性，准定常理论不能用于预测来流分离区风压的概率分布，国内外的许多学者做过多种探讨，希望找到比较近似的数学模型，来重新建立风压的概率分布。

目前描述风压概率分布的数学模型一般有两种方法：一种是以风压的风洞试验数据或是实测数据为基础，利用现有的概率密度函数对其进行拟合，从而得到最佳概率密度函数；另一种是由风压时程曲线得到随机过程的前四阶矩，以此为基础由级数或是由多项式扩展来得到非高斯风压的概率密度函数^{[120][121]}。

文章采用第一种方法，以现有的概率密度函数来拟合本人风洞试验数据，得到其最适合的概率密度函数。许多研究非高斯风压概率分布的文献^{[122][126]}显示 Lognormal 分布、Weibull 分布和三参数 Gamma 分布最适合描述具有非高斯性的风压。Melbourne^[127]和 Stathopoulos^[97]分别用 Gumbel 分布和 Weibull 分布预测了尾部的概率分布；Chen^[124]、黄翔^[128]、栾桂汉^[126]等人通过引入坐标平移量的方法使风压系数全部在各概率分布函数定义域内，并确定坐标平移量为时程中的最小值。并认为 Weibull 分布的长尾部与实际风压分布函数的长尾部拟合最好。Q.S.Li 等人^[122]通过风洞试验获得棱柱体在不同湍流度下表面风压的时程数据，经过对比研究发现 Lognormal 分布要比 Gumbel 分布和 Weibull 分布拟合的好。陈斌^[]通过低矮建筑风洞试验获得的风压时程数据对多个工况进行拟合，确定利用对数正态分布（Lognormal 分布）和广义极值分布（GEV 分布）描述屋面风压的概率分布较为准确，而对数正态分布（Lognormal 分布）则显得比较有优势。但是也发现利用单一的概率密度函数拟合整个屋面上所有测点上具有很强随机性的风压系数是困难的，对于不同的风压系数时程并没有一致性。Sadek & Simiu^[125]采用概率图相关系数（PPCC）法，此方法以概率图相关系数为评判标准确定概率曲线的拟合程度，通过利用指数分布、正态分布、对数正态分布、Gumbel 分布、Weibull 分布和 Gamma 分布拟合时程的概率曲线，确定三参数 Gamma 分布最适合描述低矮建筑框架的内力时程。基于 Sadek & Simiu 的思路，Zhongfu Ge^[129]对低矮建筑风洞试验获得的表面风压数据进行拟合也发现三参数 Gamma 分布最适合描述风压的概率分布。

Weibull 分布、Lognormal 分布和 Gamma 分布，通常使用两参数的分布形

式，而且它们的定义域为 $[0, +\infty)$ ，但是屋面的风压系数大都为负值，所以在两参数的基础上引入一个位置参数 μ ，使其定义域由原来的 $[0, +\infty)$ 变成 $[\mu, +\infty)$ 。

$$\text{三参数的 weibull 分布 } p_x(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\mu}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{x-\mu}{\beta} \right)^\alpha \right], & x \geq \mu \\ 0, & x < \mu \end{cases} \quad (4.3)$$

其中， α 称作形状参数 (Shape parameter)， β 称作尺寸参数 (Scale parameter)。

α 为无量纲的量， β 与 x 具有相同的量纲。位置参数 μ 给出了 x 的下界值。

三参数的 Lognormal 分布：

$$p_x(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(\ln(x-a) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.4)$$

三参数的 Gamma 分布：

$$p_x(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} (x-\mu)^{\gamma-1} e^{-\frac{x-\mu}{\beta}} \quad (4.5)$$

4.4.1 双坡屋面

本文以三角挑檐双坡屋面模型为例，采用其在 B 类风场下的风压数据来拟合双坡屋面的风压概率密度分布。图 4.14~图 4.18 中分布给出了三角挑檐双坡屋面在 0° 、 45° 、 90° 风向角下非高斯典型区域测点的概率密度函数拟合比较图。从图中可以看出在不同的工况下 weibull 分布、Lognormal 分布、Gamma 分布可以分别比较准确地拟合屋面风压的概率密度函数，而正态分布则大都严重偏离。

在 0° 风向角下在迎风屋面和背风湿面的角部测点的概率密度函数拟合图如图 4.14、图 4.15 所示。由于试验模型的屋面坡度为 30° ，属于比较陡的坡度，除去迎风屋面挑檐前缘或屋面山墙边缘的测点平均风压为负，屋面其他部分呈现正风压区，而其偏度值多为呈现正偏态，从图中可以比较出在这一区域 weibull 分布拟合的比较好，而且偏度值越大，在右边的尾部 weibull 分布就拟合的越理想，其他两个分布拟合情况都不太好，有较大偏离。但是气流在屋脊处发生二次分离后整个背风屋面就呈现负压区，而且偏度值均为负值，属于负偏态，概率密度函数拟合最关心的是负向的尾部区域。三个分布中以 Gamma 分布的拟合情况最好，Lognormal 分布在很多工况与其不分伯仲；但是在正向尾部区 lognormal 分布拟合的较好，Gamma 分布则不太理想。

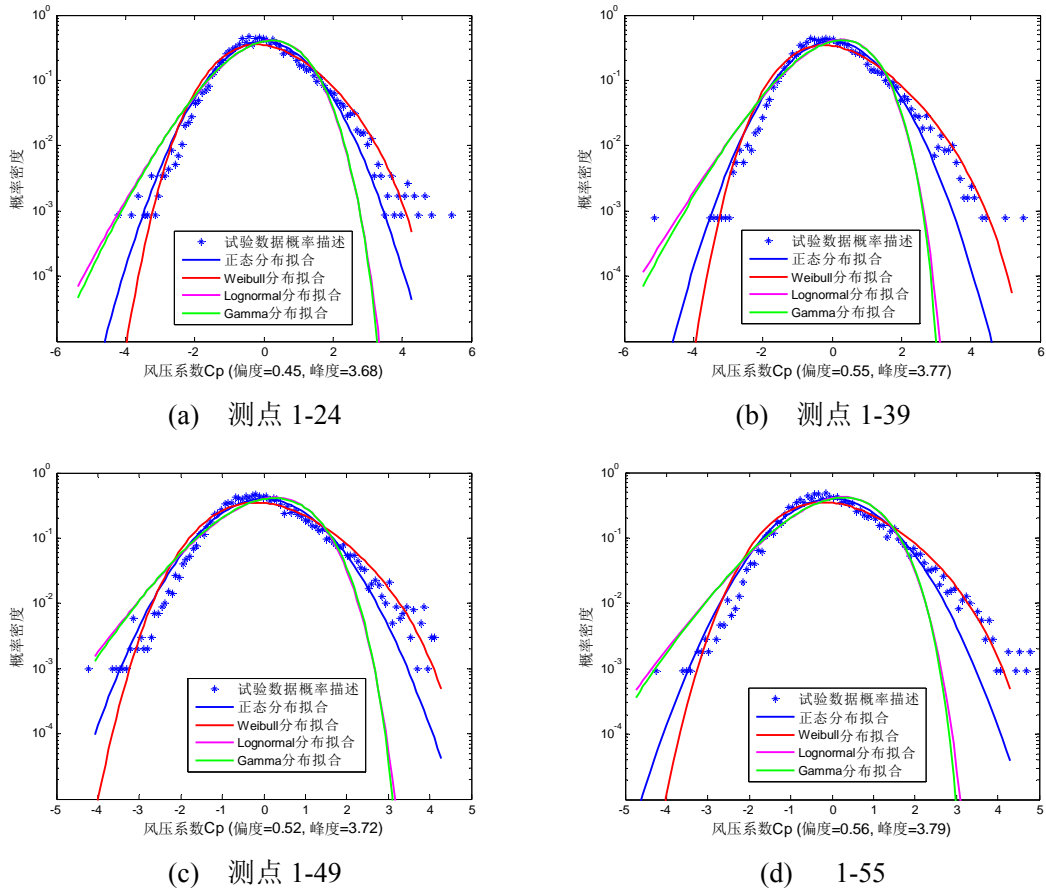
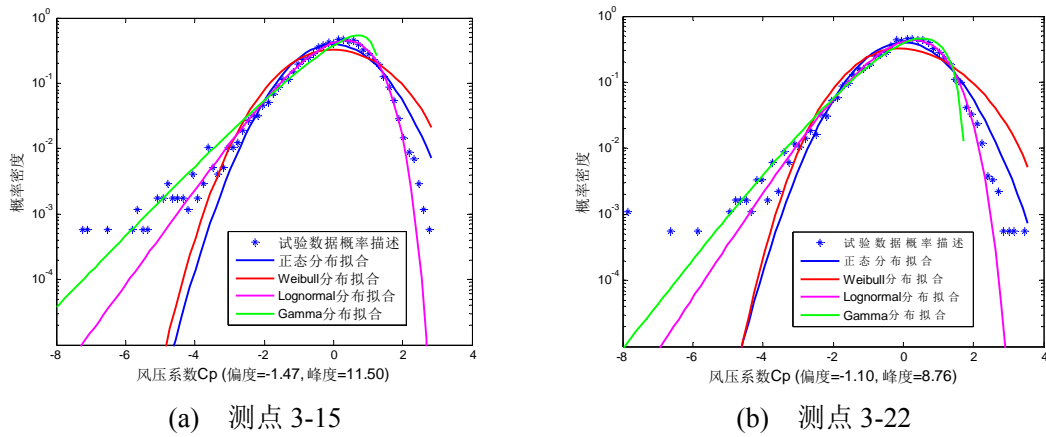
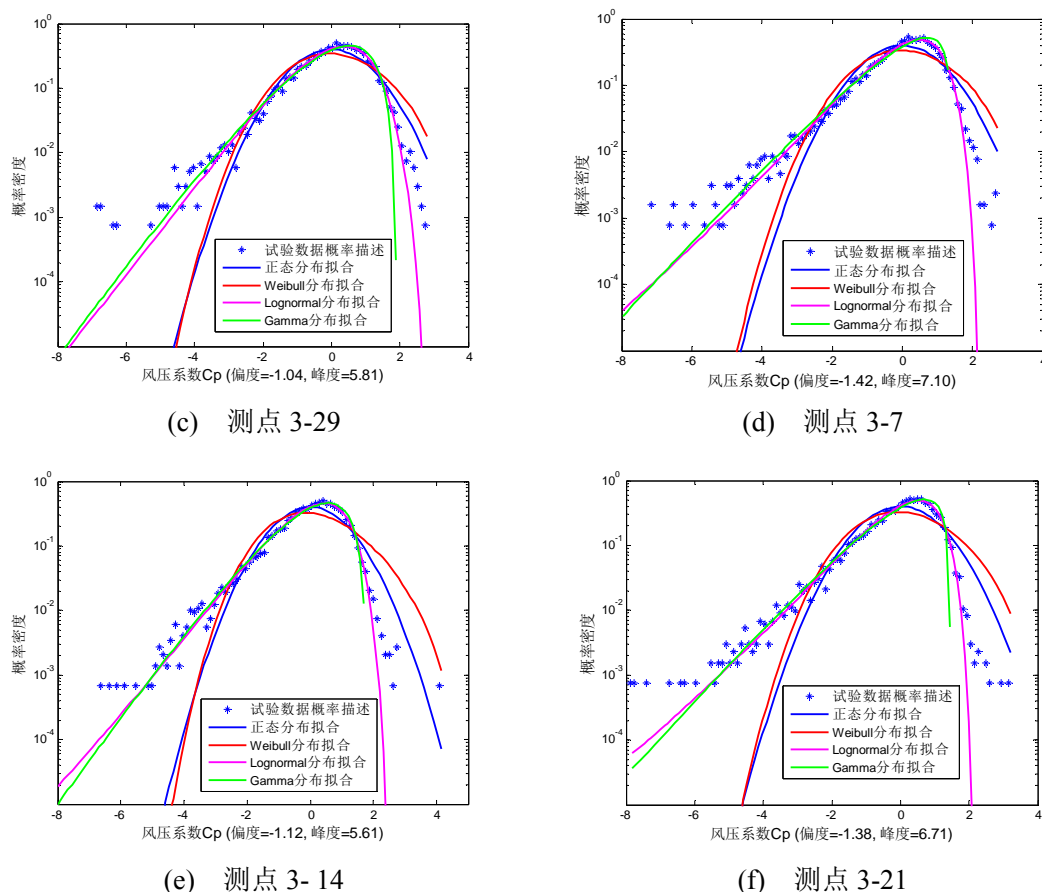


图 4.14 三角挑檐屋面 0° 风向角下迎风屋面典型测点概率密度拟合图



图 4.15 三角挑檐屋面 0° 风向角背风屋面典型测点概率密度拟合图

在 45° 风向角下在迎风屋面和背风屋面的角部测点的概率密度函数拟合图如图 4.16、图 4.17 所示。在迎风屋面上屋面角部的六个测点在负向的尾部的概率分布拟合，Lognormal 分布和 Gamma 分布拟合的都比较好，第一排的三个测点是 Lognormal 分布拟合的趋势比较理想，第二排则是 Gamma 分布好一些，正态分布和 Weibull 分布则偏离太多，但是从总体的拟合来说 Lognormal 分布更加适合这些测点的概率分布；在背风屋面的角部测点中拟合的情况也比较类似，总体来说 Lognormal 分布拟合的程度（无论是正向尾部还是负向尾部）比其他三个分布要好的多，在比较关键的负向的尾部区域 Gamma 分布拟合的程度与 Lognormal 分布不分轩轾，部分测点还更加理想。

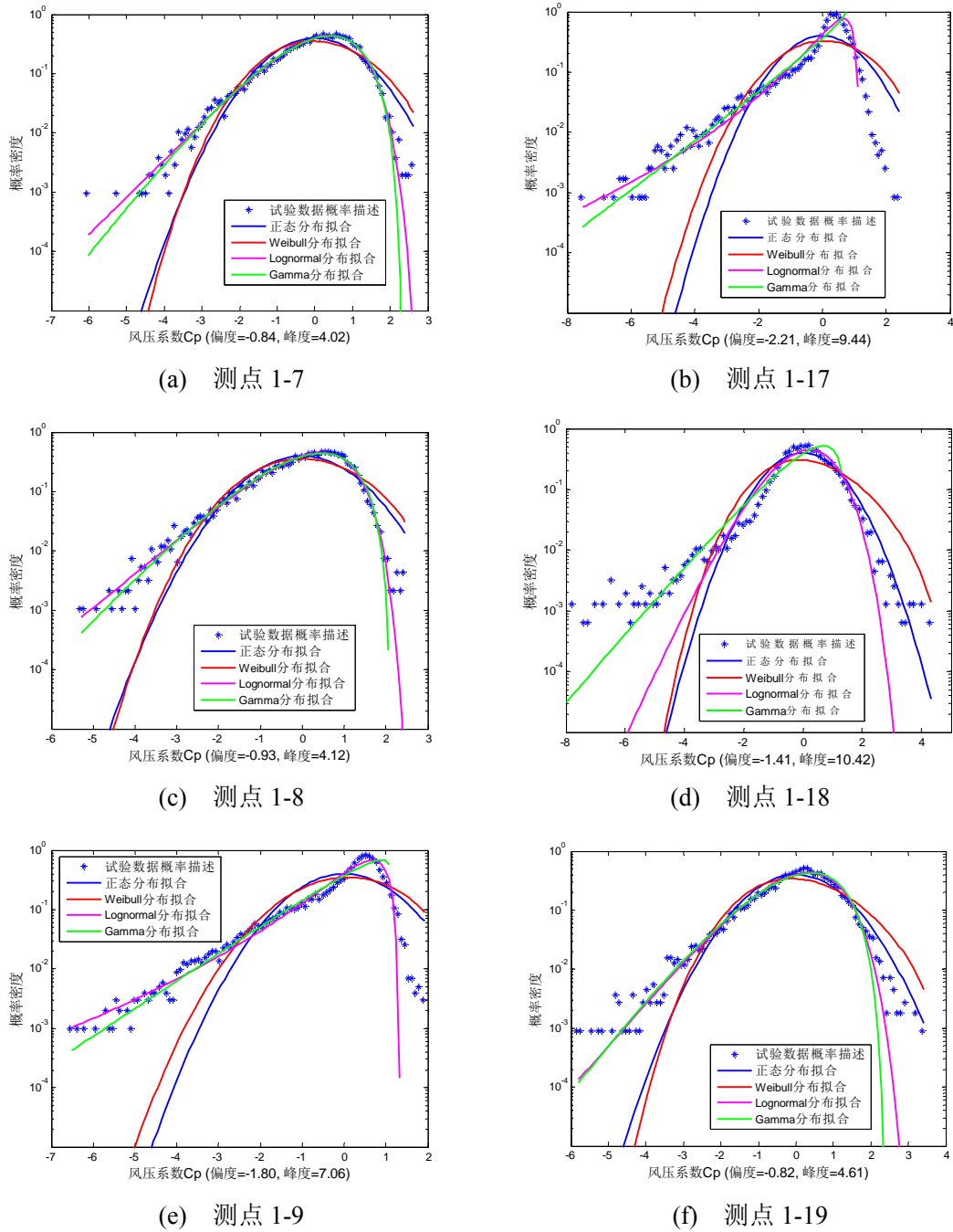


图 4.16 三角挑檐双坡屋面 45° 风向角迎风屋面角部区域测点概率密度拟合图

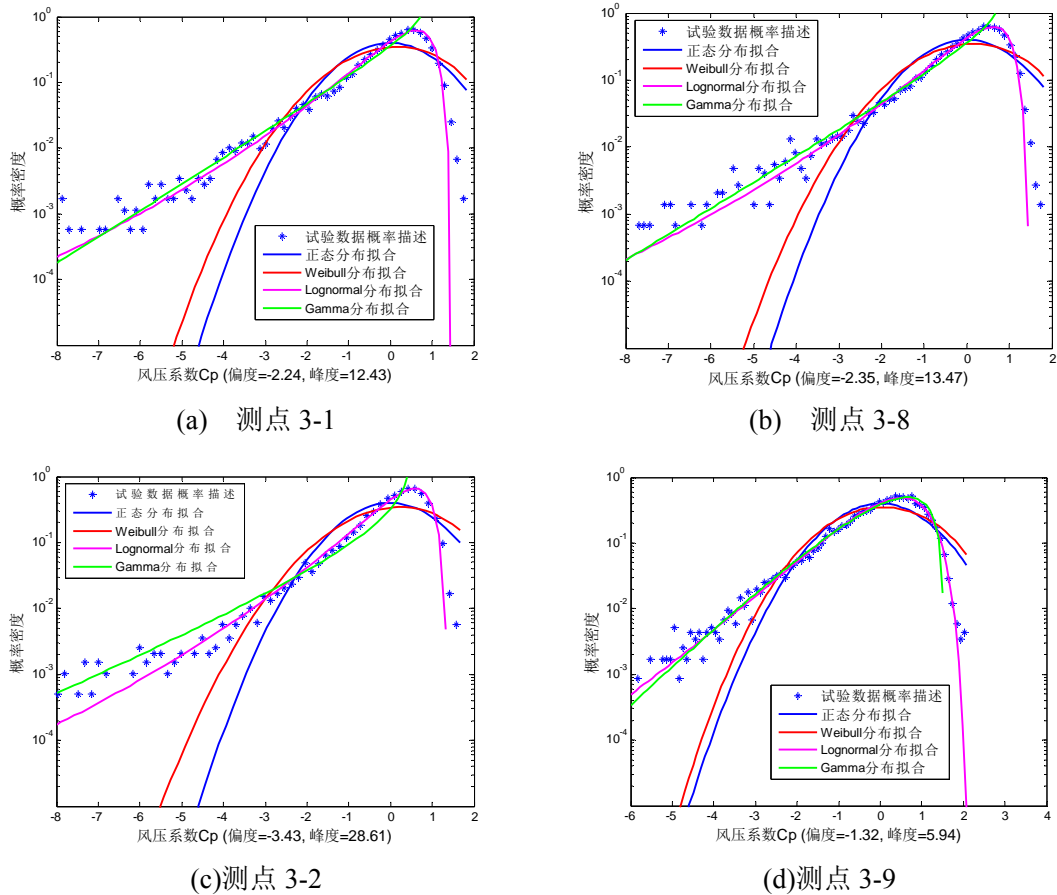
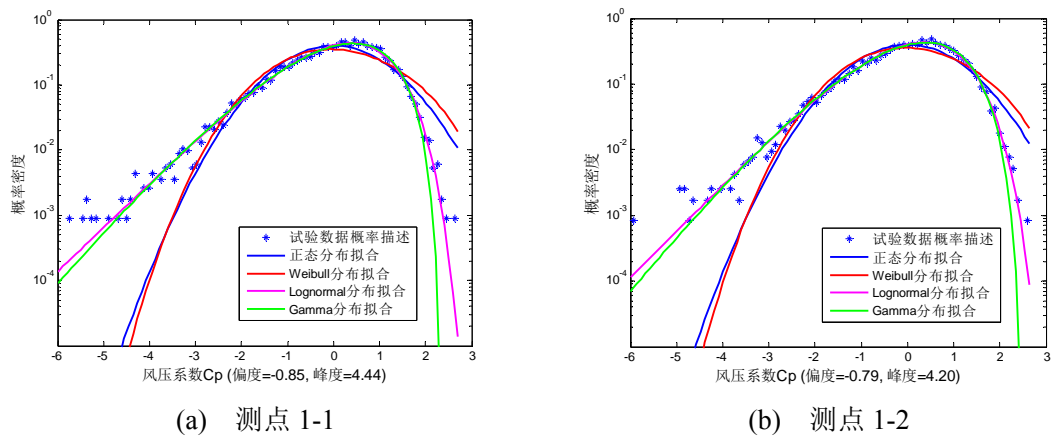


图 4.17 三角挑檐双坡屋面 45° 风向角背风屋面角部区域测点概率密度拟合图

在 90° 风向角时整个屋面全部处于负压的控制区，位于迎风边缘分离区第一排测点的偏度也全部为负值，峰值都很大（见）。从图中可以看出仍然是 Lognormal 分布和 Gamma 分布都可以很好的拟合比较关注的负向的尾部区域，但是在正向的尾部区域 Lognormal 分布拟合的更加完整，Gamma 分布总是有偏离（可能是参数估计的误差导致）。



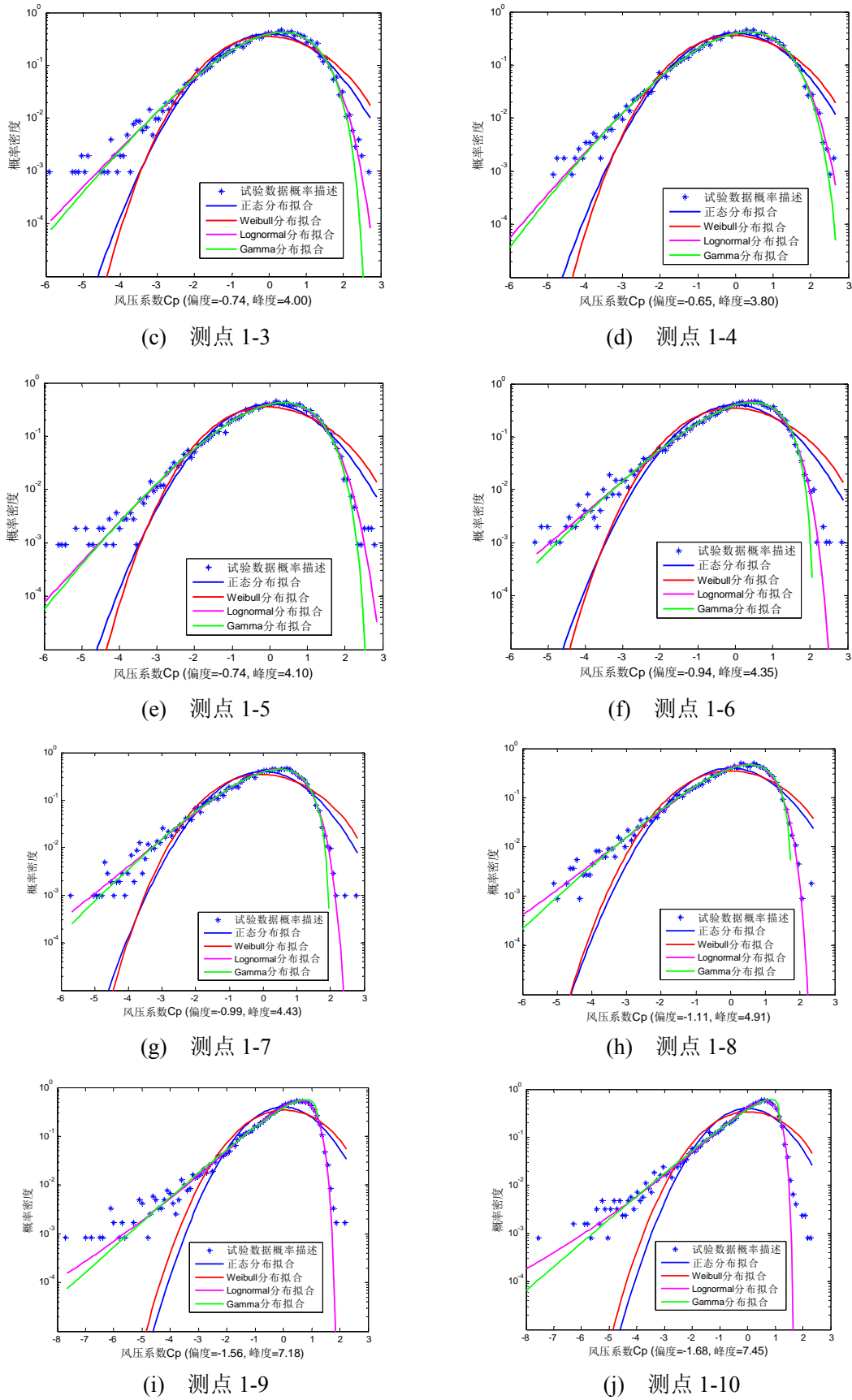


图 4.18 三角挑檐双坡屋面 90° 风向角迎风边缘第一排测点概率密度拟合图

4.4.2 平屋面

平屋面由于屋面坡度很小，任何风向角下的屋面测点的风压系数都是负值，整个屋面都处于负压控制，从图中的风压系数的偏度和峰度值来看，其绝对值都要比相同尺寸的双坡屋面（相同的长度、宽度和屋檐高度）要大许多。本文选取 0° 风向角下迎风边缘 6 个测点，斜风向 45° 屋面角部 10 个测点以及 90° 风向角 6 个测点，鉴于文章篇幅，展示三个风向角 6 个典型测点的概率密度函数的拟合曲线图，其他测点的拟合图见附录 B。

图 4.19~图 4.21 给出了平屋面在比较典型的 0° 、 45° 以及 90° 风向角下的典型测点的四种概率密度函数的拟合曲线。从图中可以看出，Weibull 分布同正态分布(Gaussian 分布)一样都很严重地偏离了各测点的概率分布，Lognormal 分布和 Gamma 分布则都可以很好地拟合了平屋面风压的概率分布图。在负向极值出现的负向尾部区域，Lognormal 分布拟合的情况要比其他分布拟合的要理想的多，Gamma 分布拟合的概率密度曲线在一些测点上要优于 Lognormal 分布。但是在正向的尾部区，Lognormal 分布的拟合情况最优。

从双坡屋面和平屋面的概率密度分布拟合图来看，不同偏度的测点的非高斯分布的概率密度函数所适用的概率分布是不同的，要用一种概率密度函数拟合所有非高斯区域所有测点的风压时程那是非常困难的。对于右偏态的非高斯分布，weibull 分布拟合的情况最好；对于屋面控制荷载的负压区（左偏态）的概率分布，Lognormal 分布和 Gamma 分布拟合的情况都很理想，从总体来看（无论是负向尾部区还是正向尾部区）Lognormal 分布拟合的情况更优。

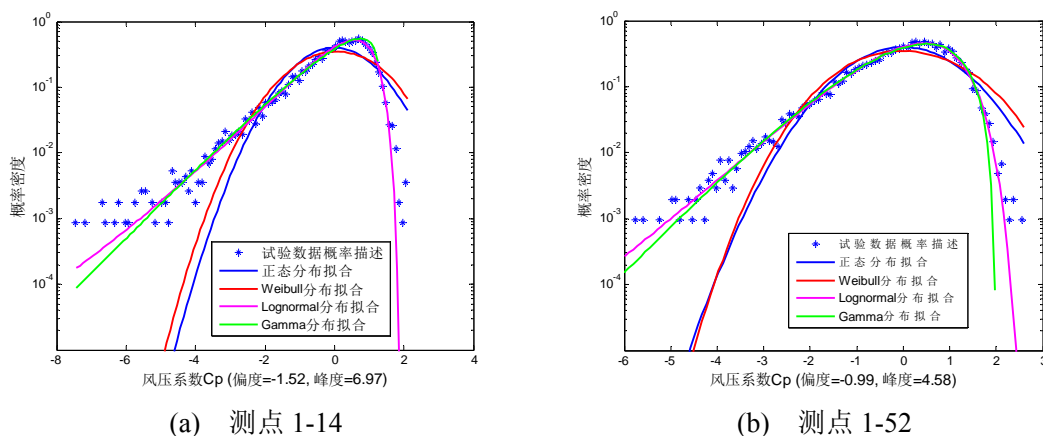


图 4.19 平屋面 0° 风向角角部区域测点概率密度拟合图

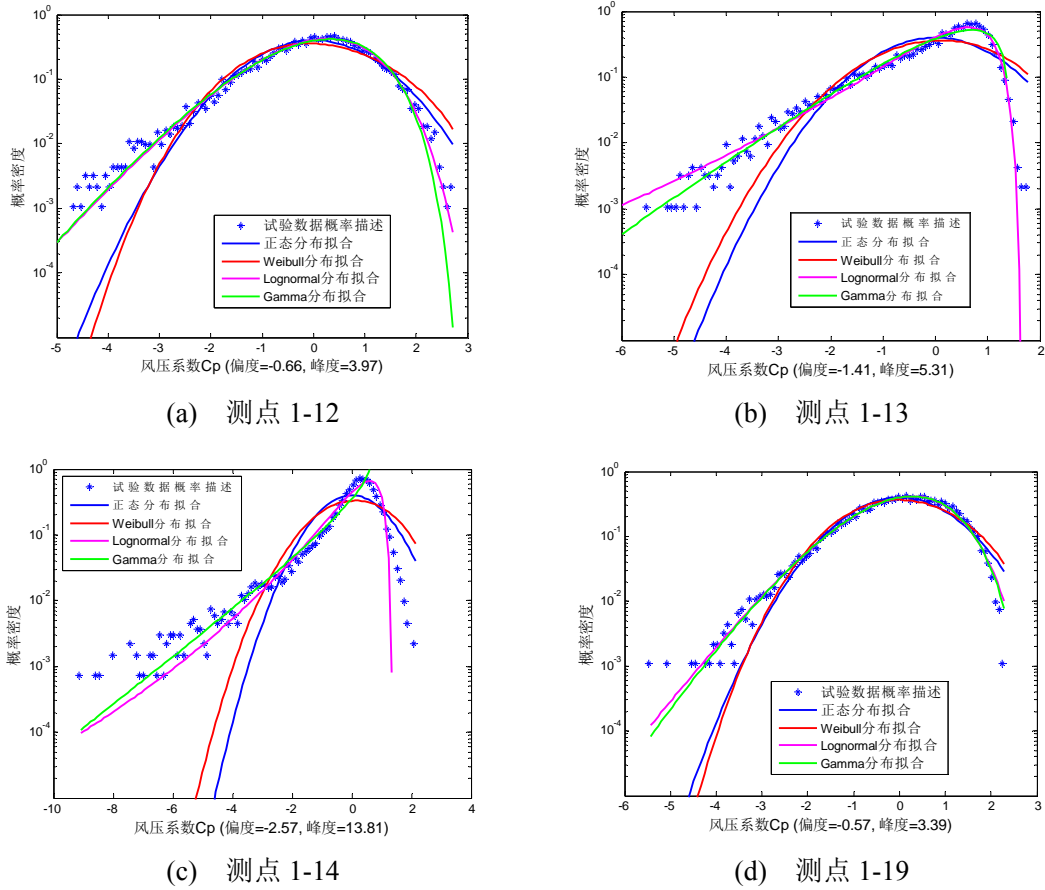


图 4.20 平屋面 45° 风向角下角部测点概率密度拟合图

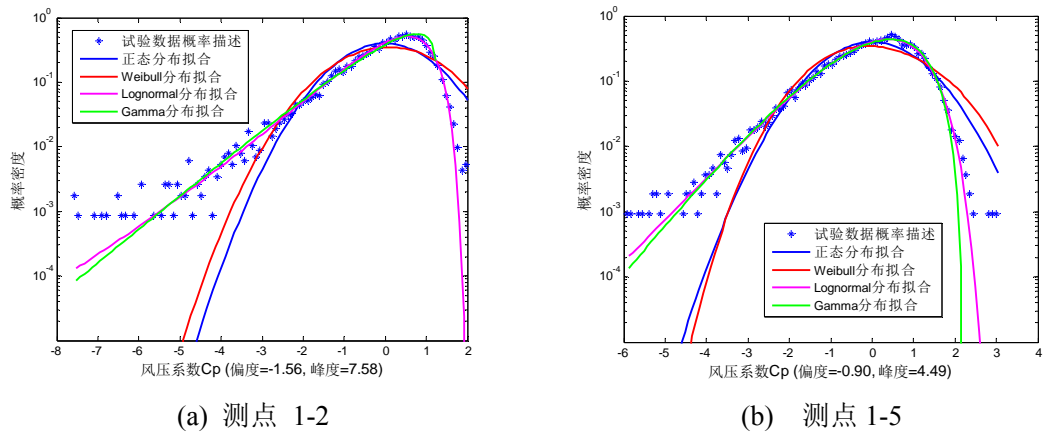


图 4.21 平屋面 90° 风向角屋面测点概率密度拟合图

4.5 本章小结

本章基于双坡屋面（屋面坡度为 30° ）系列和平屋面系列的低矮房屋刚性模型风洞试验数据，为研究对象，对所 8 个模型的屋面风压的非高斯特性进行了分析和研究。得到主要结论如下：

（1）屋面测点的非高斯性与风向角有很密切的关系，即与来流风的分离区部位的有很大关系。位于屋面边缘、屋面的挑檐和山墙的角部区域以及屋脊附近区域这些部位往往非高斯性非常显著。

（2）来流风的湍流度对屋面风压的概率密度分布影响很大，来流风的湍流度越大，同一风向角下屋面风压概率密度分布的偏度绝对值就越大，峰度也越大。

（3）在双坡屋面系列的屋面上迎风屋面从 0° 到 45° ，左偏态非高斯的风压分布区域不断增加，高斯分布以及右偏态非高斯分布的区域不断缩小，到 90° 是迎风屋面同背风屋面一样全部呈现左偏态的非高斯风压分布，整个背风屋面风压均是左偏态的非高斯分布。在相同风向角下，湍流度越高，偏度系数的绝对值就越大。

（3）低矮房屋的屋面风压的非高斯特性主要是来流风遇到建筑物形状引起的空间流场的改变造成的。 0° 风向角下迎风屋面顺风向处于气流分离区的前三排测点的空间相关性很强，其它测点相关性很弱，在屋脊处气流二次分离，整个背风屋面的非高斯性都很强，而背风屋面测点的相关性除去最边缘的一排点相关性都很强。在横风向测点的空间相关性展现的是作用于屋面表面涡旋的特性，涡旋横断面的一侧测点与其它测点的相关性依次减弱，直至弱相关。中心测点以与其它测点的相关性呈对称递减。

（4）迎风屋面和背风屋面在 90° 风向角下的流场中是关于屋脊线对称的，因而两个屋面的相关系数曲线所呈现的规律十分相似。在顺风向上，风压的脉动在各列测点的传播是一致的，大约在距离迎风分离边缘 0.2 倍的建筑物长度的区域的测点相关性很强，但之后中部以及后缘区域的测点衰减的很快，均为弱相关，甚至在屋面中部的点还出现了几乎不相关，很弱的负相关，在横风向上各个测点的相关性呈现涡旋横断面的形式，以屋脊线为对称轴相关性依次递减，直至不相关。 45° 风向角下只有在顺风向的带状区域内风压呈现非高斯性，其他区域测点的相关性很弱，几乎不相关，可以认为近似属于高斯分布。

（5）由于低矮房屋屋面的风压的非高斯特性，使得风压的概率分布曲线严重偏离高斯分布，综合其他学者的文献本文分别对双坡屋面和平屋面的三个工况中屋面典型测点的概率密度函数进行拟合，曲线拟合的结果显示对于右偏态的非高斯分布，weibull 分布拟合的情况最好；对于屋面控制荷载的负压区（左

偏态)的概率分布, Lognormal 分布和 Gamma 分布拟合的情况都很理想, 从总体来看(无论是负向尾部区还是正向尾部区) Lognormal 分布拟合的情况更优。但是从以追求屋面控制荷载的极值估算来说, Lognormal 分布和 Gamma 分布都可以做为其概率密度函数来使用。

第5章 低矮房屋屋面极值风压计算方法及分布特性研究

5.1 引言

多次风灾的调查显示,低矮房屋破坏最多的是围护结构以及屋面的破坏,而且往往是从屋面系统开始破坏的,因而准确合理地估算低矮房屋屋面的极值风荷载,对于减少低矮房屋的风致破坏有很大意义。

作用于低矮建筑上的风荷载是一个随机过程,结构工程师们最关注的往往是风荷载的极值,用于计算和验证结构的受力和安全性,因此,极值的计算方法在风工程中一直是受到广泛关注的重要课题。过去数十年来,国内外研究人员对低矮建筑上的风压极值的计算方法进行了深入细致地研究。

Davenport 的峰值因子法^[93]的前提是屋面的风荷载分布要满足高斯分布的假定,计算得出的极值风压才能接近真实值。由第四章风压的概率特性研究得知,屋面风压并不是完全高斯性的,特别是在高湍流度风场条件下或气流分离区风压严重偏离高斯假设^[119],而风压的非高斯特性对于风压极值有着极其重要的影响。那么峰值因子法计算得出的结果与实际数值相差会比较大,因而利用比较准确的极值估算方法获得极值就显得尤为重要。本章首先介绍六种比较常用的极值估算方法,并利用自己的低矮房屋风洞试验数据对其中的四种方法的计算结果进行比较,得出最优的计算方法。然后,再次计算几种低矮房屋模型的极值风压分布,与前面应用峰值因子法计算的结果进行对照比较。

5.2 常用极值估算方法介绍

目前,各国规范中的极值方法大多采用基于零值穿越理论的峰值因子法。这是因为无论是在现场实测试验还是风洞试验中很难在一定时间内比较方便地获得大量的风压试验数据,样本数量比较小,而且从Davenport开始常用的极值方法大多基于零值穿越理论。但是由于峰值因子法中的高斯假定的局限性,研究学者们在此基础上作了大量改进。对于改进的方法目前应用较多、较为认可的是Kareem-Zhao法^[120]和Sadek-Simiu法^[125]。另外,还有一些不管母体分布如何,直接从极值分布进行计算的方法,如Quan et al法^[130]等。此外,还有一种建立在大量统计数据基础上的全概率计算极值的方法Cook-Mayne法^[131],最后,通过数据直接选取最大值的方法(即直接观察法)也在一些试验中被应用,下面就这些常用的极值方法作一些介绍。需要说明的是,上述各极值方法的目标值在统计学的

概念上是极值的期望值，这也是工程应用中最常用的合理极值。

(1) 峰值因子法 (Davenport法)

在自然现象和社会现象中，大量的随机变量都服从或近似服从正态分布（高斯分布），因而在概率论和数理统计的理论研究和实际应用中，正态随机变量起着重要的作用。在结构风工程的研究中，一开始许多学者往往也假定风压分布服从正态分布提出各种研究结论，例如前面所提到的Davenport^[93]。

该方法假设脉动风压服从高斯分布，并利用基于高斯过程的零值穿越理论给出一峰值因子，以该峰值因子乘以脉动风压的均方根值后再加上平均风压得到风压峰值。由此平均极值法的峰值因子可以近似地表示为：

$$\bar{x}_e = v(2 \ln vT)^{1/2} + \frac{\gamma}{(2 \ln vT)^{1/2}} \quad (5.1)$$

式中 $\gamma = 0.5772$ ，欧拉常数。这就是由Davenport发展得到的标准高斯过程 $x(t)$ 的峰值因子 (Peak factor)，它被广泛应用于各国风荷载规范。下文简称这种方法为Davenport法。

(2) 改进峰值因子法 (Kareem-Zhao 法)

人们在对风场的进一步深入研究中，逐步发现在气流的分离区以及高湍流的风场下风压并非服从高斯分布，而且这些风压的非高斯特性对极值的影响很大^{[119][132]}，一些学者对峰值因子法做了大量的改进，其中最具代表性的是Kareem & Zhao^[120]所做的工作（下文简称Kareem-Zhao法）。他们在Davenport的研究基础上，将高斯随机变量表示为考虑高阶统计量（偏度系数和峰度系数）的非高斯随机变量的Hermite多项式，从而将Davenport仅仅适用于高斯过程的基于零值穿越理论的峰值因子法扩展到适用于估算非高斯过程的风压峰值，其峰值因子表示为：

$$\bar{x}_{ng} = \alpha \left\{ \left(\beta + \frac{\gamma}{\beta} \right) + h_3(\beta^2 + 2\gamma - 1) + h_4 \left[\beta^3 + 3\beta(\gamma - 1) + \frac{3}{\beta} \left(\frac{\pi^2}{12} - \gamma + \frac{\gamma^2}{2} \right) \right] \right\} \quad (5.2)$$

式中： $\gamma = 0.5772$ （欧拉常数）， $\beta = \sqrt{2 \ln v_0 T}$ ， v_0 是零值穿越率， γ_3 和 γ_4 分别是时程的偏度系数和峰度系数，当时程为高斯过程时其偏度系数和峰度系数都为0， α 、 h_3 和 h_4 都是 γ_3 和 γ_4 的函数。

从式(5.2)可以看出Kareem & Zhao^[120]的改进峰值因子法相当于在式(5.1)中引入了一个包含了随机过程的非高斯信息修正项。此方法粗略的将非高斯随机变量表示为高斯随机变量的多项式函数，但问题在于经过转换后的非高斯函数是否能够准确地描述时程的概率分布。

(3) Sadek-Simiu 法

随着统计学的发展以及在工程上的应用，Sadek & Simiu^[125]在零值穿越理论的基础上，应用Grigoriu^[132]的“转换过程法 (Translation process approach)”提

出了非高斯过程的另一种极值计算方法（下文简称 Sadek-Simiu 法）。

该方法首先要确定时程的母体分布。在确定时程的母体分布时，Sadek & Simiu 采用了“概率图相关系数法(PPCC)”。Sadek&Simiu通过对一系列概率分布函数的测试确定三参数Gamma分布和高斯分布是描述低矮建筑表面风压的最优分布函数。一旦确定时程的母体分布，就可以利用基于“转换过程法”的极值估计方法确定时程的极值。得到的极值风压系数如下：

$$y_{pk,T}^{\max,i} = \sqrt{2 \ln \frac{-v_{0,y}T}{\ln F_{y_{pk,T}}^i}} \quad \text{或} \quad y_{pk,T}^{\min,i} = -\sqrt{2 \ln \frac{-v_{0,y}T}{\ln F_{y_{pk,T}}^i}} \quad (5.3)$$

Sadek-Simiu 法应用“转换过程法”巧妙地避开了零值穿越理论高斯假定的限制，通过转换获得了极值的概率分布函数，较前两种方法都有很大的改进。然而，由于转换过程没法获得实际的标准高斯时程，概率分布函数中的零值穿越率必须由原非高斯时程获得，而且从非高斯过程中获得基于高斯假定的零值穿越率存在很大的误差。另外，Sadek-Simiu 法的一个前提在于找到一个合适的时程母体分布，但是应用现有的某种分布去拟合多变的随机时程是一个很大的问题。这些都是 Sadek-Simiu 法的重大缺陷。

(4) Quan et al 法

全涌等人^{[130][134]}以经典极值理论为基础，以极值为研究对象开发了一种基于单个样本数据的极值期望值的计算方法，是一种改进的标准 Gumbel 法（下文简称 Quan et al 法）。在阐述经典 Gumbel 极值理论的基础上，根据观察极值的相互独立性推导了短时距下极值分布参数和长时距下极值分布参数的关系式，给出了一种由大量短时距样本推算长时距下极值期望值的极值估算方法。

设有一段时间长度为 t_1 的试验数据样本，将它划分成若干段时距为 t_2 的子样本，其中 $t_1 \geq t_2$ ，则划分的段数 $n = t_1 / t_2$ ，由此可以得到 n 个观察极值。记时距 t_1 下极值小于 x 的概率为 $F(T = t_1)$ ，时距 t_2 下极值小于 x 的概率为 $F(T = t_2)$ ，由极值的独立性可知有如下概率等价关系：

$$F(T = t_1) = F^n(T = t_2) \quad (5.4)$$

由于极值服从极值 I 型分布，则可得到下列关系式：

$$1/a(T = t_1) = 1/a(T = t_2) \quad (5.5)$$

$$U(T = t_1) = U(T = t_2) + \frac{1}{a(T = t_2)} \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \quad (5.6)$$

其中参数 u 和 $1/a$ 为拟合参数，分别称为模和散度。根据上述转换，可以将时间

长度为 t_1 的实验数据样本划分成若干长度为 t_2 的子样本，这些时间长度 t_2 的子样本的观察极值的概率分布参数推算出时间长度为 t_1 的数据样本极值的分布参数 u 和 a ，然后再用等式(5.7)和(5.8)计算其极值期望值，从而实现以单个时间长度为 t_1 的实验数据样本计算其期望极值的目标。

$$\bar{x}_e = \frac{\gamma}{a} + u \quad (5.7)$$

$$\sigma_{x_e} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{a} \quad (5.8)$$

式中， $\gamma = 0.5772$ ，为欧拉常数。

(5) Cook - Mayne 法

Cook-Mayne法^[131]是一种全概率的荷载计算方法。Cook & Mayne基于英国实测数据，用Gumbel法计算了极值风压系数，并在此基础上提出了一种全新的风压系数计算方法，被称为Cook-Mayne法。他们指出假如 \bar{U} 是1小时的平均风速，那么 \hat{U} （年最大的每小时平均风速）和同一小时内的极值风压系数 \hat{C}_p （ \hat{C}_p ）由于来自两个不同的频域，可以认为是统计独立的，且认为 \hat{U} 和 \hat{C}_p （ \hat{C}_p ）都是服从极值I型分布。根据已有数据确定 \hat{U} 和 \hat{C}_p （ \hat{C}_p ）的联合概率密度函数，据此可获得指定超越概率下的风压系数 \hat{C}_p （ \hat{C}_p ）。根据英国建筑研究中心（BRE）风速、风压记录数据，得到了极值风压系数，称为Cook-Mayne系数，表述如下：

$$\hat{C}_p = U_{\hat{c}} + 1.4 / a_{\hat{c}} \quad (5.9)$$

Cook & Mayne指出：尽管此系数是基于英国的统计数据得到的，同样可以用于世界其它地方。但是需要指出的是Cook-Mayne系数是以1小时为观察时距得到的，而我国规范的标准时距是10分钟，是否能够应用有待进一步验证。

(6) 直接观察法

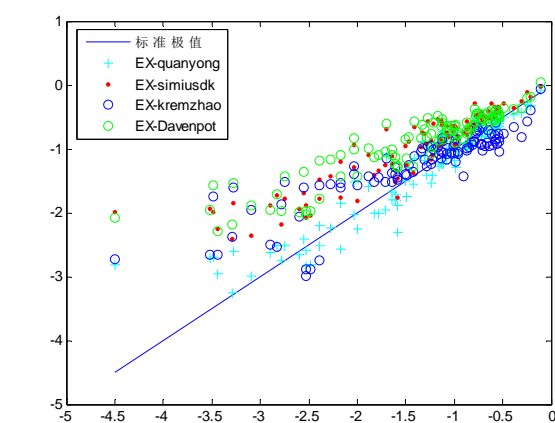
直接观察法是最为直观简捷的寻找极值的方法，它直接从单个样本时程中挑出最大、最小值作为设计值。早期试验中经常采用这种办法获得极值，现在也仍然有使用，主要考虑到这样的极值直接从采样中获得，比较有实际意义。但是由于样本值的随机性，实际中样本值具有较大的分散性，单个样本的观察极值在统计学上是没有意义的。

5.3 不同极值估算方法计算结果比较

不同极值估算方法在估算极值时到底哪种更具有优越性？如何判断哪种方法得到的结果更准确、更稳定呢？用不同的估算极值的方法计算同一段标准样本的极值，计算得出的极值与标准极值进行对比，看谁的误差均方根和误差均值的绝对值都最小，那就说明这种方法得到的极值准确性更高，离散性更小。为了更清楚的说明各种方法的估算结果和标准极值之间的接近程度以及估算方法的可靠性，则需要计算各种工况下估算方法得到的误差率，如果误差率一致稳定地保持在一个较小的范围内，则说明这种极值估算方法更加准确、更加稳定。

5.3.1 各种极值估算方法的误差比较

基于零值穿越理论的峰值因子法（Davenport 法）、改进的峰值因子法 (Kareem&Zhao 法)和 Sadek-Simiu 法是目前较为常用的极值计算方法（本文在第二章计算预估极值所用的方法就是 Davenport 法），而 Sadek-Simiu 法又在前两种方法上有了很大的改进。Quan et al 法则是一种基于经典理论的全新的直接以极值为研究对象的极值估算方法。下面用上述四种方法对试验数据进行负极值（极小值）估算，以标准样本观察极值的平均值为标准极值进行比较来考察不同方法估计极值的准确性。根据上述方法编写 Matlab 程序进行计算。



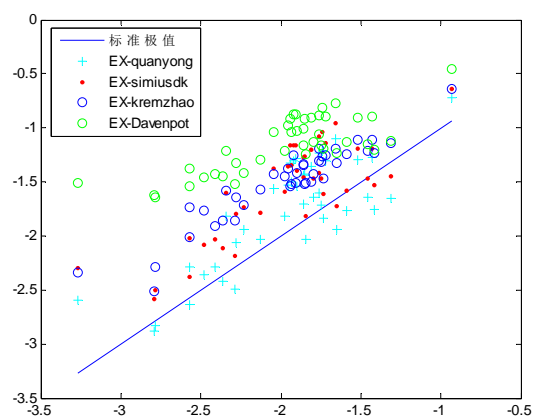
迎风面：（误差均方根 误差均值）

err_quanyong: (0.2943 0.0454)

err_simiusdk: (0.5846 0.4294)

err_kremzhao: (0.4805 0.1433)

err_Davenport : (0.6660 0.4962)



背风面：（误差均方根 误差均值）

err_quanyong: (0.3512 0.1997)

err_simiusdk: (0.4831 0.4023)

err_kremzhao: (0.4942 0.4666)

err_Davenport : (0.8722 0.8225)

(a) 0° 风向角

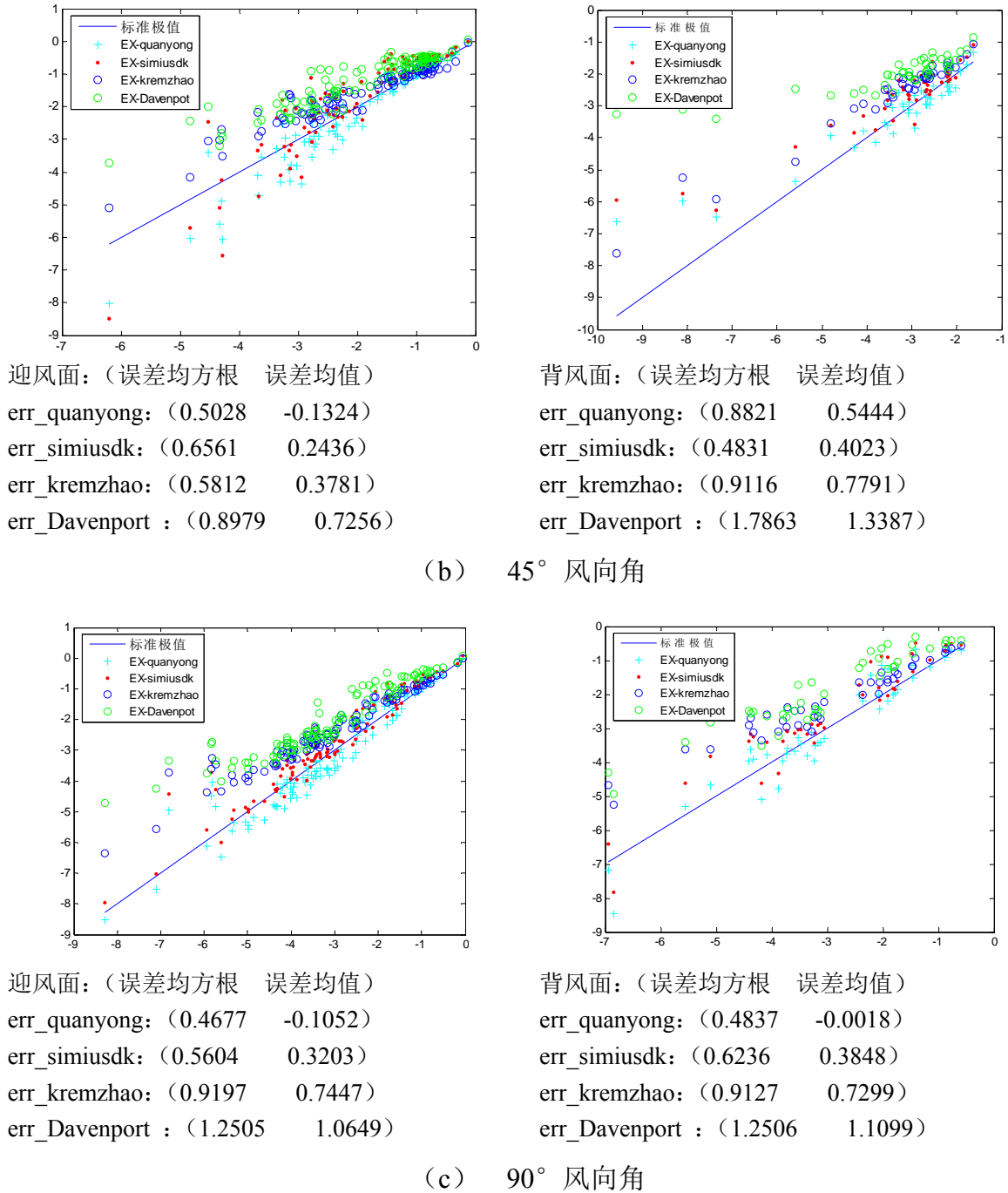


图 5.1 三角挑檐屋面 B 类风场三个工况极值估算方法结果比较图

图 5.1 是三角挑檐屋面在 B 类风场下 0°、45° 和 90° 三个风向角下的极值估算方法结果比较图（双坡屋面系列其他三个模型的 B、C 类风场下的 0°、45° 和 90° 三个风向角共计 12 个工况的极值估算结果图见附录 C），从结果的比较中可以看出：对于在每个风向角下的测点极值，Davenport 法和 Kareem-Zhao 法以及 Sadek-Simiu 法的误差率在不同的工况下误差的差别很大，总体来说 Davenport 法误差最大，离散性也比最大，估算的极值严重偏离标准极值，而且偏危险，而且最接近标准值的是 Sadek-Simiu 法和 Quan et al 法，尤其是 Quan et

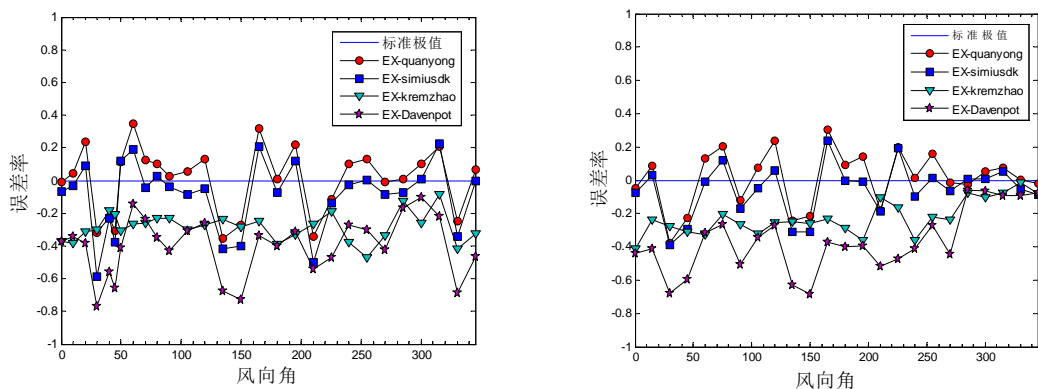
al 法误差率最小，离散性也比较小，方法最优。无论是在 B 类风场还是 C 类风场，四种双坡屋面（三角挑檐屋面、硬山挑檐屋面、悬山挑檐屋面和不对称屋面）在 0° 风向角的迎风屋面处改进峰值因子法（Kareem&Zhao）比 Sadek-Simiu 法更接近实际值，并且离散性也较小，而四个双坡屋面在 45° 风向角下迎风屋面则 Sadek-Simiu 法的估计极值比改进峰值因子法的估计极值更保守，更接近标准极值，但 Sadek-Simiu 法反而比改进峰值因子法离散性较大。Quan et al 法对于屋面风压的负极值的估算都很接近标准极值，误差很小并且离散性都比其他三种方法小很多。

5.3.2 各风向角下的最不利风压系数误差率比较

如果一种极值估算方法最终得到的结果在多种工况下最接近或是无限接近真实的极值的话，那么说明这是一种准确、稳定的计算方法。在极值估算方法中最关心的是能否捕捉到屋面测点中各个风向角工况中出现的绝对值最大的极值，那么运用上述的四种极值估算方法计算各个风向角下估算的最不利风压系数与标准的最不利风压系数的误差，为了更清楚的说明各种方法的估计极值和标准极值之间的接近程度，这里定义误差率：

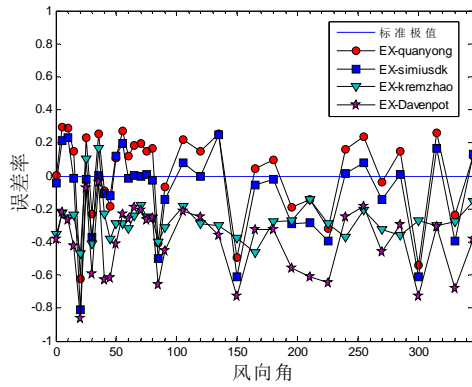
$$\text{误差率} = \frac{\text{估计极值} - \text{标准极值}}{\text{标准极值}}$$

根据误差率定义，计算 8 个工况 220 个风向角中应用不同方法的误差率并由图 5.2 给出。

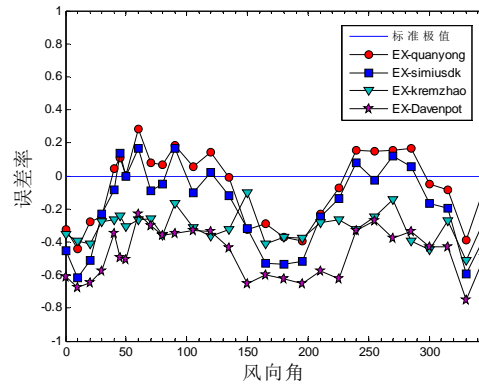


(a) Case01（三角挑檐双坡屋面 B 类风场）

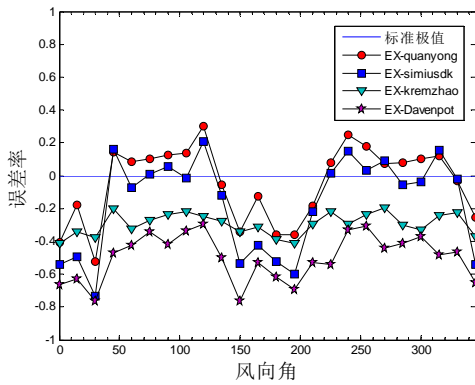
(b) Case02（三角挑檐双坡屋面 C 类风场）



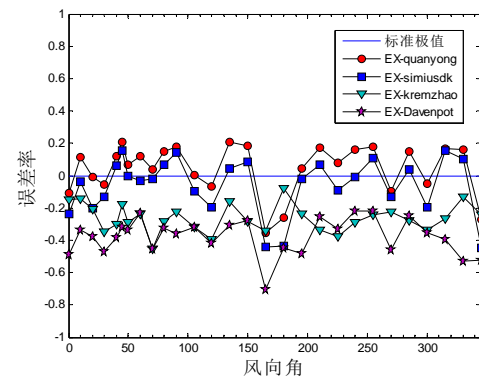
(c) Case03 (硬山挑檐双坡屋面 B 类风场)



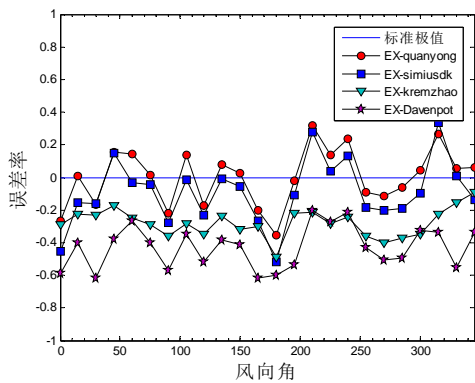
(d) Case05 (悬山挑檐双坡屋面 B 类风场)



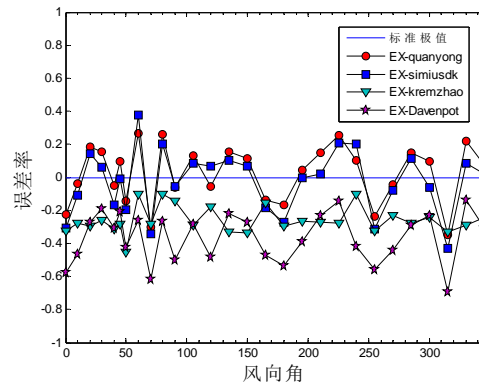
(e) Case06 (悬山挑檐双坡屋面 C 类风场)



(f) Case07 (不对称双坡屋面 B 类风场)



(g) Case07 (不对称双坡屋面 B 类风场)



(h) Case09 (平屋面 B 类风场)

图 5.2 不同屋面各测点在不同方法下的估计极值的误差率比较

从图 5.2 中可以看到在这 8 种工况中, Davenport 法和 Kareem&Zhao 法在每个风向角下误差率均为负值, 误差率都在 $-20\% \sim -60\%$,个别达到 -80% 。这说明这两种方法在各个风向角下得到的最不利风压系数都要比标准值小, 估值明显偏于危险, 其中以 Davenport 法偏差最大。Sadek-Simiu 法和 Quan et al 法则是既有正也有负, 这说明他们估算的结果是分布在标准极值的两侧。Sadek-Simiu 法误差率 $20\% \sim -60\%$ (有个别风向角误差率达到 -80%), Quan et al 法误差率 $20\% \sim -20\%$ 之间 (只有个别风向角误差率达到 40%), 可以看出这四种方法中 Quan et al

法误差率最小。在8个工况220个风向角中Quan et al法有57%的风向角下的最不利风压系数误差率为正值，Sadek-Simiu法则有37%的误差率为正值，这个表明Quan et al法要比Sadek-Simiu法估算的结果偏于保守。

表5.1 各工况在不同估算方法下的累积误差一览表

方法 工况	峰值因子法 (Davenport)		Kareem&Zhao法 (Kareem-Zhao)		Sadek-Simiu法		全涌法	
	误差 均方根	误差 均值	误差 均方根	误差 均值	误差 均方根	误差 均值	误差 均方根	误差 均值
case01	3.1136	2.8637	2.2497	2.1022	1.4229	0.5705	1.3726	-0.1306
case02	4.3204	3.9246	2.7558	2.5216	1.7301	0.6627	1.7235	-0.1640
case03	3.1674	2.7770	2.2001	1.9671	1.8617	0.6364	1.8192	-0.1337
case05	3.5661	3.4659	2.5505	2.3853	1.8220	1.0593	1.4529	0.2213
case06	4.9912	4.8443	3.0085	2.9144	2.5524	1.1460	2.0067	-0.0046
case07	3.4893	3.2342	2.7725	2.4652	1.5030	0.4275	1.4623	-0.4932
case08	5.6064	5.2911	3.8087	3.5569	2.4158	0.9942	2.0576	-0.1013
case09	3.8607	3.3689	2.8171	2.4894	2.0170	0.3311	1.7776	-0.1454

从表5.1各工况对应的累积误差来看，Quan et al法的误差均值始终在 $\pm 20\%$ 左右的范围内（除去一个工况），误差均值最小，Sadek-Simiu法次之，误差均值均大于40%，其他两种方法误差率大都在2倍以上，误差均值最严重的Davenport法甚至达到2.8~3.5倍，个别情况甚至达到4.8~5.3倍。误差均方根体现的是计算值与真实值的离散程度，从表中可以看到离散性最小的还是Quan et al法，它的各工况的误差均方根都小于其他三种方法。因而，无论是从单个工况中各风向角下极值的误差率还是每个工况最终极值的累积误差都可以看到Quan et al法要优于其他方法。

上面四种极值估算方法的误差率以及累积误差的分析看来：Davenport法、Kareem&Zhao法和Sadek-Simiu法对风压极值的严重低估应该归结为它们共同的理论基础，即标准高斯过程的零值穿越理论。零值穿越理论的前提是假设风压时程为标准高斯过程，但是由第四章可知实际风压时程的概率分布严重偏离了高斯分布。零值穿越理论试图捕捉时程中的每个极大值，并且让极值大于所有的极大值，但是从实际计算结果来看，零值穿越理论对于非高斯部分的极大值的捕捉完全失效。但是从第四章的测点风压的概率分布图来看，很大一部分的极值都超出高斯分布的范围，而零值穿越理论完全丢掉了非高斯部分的极值，得到的计算结果会大大低估实际的极值。虽然后人看到了Davenport法的这个缺陷，试图通过多种方法和形式进行弥补，例如增加多项式的非高斯修正项的Kareem&Zhao法以及采用映射的转换过程法将非高斯过程转换称高斯过程的Sadek-Simiu法。Kareem&Zhao法中增加的多项式非高斯修正项，是近似地

将非高斯随机变量表示为高斯随机变量的函数，问题是这种近似并不能够准确的描述风压时程的概率分布，而且还丢失了大量重要的非高斯的信息。Sadek-Simiu 法在计算过程中通过映射的方法比较巧妙地避开了零值穿越理论中高斯假定的限定，通过转化过程法直接应用 Rice 的结论获得极值的概率分布函数。但是由于非高斯过程通过映射是无法得到实际的标准高斯过程的，那么概率分布函数中的零值穿越率 ν 必须由原始的非高斯时程来获得，从非高斯的时程中获得基于高斯假定的零值穿越率还是存在巨大误差的。另外，Sadek-Simiu 法的一个关键的前提是要确定风压时程的母体分布，但是从 4.4 节的分析结果可以看出屋面上各个测点的风压时程都是随机多变的，多数测点并没有一致性。要应用某一种概率分布函数去拟合，是非常困难和无实际意义的。从以上可以看出，用以高斯假定为理论基础的理论和方法来解决非高斯的问题，这本身就是一个缺陷和问题。

5.3.3 两种计算方法下极值分布特征比较

Davenport 法本文采用如下等式计算风压系数的最大值和最小值[88]：

$$\begin{aligned}\hat{C}_p &= \bar{C}_{pi} + g\tilde{C}_{pi} \\ \check{C}_p &= \bar{C}_{pi} - g\tilde{C}_{pi}\end{aligned}\quad (5.10)$$

公式中 g 为峰值因子，一般取值为 2.5~4.0，这里取 3.5^[88]； \hat{C}_p 、 \check{C}_p 、 \bar{C}_{pi} 和 \tilde{C}_{pi} 分别为建筑物表面测点上风压系数 $C_p(t)$ 的最大值、最小值、平均值和均方根值。

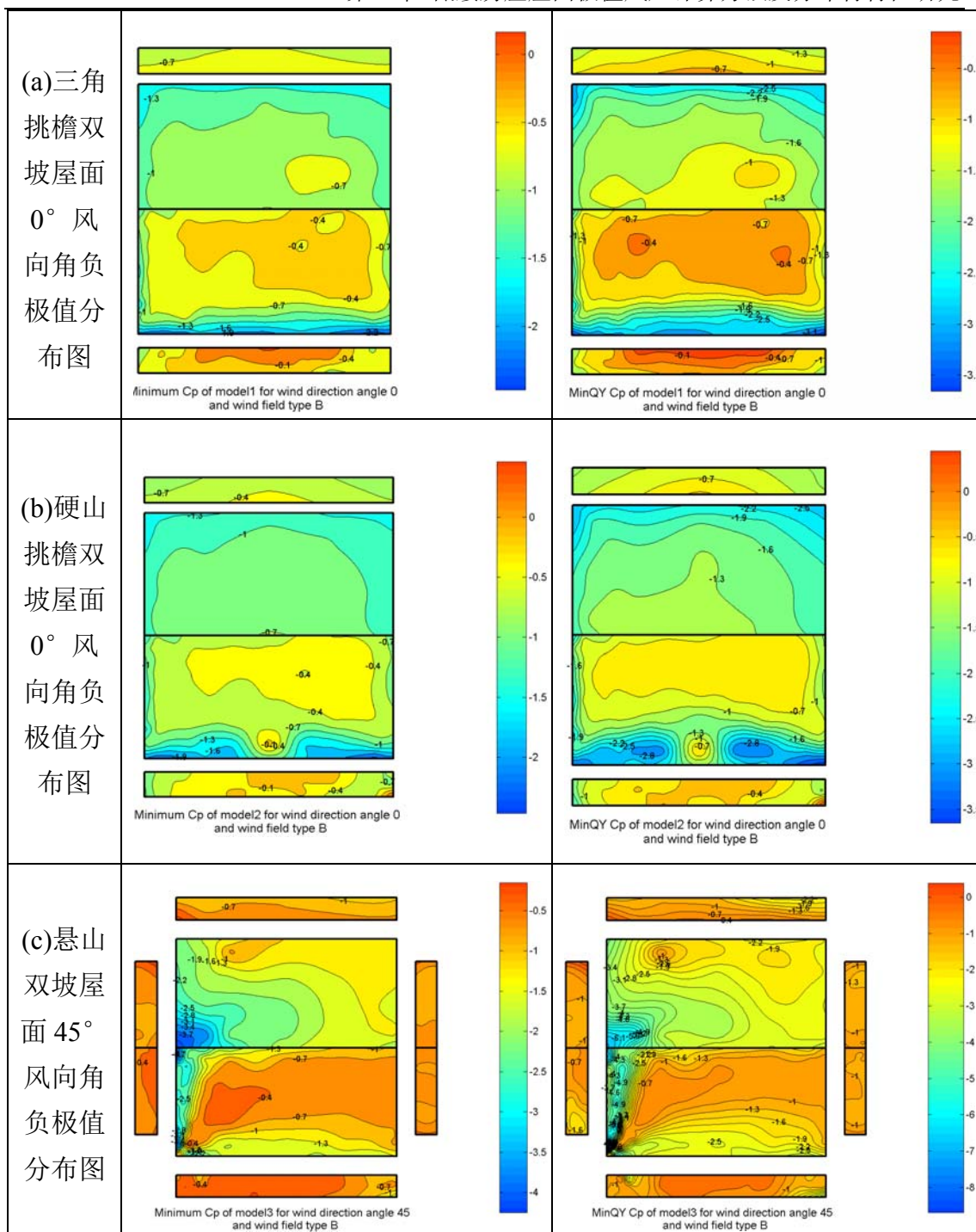
$C_p(t)$ 计算如下：

$$C_p(t) = \frac{P(t)}{0.5\rho U_H^2} \quad (5.11)$$

其中， $P(t)$ 为测点的风压时程， ρ 为空气密度， U_H 为建筑屋面平均高度处的来流风速。

表 5.2 两种计算方法下五种屋面典型风向角的极值分布对比

	Davenport 法	Quan et al 法
--	-------------	--------------



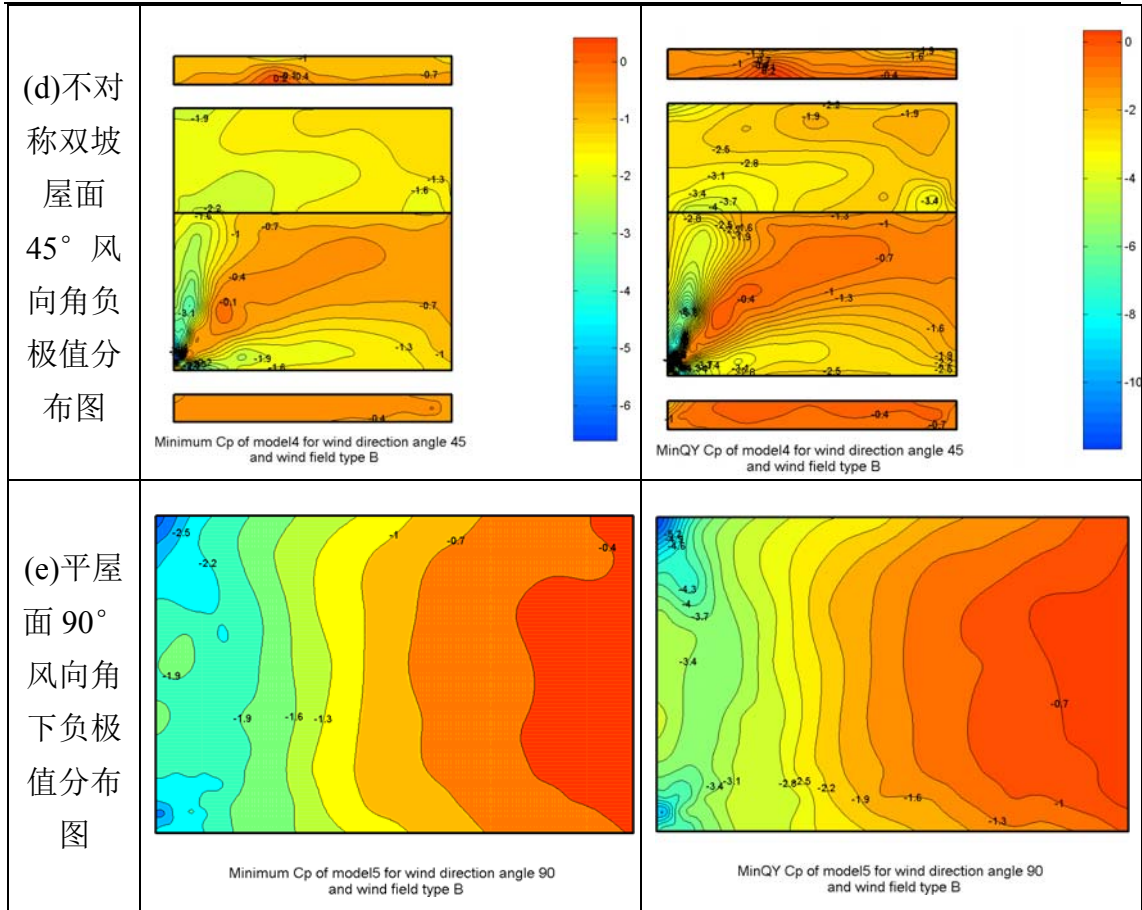


表 5. 2 是五种形式的屋面在三个风向角下的负极值的分布图运用 Davenport 法、Quan et al 法这两种方法的比较。在负极值的比较中可以看出两种方法在迎风屋面和背风屋面的分布规律上基本一致，等压线比较密集数值绝对值比较大的地方都是位于气流分离区的迎风屋面挑檐边缘、山墙与屋面的边缘、角部以及屋脊线附近区域。但是 Quan et al 法的数值绝对值要比 Davenport 法大，在气流分离区的边缘和角部的等压线更加密集。在负极值分布图中迎风屋面的边缘（a 图）和山墙和屋面的角部区域（c 图）可以明显的看到这种趋势，而且有的区域甚至使得屋面上出现绝对值最大值的区域的位置都部分发生变化。两种方法最突出的估算值差别在位于气流分离区内的角部或是边缘的非高斯特性比较强的测点上，差距最大可达 60% 以上；而对于非高斯特性不是很明显的区域，估算值差别不是很大，大约 10% 左右。

5.3.4 两种计算方法下最不利极值分布的比较

低矮建筑的外部风压的脉动值和极值风压是结构设计中非常关心的参数，它们与来流的湍流特性密切相关，尤其是湍流强度。因此荷载效应（如刚架系统中构件的弯矩）的峰值也依赖于来流的湍流特性。由于低矮建筑物通常刚度比较大，其自由振动频率通常远远高于风力的卓越频率，动力响应对风荷载的影响很小，

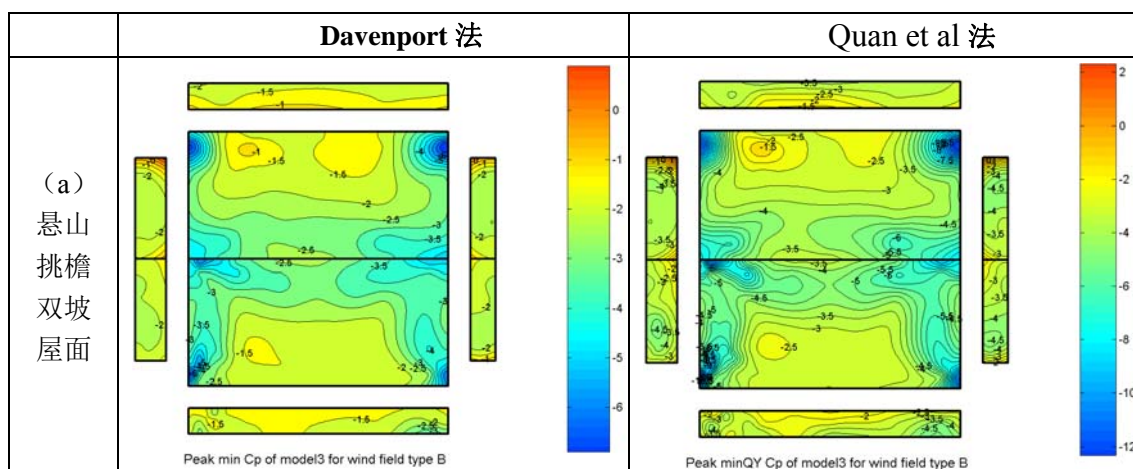
建筑表面最不利风压的分布能直接有效地说明屋面各局部承受的风荷载大小。

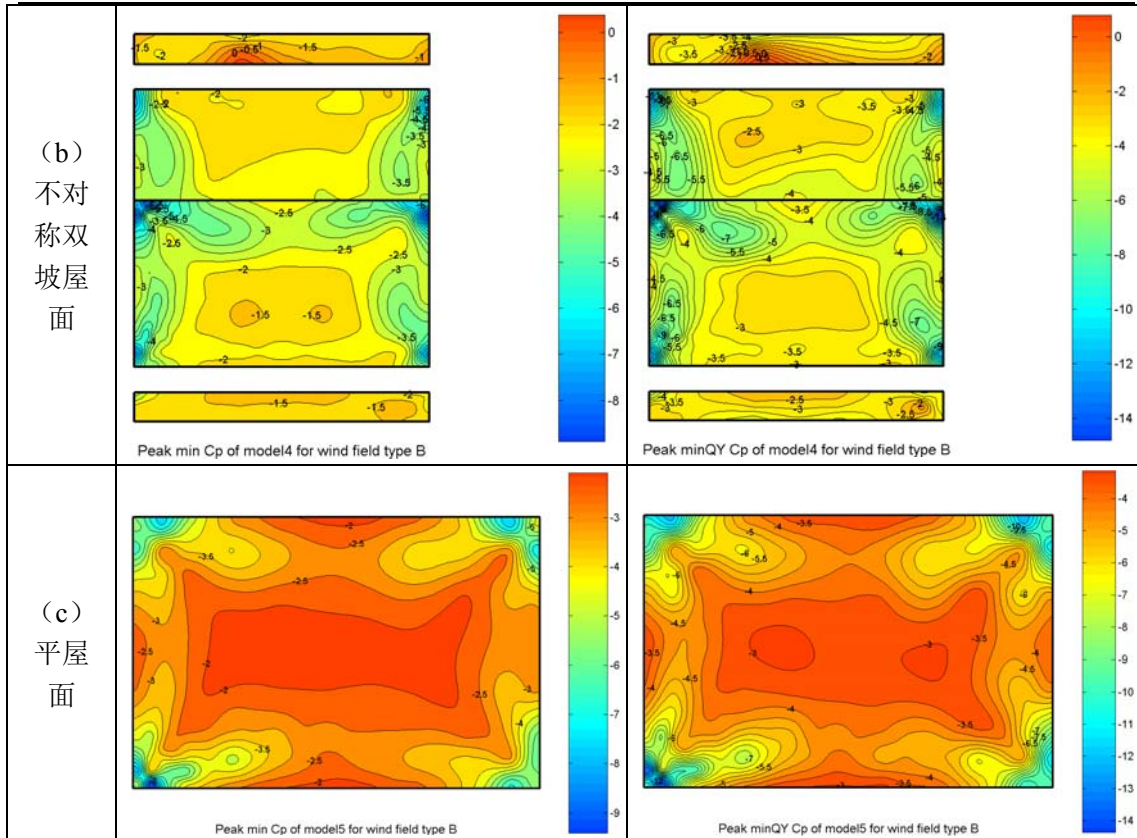
独立于风向角的最不利极值是指风压建筑物表面的风压的极值都是随着风向角的变化而变化的，每一个测点产生的极大值或是极小值对应的风向角是不同的。独立于风向角的最不利极值风压是每一个测点在所有风向角下产生的绝对值最大极大值（或是极小值）。

在屋面的设计中实际上最关心的是屋面在所有风向角下（ $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ ）所有测点之中产生的绝对值最大的极值。这是因为不同类型和形式的屋面在不同风向角下的极值分布是不同的，但是对于设计者来说最简便的方法是采用在所有风向角下绝对值最大的风压值，即独立于风向角的最不利风压。表 5.3 是两种计算方法得到的不同类型屋面的最不利风压系数分布对比表。

表 5.3 中所示的是不同屋面类型的屋面的最不利风压系数极值分布图。尽管是两种不同的极值估算方法计算的结果，但是从总体来看不同屋面坡度（相同长宽比、高宽比）的屋面的最不利风压系数分布图基本上是关于屋面中线对称分布的，而且负极值的绝对值要大于正极值，也就是说屋面的控制荷载都是负压。屋面的角部区域（无论是挑檐山墙角部还是屋脊山墙角部）均是出现最不利风压绝对值较大的高吸力区域。无论是迎风屋面还是背风屋面的中部区域出现的最不利风压系数的绝对值均比边缘区域的数值要小。对于双坡屋面的两个屋面来说，其最不利极值分布图大致也是关于屋脊线对称的。两种方法中唯一不同的是位于相同区域的等压线的数值以及等压线的剃度，运用 Quan et al 法估算的结果要比传统的 Davenport 法的数值的绝对值要大很多，大多数工况在要相差 50%左右，因而在相同区域的等压线上全涌法的分布图数值绝对值要大于 Davenport 法，在出现极大值的区域的等压线也要比 Davenport 法密集许多。

表 5.3 5 种模型的屋面的独立于风向角的最不利风压系数极值分布图





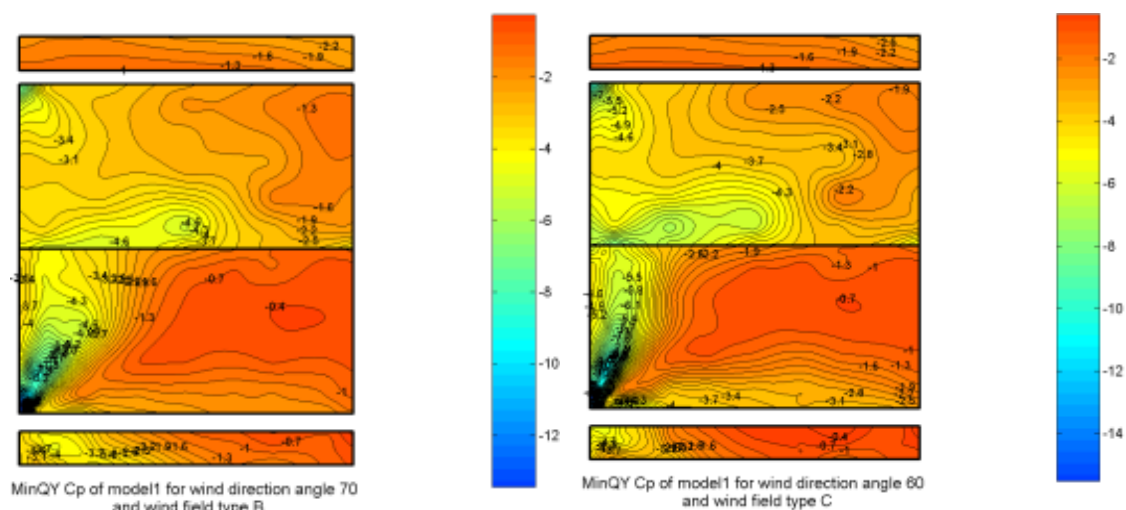
不仅如此，两种方法在屋面最不利风压系数分布图随屋面坡度的变化趋势也是一致的。悬山挑檐双坡屋面（屋面坡度 30° ）、不对称双坡屋面的迎风屋面(屋面坡度 20°)和平屋面（屋面坡度 0° ）的屋面坡度不同，它们的最不利风压系数等值线图在两种极值估算方法下屋面的等直线的分布特征及其变化趋势基本一致。屋面上最不利风压系数的绝对值最大的测点的风压值随着屋面坡度的减小而增大，高吸力区域随着屋面坡度的减小区域面积随之增大，强度（负压绝对值）也增大。只看每个屋面的四分之一区域，可以看到悬山屋面的高吸力区域是从角部呈现放射状的泪滴状区域（与锥形涡形状类似），不对称屋面的迎风屋面的高吸力区域则比悬山屋面的面积要大，直到平屋面时其高吸力区域的等值线是以屋角的角平分线（大约 45° ）呈近似对称分布，区域变为两条带状区域。绝对值最大的极值出现在屋面的角部，只是其数值分别为-9.5 和-14，两种方法的估值相差 47%。这种变化也从另一方面说明了随着屋面坡度的增大，屋面上产生的最不利荷载是减小的，这个在屋面设计中是十分重要的。

5.4 屋面风压极值分布特征

通过前面各种极值估算方法的误差比较以及各风向角下的最不利风压系数的误差率的比较可以看出，无论是在单一工况下计算结果的误差率还是各个工况下的最终的累积误差率 Quan et al 法总是都要比 Davenport 法、Kareem&Zhao 法

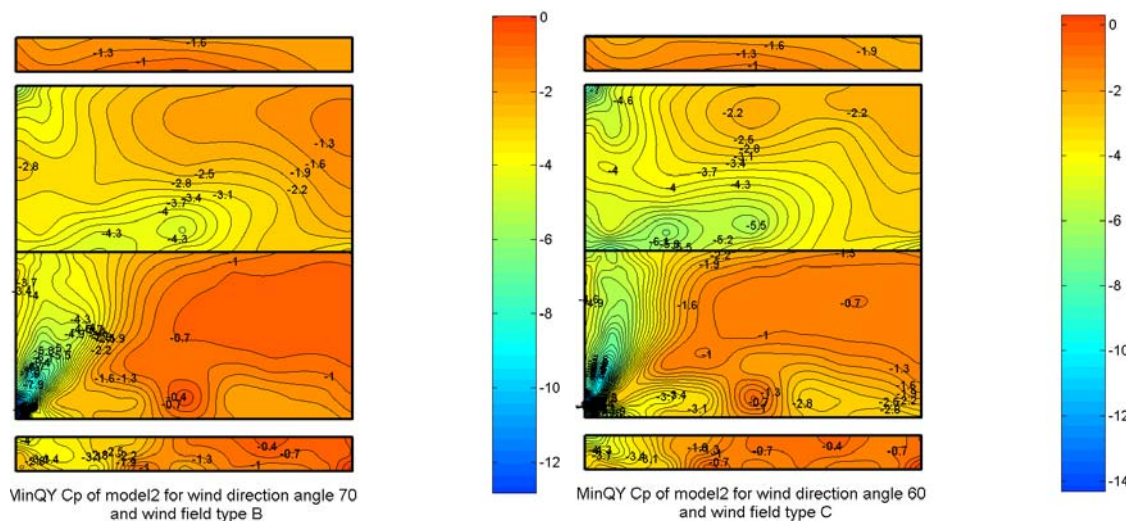
和 Sadek-Simiu 法小得多，而且离散性也要小于其他三种方法，因而更加接近标准极值，这说明 Quan et al 法在计算风压极值时要优于其他三种方法，尤其是工程设计中最关心的最不利负极值的计算上。因而本文采用 Quan et al 法来计算双坡屋面系列、平屋面系列和四坡屋面系列的最不利风压极值分布特征如下。

5.4.1 最不利风向角下的风压极值分布特征



(a) 三角挑檐双坡屋面 B 类风场

(b) 三角挑檐双坡屋面 C 类风场



(c) 硬山双坡屋面 B 类风场

(d) 硬山双坡屋面 C 类风场

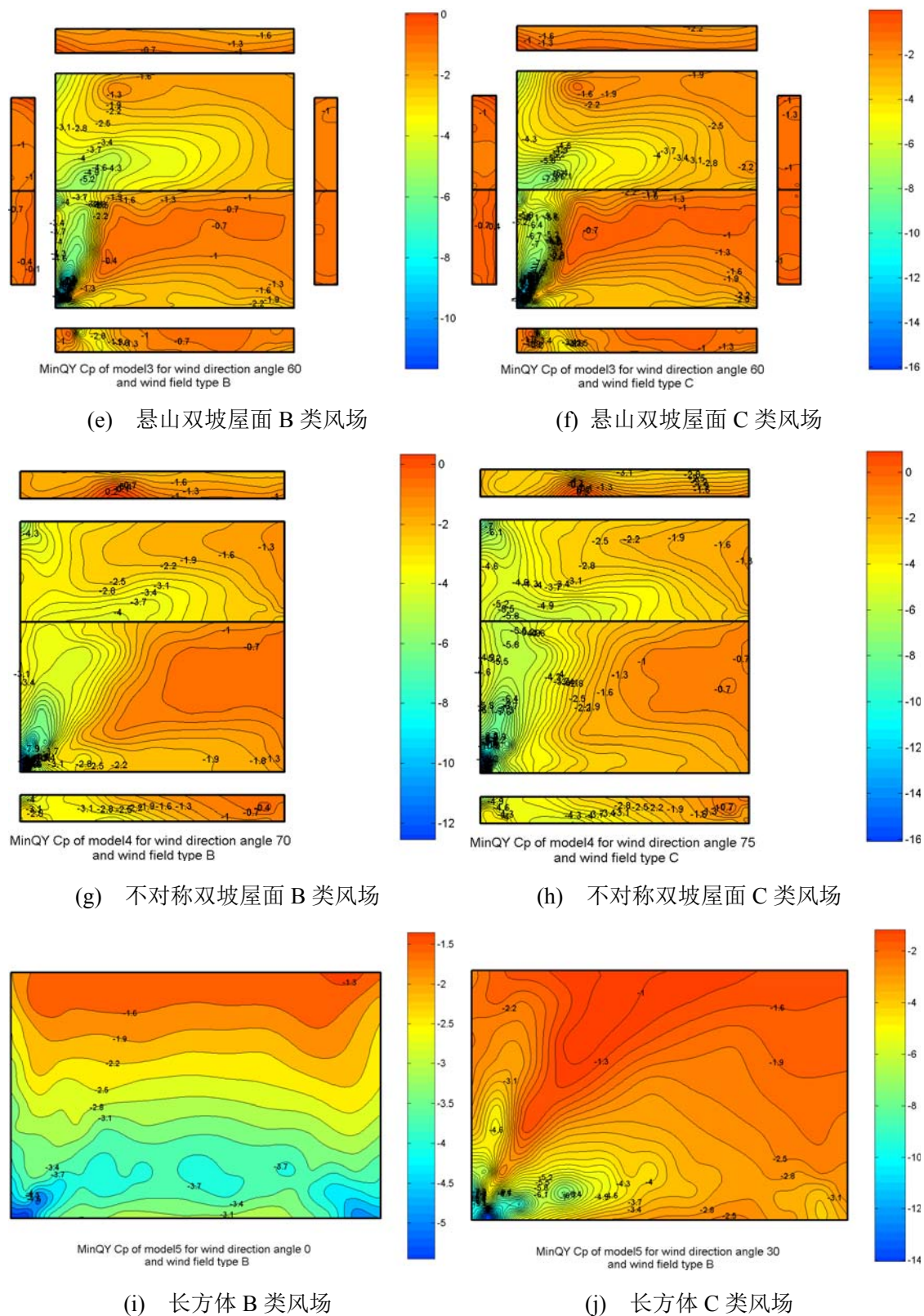


图 5.3 不同模型在不同风场条件下最大负极值（绝对值）时的此风向角下的极值风压分布图

图 5.3 所示的是屋面出现最大负极值（绝对值）时的此风向角下的极值风压分布图，从图中可以看出对于 30° 左右坡度的双坡屋面系列出现绝对值最大的

负极值的风向角大致都在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 之间,对于平屋面(屋面坡度为 0°)来说,则出现在 30° (这与屋面的长宽比有关),这说明对于几何形状不同以及屋面坡度不同的屋面来说最不利的风向角也是不同的。从双坡屋面的极值分布分布图来看,出现最不利的风向角的方向大致与屋面的对角线方向一致,在双坡屋面的迎风屋面上表现最为明显,在平屋面上也是如此。湍流度越高,屋面风压的非高斯性越高,出现极值的绝对值越大,而且都集中在屋面角部的气流分离区内。在相同的风场条件下, 30° 双坡屋面所产生的最大负极值的绝对值要大于平屋面。但是湍流度的变化对平屋面的影响要远远大于各种形式的 30° 坡度的双坡屋面。

5.4.2 双坡屋面系列最不利极值分布特征

不同类型的双坡屋面在不同风向角下的极值分布是不同的,但是对于设计者来说最简便的方法是采用在所有风向角下绝对值最大的风压值,即独立于风向角的最不利风压。

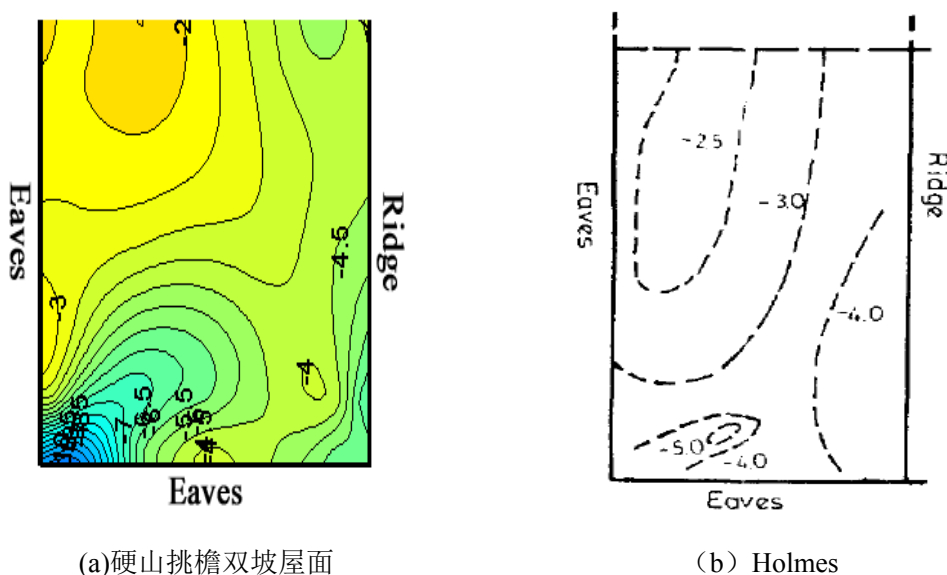


图 5.4 独立于风向角的最不利负极值风压系数与 Holmes^[88]的试验结果的比较

每个测点在所有风向角下产生的最不利负风压系数等值线图如图 5.4 (a) 所示,图 5.4 (b) 是 Holmes 给出的相同坡度的带有挑檐的双坡屋面的最不利负风压系数等值线图。两者产生最不利负风压的区域都是在屋面靠近山墙处,但是本试验硬山挑檐双坡屋面的最小负极值为-10.5,而 Holmes 的试验结果是-5.0,差别比较大。在屋面中部的最不利负风压系数差别不大,本次试验为-3.0~4.0, Holmes 的试验结果是-2.5~3.0,这是由于试验模型局部构造不同和风场参数的差异造成的。Holmes 模型高宽比为 29:70,小于 0.5,而本试验模型为 1。对于高宽比 (h/d) 小于 0.5 的低矮建筑,高宽比越小,相对绕过侧墙的气流而言,翻

过屋面的气流会越多，山墙角部以及迎风屋檐处的风速会越大，屋面负压的绝对值也会增大^[88]。

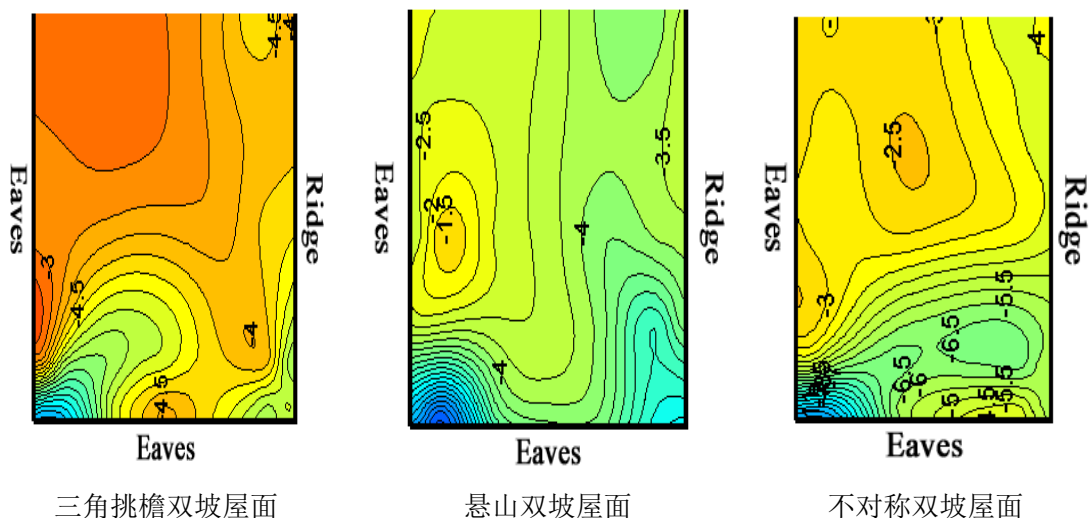
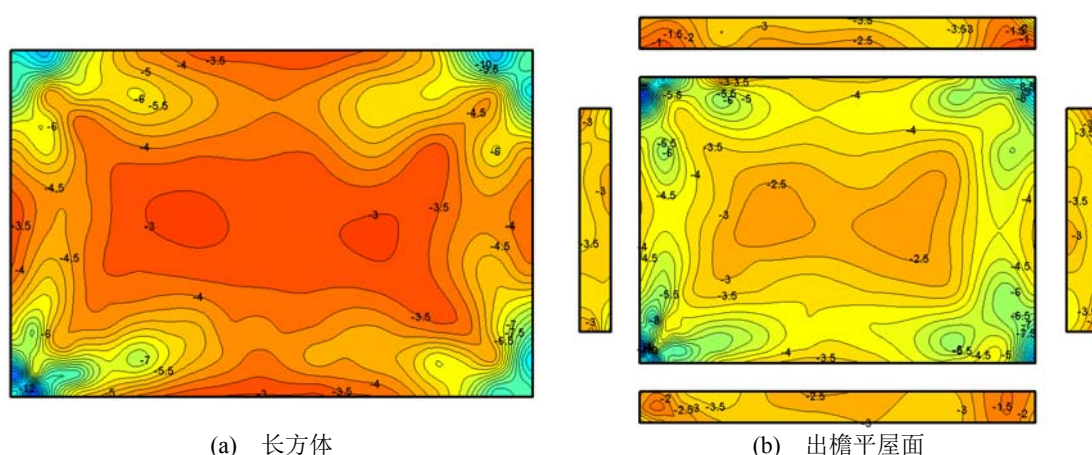


图 5.5 三角挑檐双坡屋面、悬山屋面和不对称屋面的最不利负压系数

从图 5.4 (a) 和图 5.5 中可以看出，四种类型的双坡屋面的最不利负风压系数都发生在屋面的挑檐与山墙上的角部，其中以悬山双坡屋面的最不利负风压系数为最小，而三角挑檐双坡屋面的最不利负风压系数要小于硬山挑檐的。这说明屋檐形式的不同对于屋面的最不利负风压系数有一定的影响。不对称双坡屋面由于坡角较其他三种双坡屋面大，因而在屋脊与山墙的角部也出现了比较大的负压值。这部分屋面的强度以及和其他构件的连接需要特别关注。

5.4.3 平屋面系列最不利极值分布特征



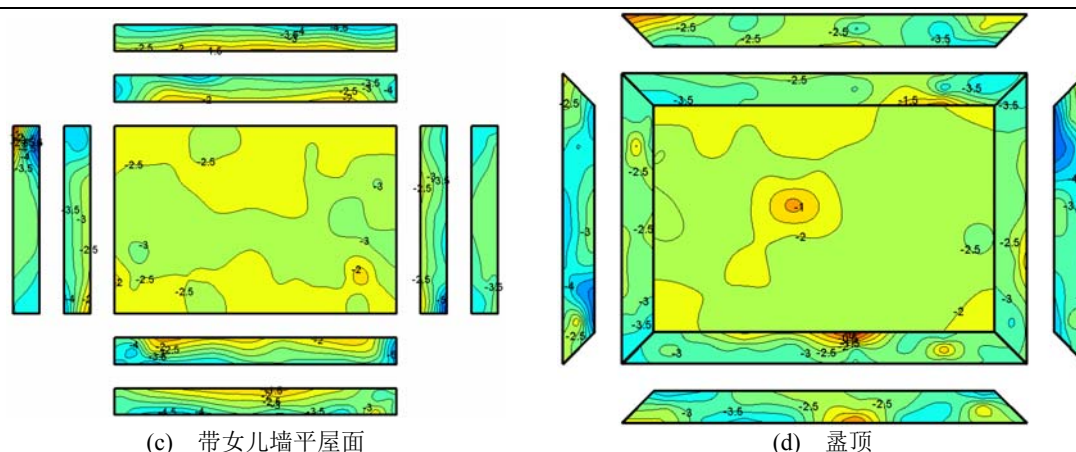


图 5.6 独立于各风向角下的最不利极值负压

建筑物表面的极值风压对于建筑设计来说具有重要的意义。图 5.6 表示的是所有风向角下的最大极值风压（负压）的等值线图。从图中可以看到分布图基本对称，其中长方体和出檐平屋面的较大的极值负压出现在各个屋面角部，并且极值风压的变化非常复杂而且数值比较大，长方体的绝对值最大达到-14.5，出檐平屋面达到-12.53；相比之下，屋面内部区域的变化趋势非常平稳，但是数值相比较边缘角部区域要小一些，都在-2.5~-3.5 之间。带女儿墙平屋面和盪顶的屋面的极值风压分布相比较前两个模型要平缓的很多，只有屋面中央和边缘区域有变化，带女儿墙平屋面绝大多数区域都处于-2.5~-3 之间，盪顶屋面绝大多数区域最不利极值风压在-2~-2.5 之间，最中央的区域极值风压的绝对值反而最小。

在屋面的附属部分，挑檐下表面的极值负压的绝对值相比屋面来说要小得多；带有女儿墙和盪顶的平屋面的最不利极值风压与长方体屋面相比要小得多，其女儿墙墙面本身的最不利极值风压在局部区域绝对值最大为-6，其绝对值要大于屋面的最不利极值风压。

从分布图上可以看出，挑檐可以使得平屋面的局部极值风压的绝对值减小，女儿墙和盪顶等可以遮挡屋面的附属结构可以整体减小平屋面的极值风压。附属结构本身的最不利极值风压也要比长方体屋面的要小很多。这说明对于平屋面来说，这几种附属结构可以比较有效地减小屋面本身的最不利极值风压。

5.4.4 四坡屋面系列最不利极值分布特征

B、C 两类风场条件下所有风向角下每一个测点的最不利极值风压的等压线分布图如图 5.7 所示。在 B 类风场下对于坡度为 30° 的双坡屋面和四坡屋面来说，产生最不利荷载的区域都在挑檐与挑檐的角部区域，或是戗脊与挑檐接合

的角部区域。但是悬山双坡屋面的偏向挑檐边缘，而四坡屋面则偏向戗脊线。在所有风向角下所有测点中绝对值最大的负极值风压系数悬山双坡屋面是-12,但是四坡屋面只有-7。同样地，平面图与四坡屋面完全一致的庑殿顶产生最不利荷载的区域也是在偏向戗脊线的戗脊与挑檐接合的角部区域，绝对值最大的负极值风压系数为-5，要比四坡屋面大，但是还是比悬山双坡屋面要小。

这说明长宽比为 3:2 屋面坡度为 30°的四坡屋面的最不利极值风压要比双坡屋面减小 42%，同样比例的庑殿顶的最不利极值风压也要比双坡屋面减小 23%。庑殿顶的最不利极值风压的绝对值要比四坡屋面大（无论是在 B 类风场还是 C 类风场），四坡屋面 C 类风场下的最不利荷载是-5.5 要比 B 类风场增加 37.5%。庑殿顶在 C 类风场下的最不利负极值风压系数是-6，比 B 类风场增加 20%。在相同的风场条件下，坡度为 30°（长宽比为 3:2）的四坡屋面产生的最不利负极值风压系数的绝对值要小于双坡屋面，也要小于庑殿顶。

多次的风灾调查显示，台风气旋中建筑物屋面的破坏情况来看四坡屋面的性能要比双坡屋面好得多^{[89][90]}，Meecham 等人^[91]也对一对坡度为 18.4°的双坡屋面和四坡屋面进行了平均风压和极值风压的数值大小和分布的对比研究，研究发现四坡屋面的最不利极值风压要比双坡屋面减小 50%。由于缺少四坡屋面的风压特征随屋面坡度变化的研究和公认的结论，Y.L.Xu 等人^[9]分别对坡度为 15°、20°和 30°的三种四坡屋面的建筑模型进行风洞试验，试验结果表明：30°坡度的四坡屋面位于角部的最大的最不利极值负风压系数是这三种坡度中最大的（绝对值）；与同坡度的双坡屋面相比，15°和 20°的四坡屋面的最不利负风压系数要小得多（绝对值），然而 30°的四坡屋面和双坡屋面的最不利负风压系数却几乎相同。

由于 Y.L.Xu^[9]的风洞试验的模型的长宽比为 2:1，而且文章中也没有四坡屋面的最不利极值风压关于长宽比这个参数变化的规律，而本文的试验模型长宽比为 3:2，所得到的风压分布肯定是不同的。坡度 30°的四坡屋面由于带有四条挑檐，所以可以与它进行比较研究的是双坡屋面系列中的悬山屋面。

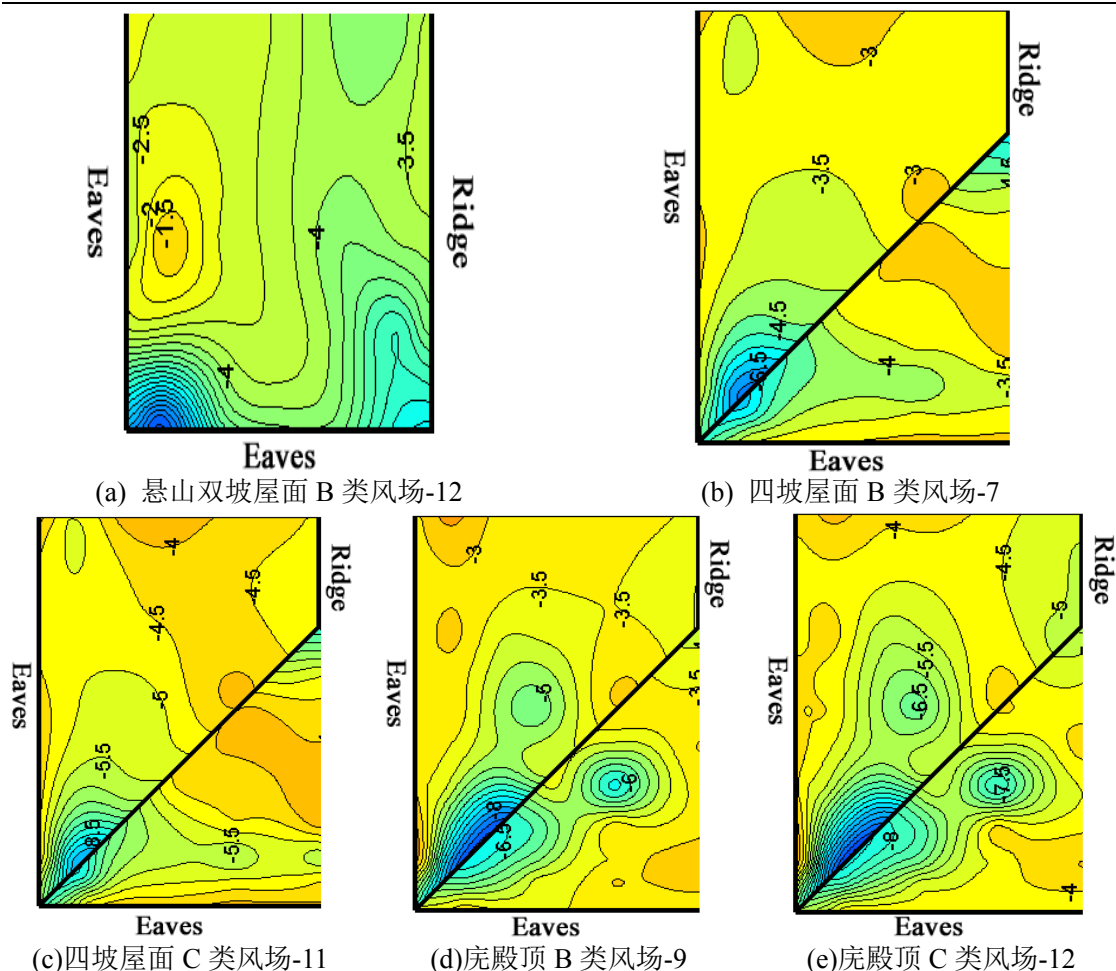


图 5.7 独立于风向角的最不利负极值风压系数分布图

5.5 本章小结

本章首先介绍了目前在风工程领域常用的几种极值计算方法。然后，运用四种极值估算方法对本次低矮房屋风洞试验中的 9 种工况的数据进行计算。通过与常用极值方法计算结果比较，验证了 Quan et al 法估计极值的准确性、稳定性和可靠性。最后，利用这一方法分析了各试验模型屋面的极值分布规律，得到以下结论：

(1) 对于在每个风向角下的测点极值，Davenport 法误差最大，离散性也最大，估算的极值严重偏离标准极值，而且偏危险；Kareem&Zhao 法和 Sadek-Simiu 法的估值则是随着风向角的不同，估算的结果出现不稳定性，有的情况是 Kareem&Zhao 法比 Sadek-Simiu 法更接近标准值，有的工况则是 Sadek-Simiu 法比 Kareem&Zhao 法更理想；Quan et al 法对于屋面风压的负极值的估算都很接近标准极值，误差很小并且离散性都比其他三种方法小很多。

(2) 各风向角下的最不利风压系数误差率比较上，Davenport 法和

Kareem&Zhao 法在每个风向角下误差率均为负值,误差率都在-20%~-60%,个别达到-80%。Sadek-Simiu 法误差率 20%~-60% (有个别风向角误差率达到-80%), Quan et al 法误差率 20%~-20%之间 (只有个别风向角误差率达到 40%), 可以看出这四种方法中 Quan et al 法误差率最小。Davenport 法和 Kareem&Zhao 法估值明显偏于危险,其中以 Davenport 法偏差最大。Sadek-Simiu 法和 Quan et al 法估算的结果是分布在标准极值的两侧,Quan et al 法要比 Sadek-Simiu 法估算的结果偏于保守。

(3) 从各工况对应的累积误差来看,Quan et al 法的误差均值始终在 $\pm 20\%$ 左右的范围内(除去一个工况),误差均值最小,Sadek-Simiu 法次之,误差均值均大于 40%,其他两种方法误差率大都在 2 倍以上,误差均值最严重的 Davenport 法甚至达到 2.8~3.5 倍,个别情况甚至达到 4.8~5.3 倍。

(4) 从整体的极值分布特征来看,Davenport 法与 Quan et al 法估算的极值在不同屋面坡度(相同长宽比、高宽比)的屋面的最不利风压系数分布图基本上一致的,并且在屋面最不利风压系数分布图随屋面坡度的变化趋势也是一致的。差别主要体现在等值线的数值上。综上所述,可以看到,Quan et al 法是一种较为可靠、准确的极值估算方法,它可以在极值计算和工程领域中应用。

(5) 屋面出现最大负极值(绝对值)时的风向角会因屋面几何形状不同以及屋面坡度不同而不同。从双坡屋面和平屋面的极值分布分布图来看,出现最不利极值负压的风向角的方向大致与屋面的对角线方向一致。湍流度越高,屋面风压的非高斯性越高,出现极值的绝对值越大,而且都集中在屋面角部的气流分离区内。在相同的风场条件下,30° 双坡屋面所产生的最大负极值的绝对值要大于平屋面。但是湍流度的变化对平屋面的影响要远远大于各种形式的 30° 坡度的双坡屋面。

(6) 四种类型的双坡屋面的最不利极值负压都发生在屋面的挑檐与山墙上的角部,其中以悬山双坡屋面的最不利极值负压最小,这说明挑檐形式的不同会对屋面最不利负风压系数产生一定的影响。不对称双坡屋面由于坡角较其他三种双坡屋面大,因而在屋脊与山墙的角部也出现了比较大的负压值。这部分屋面的强度以及和其他构件的连接需要特别关注。

(7) 平屋面系列中的长方体和出檐平屋面的较大的极值负压出现在各个屋面角部,并且极值风压的变化非常复杂而且数值比较大。带女儿墙平屋面和盪顶的屋面的极值风压分布相比较前两个模型要平缓的很多,只有屋面中央和边缘区域有变化。挑檐可以使得平屋面的局部极值风压的绝对值减小,女儿墙和盪顶等可以遮挡屋面的附属结构可以整体减小平屋面的极值风压。附属结构本身的最不利极值风压也要比长方体屋面的要小很多。这说明对于平屋面来说,这几种附

属结构可以比较有效地减小屋面本身的最不利极值风压。

(8) 四坡屋面和庀殿顶产生最不利极值风压的区域都在挑檐与挑檐的角部区域,或是钱脊与挑檐接合的角部区域。长宽比为 3:2 屋面坡度为 30° 的四坡屋面的最不利极值风压要比双坡屋面减小 42%,同样比例的庀殿顶的最不利极值风压也要比双坡屋面减小 23%。庀殿顶的最不利极值风压的绝对值要比四坡屋面大。在相同的风场条件下,坡度为 30° (长宽比为 3:2) 的四坡屋面产生的最不利极值风压系数的绝对值要小于双坡屋面,也要小于庀殿顶。

第6章 结论与展望

6.1 结论

本文的主要工作是风洞试验中的刚性模型测压试验方法研究了四种不同系列的低矮房屋的风荷载特性。文章首先回顾总结了国内外几十年关于低矮房屋抗风研究的成果和进展,着重讨论了在风洞试验和现场实测方面的研究成果。本文为了适应我国沿海地区低矮建筑抗风的要求,在查阅资料和调研的基础上,选取了我国沿海地区具有代表性的四种系列 13 种低矮建筑,在大气边界层风洞中进行了细致的试验。针对试验得到的海量数据,着重对双坡屋面系列和平屋面系列进行了屋面风压的非高斯特性分析,并找出了适合低矮房屋的极值荷载的计算方法。

本文的主要结论有以下几方面:

(1) 双坡屋面最大风压系数都出现在屋面的角部,在屋脊及屋面边缘附近的平均风压系数绝对值要比屋面内部区域大一些。最不利负风压极值随屋檐形式的变化而变化。屋面的不同部位产生最大风压系数的风向角是不同的。某些部位对于特定的风向角极为敏感。在针对屋面的结构设计中,屋面风压系数的取值应该分区域设计。

(2) 平屋面和双坡屋面的最不利出现在挑檐边缘,而四坡屋面系列的则出现在戗脊线附近区域。极值风压相同长宽比为 3:2,坡度 30° 的四坡屋面和庑殿顶都要比双坡屋面的平均风压和最不利极值风压要小,性能要比双坡屋面优。

(3) 挑檐形式的变化对于坡屋面的中心区域的风压系数的影响很小,但是在其它部位,挑檐形式总有不同程度的影响。挑檐的上下表面同一区域的最大极值的出现并不是同步的;三角挑檐的形式容易产生较大的极值风压;悬山挑檐的下表面在 0° 风向角时易产生绝对值比较大的负极值风压。双坡屋面的挑檐形式的变化只会影响屋面的局部风压,对于屋面的整体风压则影响不大。在迎风挑檐处,在屋檐上表面的负压和下表面的正压的共同作用下,三角挑檐屋面要比硬山挑檐屋面在挑檐边缘部分更容易受到破坏,结构设计中应该引起重视。

(4) 低矮房屋表面的脉动风压系数随湍流度增大而增大,一般在迎风面附近比较大。随着湍流度的增大,表面的正负风压系数极值的绝对值都有不同程

度的增加，尤其是负风压系数极值在不同的风向角下在屋面的不同部位更是产生了比较大的增幅。

(5) 0° 风向角下，三种山墙使屋面风压的绝对值减小，背风屋面在数值和分布上没有变化。在 45° 和 60° 的斜风向角下屋面的迎风屋面在距离山墙一定距离的地方出现了一条剃度比较缓和的带状区域，锥形涡状的分布更加靠向屋面中部了。 90° 风向角下，等压线比较密集的区域由标准双坡屋面的边缘变化到了屋面的中部，并且梯度都减小了。三种带有典型山墙的双坡屋面的脉动风压系数都大于标准双坡屋面，其中波动最大的马头形山墙、三角形山墙，这是因为由于山墙顶部形状的不同，对于不同测点的影响也就不同。山墙对于挑檐的影响，山墙的遮挡作用会减小挑檐的风压。

(6) 三种典型山墙从高度上（从底部向上）看在迎风边缘上第一个突变处产生绝对值较大的负压， 0° 风向角下的山墙平均风压分布图中那个可以看到三角形山墙所受到的吸力作用是这四种山墙中最大的。在 45° 风向角下这三种形式的山墙表面测点的平均风压系数的最大值都要比标准山墙的大 2 倍多，尤其以马头形山墙的最大。 90° 风向角下，山墙在顶部和两侧边缘的形状上的改变，不仅增加了墙面的局部风压，还改变了墙面的平均风压的分布特征，比较大的风压区域从屋面中部迁移到延伸出屋顶和前后墙的山墙顶部和两侧的边缘部分。三种山墙产生脉动风压最大值的区域在墙面顶部的迎风边缘。迎风边缘的形状改变会减小墙面的脉动风压系数，改变的折点越多脉动风压系数减小的也就越多。

(7) 屋面测点的非高斯性与风向角由很密切的关系，即与来流风的分离区部位的有很大关系。位于屋面边缘、屋面的挑檐和山墙的角部区域以及屋脊附近区域这些部位往往非高斯性非常显著。在相同风向角下，湍流度越高，偏差系数的绝对值就越大。低矮房屋的屋面风压的非高斯特性主要是来流风遇到建筑物形状引起的空间流场的改变造成的。 0° 风向角下迎风屋面顺风向处于气流分离区的前三排测点的空间相关性很强，其它测点相关性很弱，在屋脊处气流二次分离，整个背风屋面的非高斯性都很强，而背风屋面测点的相关性除去最边缘的一排点相关性都很强。在横风向测点的空间相关性展现的是作用于屋面表面涡旋的特性，涡旋横断面的一侧测点与其它测点的相关性依次减弱，直至弱相关。中心测点以与其它测点的相关性呈对称递减。

(8) 低矮房屋屋面的风压的非高斯特性，使得风压的概率分布曲线严重偏离高斯分布，概率密度函数进行拟合，曲线拟合的结果显示对于右偏态的非高斯分布，weibull 分布拟合的情况最好；对于屋面控制荷载的负压区（左偏态）的概率分布，Lognormal 分布和 Gamma 分布拟合的情况都很理想，从总体来看（无

论是负向尾部区还是正向尾部区) Lognormal 分布拟合的情况更优。但是从以追求屋面控制荷载的极值估算来说, Lognormal 分布和 Gamma 分布都可以做为其概率密度函数来使用。

(9) 对于在每个风向角下的测点极值、各风向角下的最不利风压系数误差率比较以及从各工况对应的累积误差来, 用于风压极值计算的峰值因子法和改进的峰值因子法估值明显偏于危险, 其中以峰值因子法偏差最大。Sadek-Simiu 法和全涌方法估算的结果是分布在标准极值的两侧, 全涌方法要比 Sadek-Simiu 法估算的结果偏于保守。从整体的极值分布特征来看, 峰值因子法与全涌方法估算的极值在不同屋面坡度(相同长宽比、高宽比)的屋面的最不利风压系数分布图基本上一致的, 并且在屋面最不利风压系数分布图随屋面坡度的变化趋势也是一致的。差别主要体现在等值线的数值上。全涌方法是一种较为可靠、准确的极值估算方法, 它可以在极值计算和工程领域种应用。

6.2 进一步工作的方向

关于低矮房屋的风荷载特性和抗风研究国外已经开展的很多, 而国内的研究刚刚起步。由于我国的风环境特别是建筑形式和国外不同, 国外的一些研究结果我们可以借鉴, 很多成果无法直接应用。所以, 针对我国自己的低矮建筑, 系统、全面地开展抗风研究是非常必要和非常紧迫的。

由于试验条件的限制以及模型数量选择的局限性, 本文没有对特色建筑的低矮房屋风荷载受长宽比、坡度变化等参数的影响规律性进行深入系统的分析。还需要对以下几个方面进行进一步的深入研究:

(1) 对于双坡屋面、平屋面以及四坡屋面等低矮建筑常用的屋面形式, 不同坡度、不同长宽比、高宽比等几何参数对房屋表面的风压分布的变化规律的影响也是尤为复杂和重要的。还有由于建筑高度比较矮, 低矮房屋受地面粗糙度以及地形地貌的影响尤为突出, 但现在对风场条件的研究还是十分的不足, 导致了风环境在风洞模拟中不是十分准确, 使试验数据的误差增大, 因此对于风环境以及低矮房屋在现场实测的研究就显得十分紧迫。

(2) 低矮房屋尤其是居住建筑的围护结构的非高斯特性研究还不够详细和深入, 目前在非高斯方面研究比较多的是大跨建筑物。这直接影响关于风压的极值计算, 目前广泛应用的极值计算方法是极值因子法, 但是它是建立在高斯假定的基础上, 后来有许多方法对其进行了改进, 国内外的学者也提出了许多不同的极值计算方法, 但是很多方法稳定性很差, 到目前为止还没有一个通用的有效的计算方法。

(3) 低矮房屋存在的形式通常是以群体形式出现的, 对其进行群体干扰的模拟是更为复杂、困难的课题。建筑物群体干扰的研究分析包含了大量了变量参数, 如建筑物的尺寸和形状(包括受扰建筑物的外形尺寸、施扰建筑物的高度以及截面尺寸的影响)、风速和风向角、地貌类型和场地条件等等, 最重要的是邻近建筑物的相对位置。这些因素会使得研究工作和试验变得非常复杂和繁琐, 要进行大量的试验以及后续试验数据的处理的工作量巨大。现在这一课题的进展非常缓慢, 基本以研究干扰因子为主, 而对于干扰建筑物的干扰机理的理论研究处于起步阶段, 而且试验条件的局限性也阻碍了它的发展。

(4) 由于低矮房屋的建筑形式十分丰富, 同时又是应用特别广泛的, 无论是单体建筑物的试验还是群体干扰的试验都包含了海量的试验数据, 因而在风洞试验以及现场实测的试验数据基础上, 建立低矮房屋的气动数据库是十分必要的。同时运用数据库技术建立数据模型以及专家指导系统, 可以方便结构工程师进行必要的查询和灵活应用。

(5) 需要重新制定建筑规范中关于低矮建筑的风荷载规定, 规范中的规定过于简略, 按照房屋的屋面、墙面以及各种不同参数变化的房屋形式分别进行规定, 而且对于结构荷载和围护结构的荷载也要进行详细的规定。建议对于台风和其他灾害性风灾多发地区需要制定一个区域性的建筑抗风设计标准规范, 以减小建筑物在风灾中的破坏和损失。

致谢

首先感谢导师顾明教授。从论文的选题到研究方向的确定，顾老师提供了很多指导性的意见，研究工作始终在宽松的学术环境和良好的学习条件中顺利开展。顾老师严谨谦逊的治学态度，一丝不苟的工作作风和对学术不懈追求的精神，为我树立了榜样；导师淡泊名利、严于律己、刻苦忘我的工作热情与对事业执着追求的情怀激励着我在今后的工作中不敢丝毫懈怠。在此论文完成之际，向导师两年多来对学生的辛勤培养表示最衷心的感谢！

同时感谢副导师全涌副教授，是全老师的悉心指导引领本人进入本课题，并在整个论文期间给予了本人学术上的指导与解答，始终在学业上给予热情的鼓励和大力的支持，在此深表谢意！

感谢项海帆院士领导的同济大学土木工程防灾国家重点实验室为本文的完成提供了良好的科研氛围。

感谢黄鹏副教授和周晖毅副教授，两位老师在学习期间和风洞试验中给予我诸多指导和帮助关怀。六年多来生活在一个气氛融洽和积极向上的集体中，研究室的师兄姐妹们互学互助，共同渡过了一段难忘的学习时光。在此向朝夕相处的这个集体的陆海峰、孙五一、赵明伟、樊友川、晏克勤、张正维、韩宁、侯庆志、王旭、曹慧兰、陶玲、韩志惠等人和现已毕业的唐意、任淑琰、方平治、王雄江、张建国、潘钧俊、王钦华、张庆华、李雪峰、黄友钦、马文勇、郑德乾、栾桂汉、叶孟洋、杨立翔、米曦亮、米福生、黄强、陈斌、姚震宇、郑远海、李刚、沈祺、李孙伟、梁益、顾玮程、彭新来等同学表示诚挚的谢意。

最后要感谢我的父母和家人，是父母给了我生命以及改变命运的机会，是家人用尽全部心血支持和鼓励我完成学业，谨将本文献给我挚爱的家人。

赵雅丽
2011年6月

参考文献

- [1] Yasushi Uematsu, Nicholas Isyumor. Wind pressures acting on low-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 82(1999) 1-25.
- [2] 张相庭, 结构风工程. 北京, 中国建筑工业出版社, 2006.
- [3] 孙炳楠、傅国宏、陈鸣, 唐锦春, 9417 号台风对温州民房破坏的调查[A], 第七届全国结构风效应学术会议论文, 1995。
- [4] 2006 年度全国“十大自然灾害事件”. *中国减灾*, Vol. 1: 28-31.
- [5] 回望 2008——2008 年十大自然灾害事件. *中国减灾*, Vol. 1: 6-9.
- [6] D. Surry. Wind loads on low-rise buildings: Past, present and future. *Wind engineering into the 21st century*, Larsen, Larose & Livesey(eds). 1999
- [7] H.J.Gerhardt and C.Kramer, Effect of Building geometry on roof wind loading, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44(1992) 1865-1773.
- [8] J.D.Holmes, Wind pressures on tropical housing. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 53(1994) 105-123.
- [9] Y.L.Xu, G.F.Reardon, Variations of wind pressure on hip roofs with roof pitch, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 73(1998) 267-284
- [10] T.Stathopoulos, A.G.Daverport and D.Surry, The assessment of effective wind loads acting on flat roofs, in: *proc 3rd colloq on Ind. Aerodyn.* Aachen. Germany, 14-16 June 1978.
- [11] P.A.Blackmore, Load reduction on flat roofs the effect of edge profile, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29(1988) 89-88
- [12] H.J.Lentheusser, The Effects of Eaves on the Roof Pressure coefficients of Block-Type and Cylindrical Structures, UT mech ETP 6503, Dept. of Mechanical Engineering, University of Toronto, 1965.
- [13] K.J.Dreher and J.E.Cermak, Wind loads on a house roof, Report CER 72-73 KJD-JEC22, Colorado State University, College of Engineering, Ft. Collins, Colorado, 1973
- [14] H.W.Tieleman and T.A.Reinhold, Wind tunnel model investigation for basic dwelling geometries, VPI-E-76-8, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va, 1976
- [15] R.J.Best and J.D.Holmes, Model study of wind pressures on an isolated single-storey house, *Wind Engineering*, James Cook University of North Queensland, Australia, 1978
- [16] T.Stathopoulos, Wind loads on eaves of low building, *J. Struct. Div., ASCE*, 107, ST10, Proc. Paper 16543(1981): 1921-1934
- [17] T.Stathopoulos, H.Luchian, Wind-induced forces on eaves of low buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 55(1994) 249-261
- [18] A.Kareem and P.C.Lu, Pressure fluctuations on flat roofs with parapets, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44(2002) 1775-1786.
- [19] R.J.Kind, Worst suctions near edges of flat roof tops on low-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 25(1986) 31-47.
- [20] A.Baskaran and T.Stathopoulos, Roof corners wind loads and parapet configurations, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29(1988) 79-88.
- [21] D.Surry, J.X.Lin, The effect of surrounding and roof corner geometric modifications on roof

- pressures on roof pressure on low-rise building, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 58(1995)113-138
- [22] R.A.Hazelwood, The interaction of the two principal wind forces on roof tiles, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 8(1981) 39-48.
- [23] J.A.Petrka, G.D.Lamb and J.E.Cermak, Wind resistance of asphaltic roofing shingles, Preprints 7th Int. Conf. on Wind Engineering. Aachen Germany, July 1987
- [24] R.J.Kind, M.G.Savage and R.L.Wardlaw, Prediction of wind-induced failure of loose laid roof cladding system, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29(1988)29-37
- [25] C.Kramer and H.J.Gerhardt, Wind Loads on permeable roofing system, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 13(1993) 347-358.
- [26] H.J.Gerhardt, C.Kramer and K.K.Bofah, Wind loading on loosely laid pavers and insulation boards for flats roofs. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 36(1990)309-318
- [27] T.Amano, K Fujii and S.Tazaki, Wind Loads on permeable roof-blocks in roof insulation systems, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 29(1988) 39-48.
- [28] B. Bienkiewicz and Y.Sun, Wind-tunnel study of wind loading on loose-laid roofing systems, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44(1992) 1817-1828.
- [29] J.D.Holmes, Mean and fluctuating internal pressures in building, Proc. of Fifth Int. Conf. on Wind Eng., Colorado USA Vol. 1, 1979. pp:435-450
- [30] H.Lin and P.J.Saathoff, Building internal pressures: sudden change, Proc. American Society of Civil Engineers, Engineering Mechanics Division, 1981, pp:309-321
- [31] H.Lin and K.H.Phee, Helmholtz oscillation in building models, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 24(1986)95-115
- [32] B.J.Vickery, A.G.Davenport and D.Surry, Internal pressures in low-rise buildings, Proc, 4th Canadian Workshop on Wind Engineering, Toronto, 19/20 November 1984, pp:46-64
- [33] R.I.Harris. The propagation of internal pressures in building, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 34(1990)169-184
- [34] A.R.Woods, P.A.Blackmore, The effect of dominant opening and porosity on internal pressures, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 57(1995)167-177
- [35] T.Katayama and M.Nishida, Wind tunnel tests of wind pressure on regularly aligned buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44(1992) 1799-1810.
- [36] Cheng-Hsin Chang, R.N.Meroney. The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91(2003)1039-1050.
- [37] T.Stathopoulos, D.Surry and A.G.Davenport, Some general characteristics of turbulent wind effects on low-rise structures, Proc. Of the 3th Colloq. on Industrial Aerodynamics, Aachen, 1978, Buildings Aerodynamics Part 1, 1978, pp:221-224
- [38] H.Okada, Y.C.Ha, Comparison of wind tunnel and full-scale pressure measurement tests on the Texas Tech building, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44(1992)1601-1612
- [39] R.J.Kind, Worst suction near edges of flat rooftops with parapets. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 31(1988)251-264
- [40] N.J.Cook, Calibration of the quasi-static and peak-factor approaches to the assessment of wind loads against the method of cook and Mayne. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 10(1982)315-341.
- [41] Yasushi Uematsu, Nicholas Isyumor. Peak gust pressures acting on the roof and wall edge of a low-rise building, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 77&78(1998)217-231

- [42] E.Maruta, H.Ueda, M.Kanda, The local pressure acting on gable roof, The 24th Annual Meeting of College of Industrial Technology, Nihon University, 1991, pp.33-36.
- [43] P.J. Vickery, D. Surry, A.G. Davenport. Aylesbury and ACE: some interesting findings, JWE&IA, Vol. 23, pp:1-18.
- [44] D.Surry, Pressure measurements on the Texas Tech building: Wind tunnel measurements and comparisons with full scale, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 38(1991)235-247.
- [45] A.P.Robertson, Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building, J. Wind Eng. Ind.Aerodyn.38(1991)325-333
- [46] R.P.Hoxey, Structural response of a portal framed building under wind load, J. Wind Eng. Ind.Aerodyn.38(1991)347-356
- [47] 风对结构的作用——风工程导论, 埃米尔·希缪, H·斯坎伦著, 同济大学出版社, 1992.
- [48] AS-1170.2 Australian Standard SAA loading code Part 2, Wind actions, 2002
- [49] J.D.Ginger, C.W.Letchford, Net pressures on a low-rise full-scale building, J. Wind Eng. Ind.Aerodyn.83(1999)239-250
- [50] B.J.Vickery, Gust factors for internal pressures in low-rise buildings. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.23(1986)259-271
- [51] J.D.Ginger, K.C.Mehta, B.B.Yeatts, Internal pressures in a low-rise full-scale building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.72(1997)163-174
- [52] C.W.Letchford, R.E.Iverson and J.R.Mcdonald, The application of the quasi-steady theory to full scale measurements on the Texas Tech building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.48(1993)111-132
- [53] R.V.Milford, J.L.Waldeck, Statistics of full-scale surface pressures, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.2360(1988)35-44
- [54] H.W.Tieleman, Simulation of surface winds for assessment of extreme wind loads on roofs, in: Proc. Of the 9th Int. Conf. on Wind Engineering, Vol.3, New Delhi, Wiley Eastern Ltd., 1995, pp1162-1169.
- [55] R.P.Hoxey, A.P.Robertson. Pressure coefficients for low-rise building envelopes derived from full-scale experiments. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 53(1994) 283-297.
- [56] G.M.Richardson, R.P.Hoxey, A.P.Rokertson, J.L.Short, The Silsoe structures buildings: the completed experiment: Part 1, in: Proc. of the 9th Int. Conf. on Wind Engineering, Vol.3, New Delhi, Wiley Eastem Ltd., 1995, pp.1103-1114.
- [57] R.P.Hoxey, P.J.Richards, G.M.Richardson, A.P.Robertson, J.L.Short, The Silsoe structures buildings: the completed experiment: Part 2, in: Proc. of the 9th Int. Conf. on Wind Engineering, Vol.3, New Delhi, Wiley Eastem Ltd., 1995, pp.1115-1126.
- [58] P.J.Richards, R.P.Hoxey, B.S.Wanigaratne, The effect of directional variations on the observed mean and rms pressure coefficients, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 54/55(1995)359-367.
- [59] R.P.Hoxey, P.J.Richards, Full-scale wind load measurements point the way forward. J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 57(1995)215-224.
- [60] Whalen, T., Simiu, E., Harris, G., Lin, J.& Surry, D. The use of aerodynamic databases for the effective estimation of wind effects in main wind-force resisting system: application to low buildings, JWE&IA, Vol. 77/78, pp685-693.
- [61] S.de Wit. Uncertainty in the prediction of wind pressure coefficients for low-rise buildings in

- an urban environment. Proc. 10th ICWE, Copenhagen, Denmark.
- [62] M. Farge, K. Schneider. Wavelets: Application to Turbulence. Encyclopedia of Mathematical Physics, 2006, pp:408-420
- [63] C. Meneveau, Analysis of turbulence in the orthonormal wavelet representation. J. Fluid Mech. 232 (1991), pp. 469–520.
- [64] H. Higuchi, J. Lewalle, P. Crane. On the structure of a two-dimensional wake behind a pair of flat plates. Phys. Fluids. Vol.6 (1994). pp:297-305.
- [65] J.C. Mumford. The structure of the large eddies in fully developed turbulent shear flow. Part I. The Plane jet. J. Fluid Mech. 118(1982). pp:241-268.
- [66] Azeez M F, Vakakis A F. Proper orthogonal decomposition(POD) of a class vibroimpact oscillations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 240(4):859-889
- [67] Bienkiewicz B. Tamura Y. Ham H. J. et.al., Proper orthogonal decomposition and reconstruction of multi-channel roof pressure[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1995,(54-55):369-381
- [68] Tamura Y., Ueda H., Kikuchi H. et al., Proper orthogonal decomposition study of approach wind-building pressure correlation[J]. J Wind eng Ind Aerodyn 1997(72):421-431
- [69] Holmes J d, Sankaran R, Kwok K C S, Syme M J., Eigenvector modes of fluctuating pressure on low-rise building models[J]. J Wind eng Ind Aerodyn 1997(69-71):697-707
- [70] S.Kho, C.Baker, R. Hoxey. POD/ARMA reconstruction of the surface pressure field around a low-rise structure. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90(2002). Pp:12-15.
- [71] H. J. Ham, B. Bienkiewicz., Wind tunnel simulation of TTU flow and building roof pressure, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 77/78(1998), pp:119-133.
- [72] R. P. Selvam., Computation of pressures on the Texas Tech University building using large eddy simulation, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 67/68(1997), pp:647-657.
- [73] S.A. Bekele, H. Hangan., A comparative investigation of the TTU pressure envelope. Numerical versus laboratory and full scale results, Wind and Structures 5(2-4)(2002), pp:337-346.
- [74] L.S. Cochran, J.E. Cermak., Full and model-scale cladding pressure on the TTU experimental building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 41-44(1992), pp:1589-1600.
- [75] H. Okada, Y. Ha., Comparison of wind tunnel and full-scale pressure measurement tests on the TTU building. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 41-44(1992), pp:1601-1612.
- [76] H.W. Tieleman, D. Surry, K.C. Mehta., Full/model-scale comparison of surface pressures on the Texas Tech experimental building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 61(1996), pp:1-23.
- [77] 罗攀, 基于标准模型的风洞试验研究, 同济大学硕士学位论文, 2004
- [78] J. Lin, D. Surry, H.W. Tieleman., The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 56(1995), pp:235-265.
- [79] R.N. Sharma, P.J. Richards., The influence of Reynolds stress on roof pressure fluctuations, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 83(1999), pp:147-157.
- [80] C.W. Letchford, H.S. Norville., Wind pressure loading cycles for wall cladding during hurricanes, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 53(1994), pp:189-206.
- [81] R.N. Sharma, P.J. Richards., The influence of Helmholtz resonance on the internal pressure in a low-rise building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 91(2003), pp:807-828.
- [82] S. Ahamad, K. Kumar., Interference effects on wind loads on low-rise hip roof buildings, Engineering Structures, 23(2001), pp:1577-1589.

- [83] Tamura, T. et al, Numerical prediction of wind loading on buildings and structures- Activities of AIJ cooperative project on CFD, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 67-68(1997), pp:671-685.
- [84] Mochida A. et al., Comparison of various $k-\epsilon$ models and DSM applied to flow around a high-rise building-report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment, Wind and Structures, 5(2-4)(2002), pp:227-244.
- [85] G. Easom., Improve turbulence models for computational wind engineering, PhD thesis, School of Civil Eng., The University of Nottingham. UK.
- [86] R.P. Hoxey, P.J. Richards, L. Short, A 6m cube in an atmospheric boundary layer flow: Part 1. Full scale and wind tunnel results, Wind and Structures, 5(2-4)2002, pp:165-176.
- [87] P.J. Richards, et al., Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland, Wind and Structures, 5(2-4)2002, pp:151-164.
- [88] J.D.Holmes, Wind Loading of Structures, Spon Press ,London,UK,2001
- [89] Federal Emergency Management Agency, Building performance in hurricane Andrew in Florida observations, Recommendations and Technical Guidance, Federal Insurance Administration, USA,1992.
- [90] P.R. Sparks, J. Baker, J. Belville, D.C. Perry, Hurricane Eleva, gulf coast, August 29-september 2, committee on natural disasters, Commission on Engineering and Technical Systems, Natural Research Council, USA, 1985.
- [91] D. Meecham, D. Surry, A.G. Davenport, The magnitude and distribution of wind induced pressures on hip and gable roofs, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 38(1991)257-272.
- [92] 张相庭. 结构风压和风振计算. 上海: 同济大学出版社, 1985
- [93] A.G. Davenport, Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. Proc. Inst. Civil Eng. 28(1964) 187-196.
- [94] M. Gioffre`, V.Gusella, and M.Grigoriu, Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. I: Stochastic field. J. Struct.Engrg., ASCE, 127(9), 981-989
- [95] M.Gioffre`, V.Gusella, and M.Grigoriu, Non-Gaussian wind pressure on prismatic buildings. II: Numerical simulation. J. Struct.Engrg., ASCE, 127(9), 990-995
- [96] R.D. Marshall. Wind loads on single-story houses. Proc. 8th U.S. Nat. Conf. on Wind Engrg, Fort Collins, Colo. 1975
- [97] T. Stathopoulos. PDF of wind pressures on low-rise buildings. J. Struct. Div., ASCE, 1980,106(5), pp: 973-990.
- [98] 潘承毅, 何迎晖.数理统计的原理与方法.上海: 同济大学出版社, 1992
- [99] 贾沛璋.误差分析与数据处理.北京: 国防工业出版社, 1992
- [100] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计. 高等教育出版社. 2001
- [101] 孙瑛. 大跨屋盖结构风荷载特性研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 哈尔滨, 2007
- [102] H.J. Ham, B .Bienkiewicz. Characteristics of roof peak pressures on model of the TTU test building. 11th international Conference on Wind Engineering, LuBBock, Texas, 2003, pp:957-964
- [103] 徐华舫. 空气动力学基础(上册). 北京航空学院出版社. 1987: 94-10
- [104] 付国宏, 低层房屋风荷载特性及抗台风设计研究, 浙江大学博士学位论文, 2002
- [105] 陆锋, 楼文娟, 孙炳楠., 大跨度平屋面结构风洞试验研究, 建筑结构学报, 2001(6)
- [106] 中国建筑结构荷载规范 (GB50009-2006) [S], 2006
- [107] AIJ Recommendations for Loads on Buildings[S], Architectural Institute of Japan, 2004.

- [108] ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[C]. American Society of Civil Engineers, New York (2005)
- [109] AS /N/ZS 1170. 2:2002, Australian /New Zealand Standard Minimum Design Load & Structures Part 2: Wind actions. Standards Australia[S], North Sydney, NSW (2002)
- [110] 石蓉蓉,雷媛,王东法等.1949-2007年影响浙江热带气旋灾情分析及评估研究[J].科技通报,2008, 24(05):612
- [111] 台州市建设规划局. 0414号台风“云娜”台州民房倒塌调查报告[M].浙江台州,2004
- [112] 葛学礼,朱立新,于文等. 浙江苍南县“桑美”台风建筑灾害与抗风技术措施[J]. 工程质量,2006,(10):18-22
- [113] T. Stathopoulos, Turbulent wind action on low-rise buildings, PH.D Thesis, Faculty of Engineering science [D], The University of Western Ontario, Canada, 1979
- [114] J.D.Holmes, Wind pressure and force on tropical houses[c], Final Report of Project No.17 of the Australian Housing Research Council, Melbourne, Australia, 1980
- [115] 周暄毅 (2004). 大跨度屋盖结构风荷载及风致响应研究, 同济大学. 博士
- [116] Y. Quan, Y. Tamura, M. Matsui, S. Y. Cao, A. Yoshida ,TPU aerodynamic database for low-rise buildings[c], ICWE12 CAIRNS,Australia,2007
- [117] Gartshore, I.S. (1973), The effects of free-stream turbulence on the drag of rectangular two-dimensional prisms[R]. Boundary Layer Wind Tunnel Report, BLWT-4-73, University of Western Ontario.
- [118] 中国民居建筑 华南理工大学出版社
- [119] J.D. Holmes, Wind acting on glass and Brown's integral, Eng. Struct, 4, 226-230
- [120] A. Kareem, J. Zhao (1994). Analysis of Non-Gaussian Surge Response of Tension Leg Platforms under Wind Loads, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Vol. 116; 137-144.
- [121] C. Soize (1978). Gust Loading Factors with Nonlinear Pressure Terms, J. of the Structures Division, ASCE, Vol. 104(6): 991-1007.
- [122] Q.S. Li, I. Calderone, W.H. Melbourne (1999). Probabilistic characteristics of pressure fluctuations in separated and reattaching flows for various free stream turbulence. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 82: 125-145
- [123] M. Kasperski (2000). Specification and codification of design wind loads, Habilitation thesis, Department of Civil Engineering, Ruhr University Bochum.
- [124] M. Chen (2000). Characterization of wind pressure fluctuations on a gable roof house, MEngSt Thesis, the graduate school of Clemson University.
- [125] F. Sadek, E. Simiu (2002). Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design, J. of Engineering Mechanics, ASCE, 5: 530-539.
- [126] 栾桂汉 (2006). 高层建筑围护结构的风压和阵风系数研究. 同济大学硕士学位论文.
- [127] W.H. Melbourne (1977). Probability distributions associated with the wind loading of structures, Civil Engineering Transaction of the Inst. of Engineers (Australia) CE19 1, 58-67.
- [128] 黄翔, 顾明 (2006). 悬臂弧形挑篷脉动风压的概率特征, 同济大学学报(自然科学版), Vol. 35 No 9: 1153.1157
- [129] Zhongfu Ge (2004). Analysis of surface pressure and velocity fluctuations in the flow over surface-mounted prisms, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State

University, the Department of Engineering Science and Mechanics.

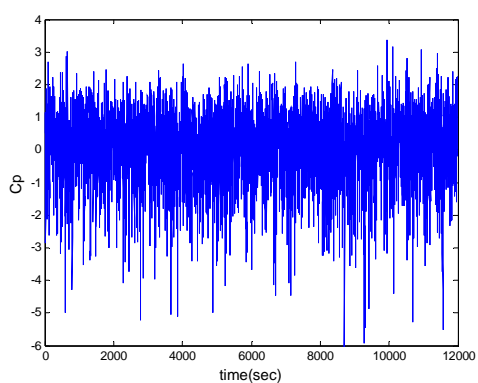
- [130] 全涌. 非高斯风压的极值计算方法研究. 力学学报
- [131] J.R. Mayne, N.J. Cook (1980). Acquisition, Analysis and Application of Wind Loading Data, Wind Engineering, Proceeding of Fifth International Conference, Pergamon Press.
- [132] M. Giofrè, V.Gusella (2002). Damage Accumulation in Glass Plates. Journal of Engineer Mechanics, ASCE, 7, 801-805.
- [133] M. Grigoriu (1995). Applied non-Gaussian processes, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [134] 陈斌. 典型低矮建筑屋面风压的概率统计分析及其极值研究. 同济大学硕士学位论文. 上海, 2008

附录 A

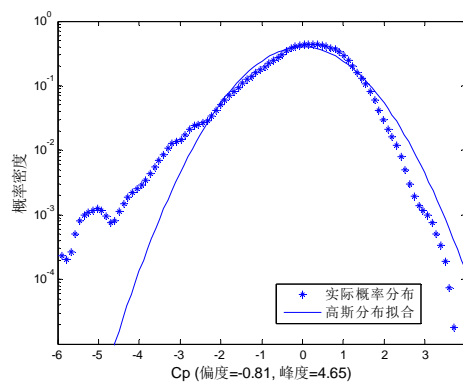
三角挑檐屋面在 B、C 类风场下屋面典型测点的时程曲线图和概率密度分布图

(1) 测点 1-1

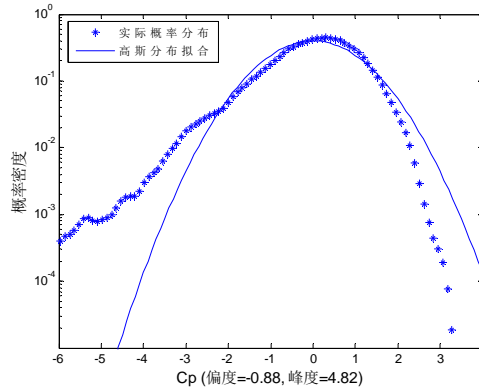
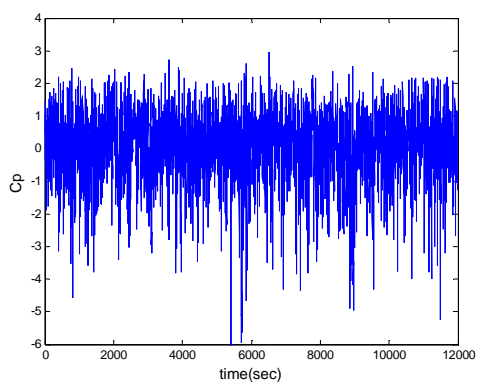
时程曲线图



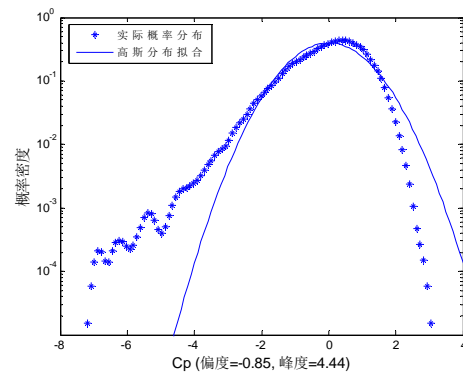
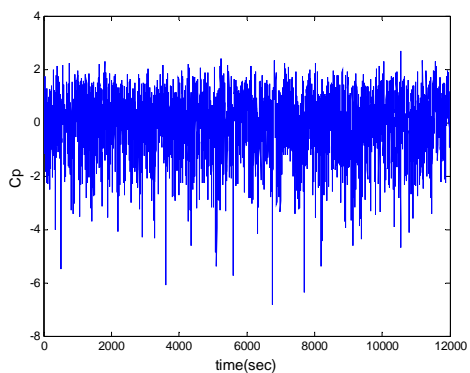
概率密度分布图



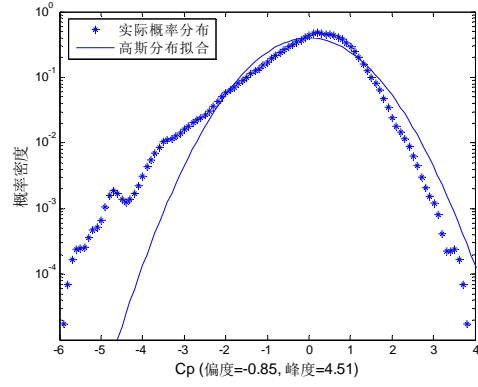
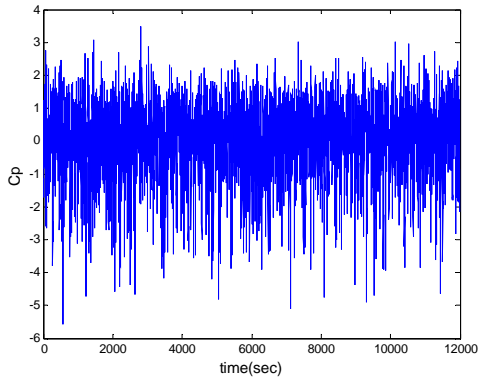
B 类风场 0°风向角



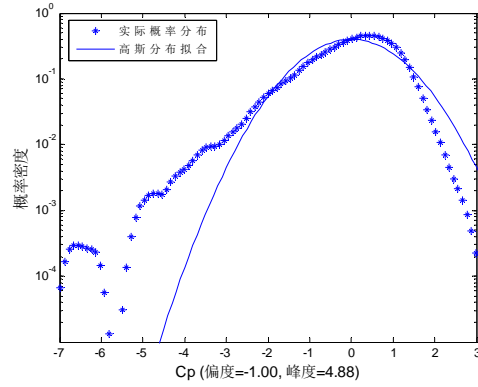
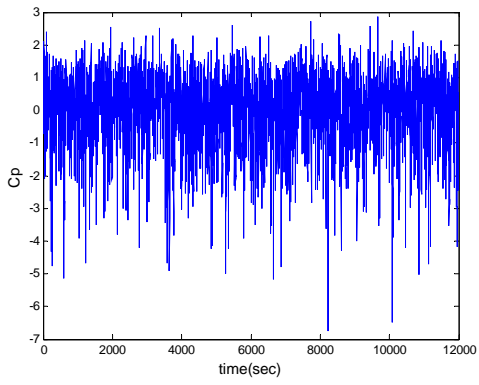
B 类风场 45°风向角



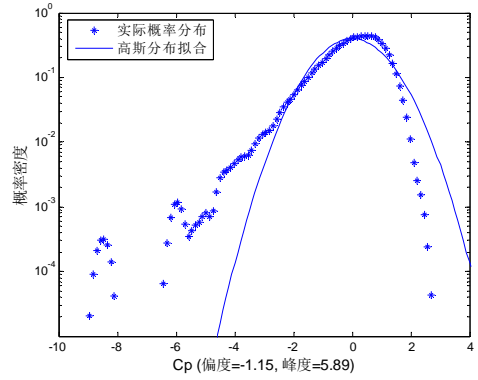
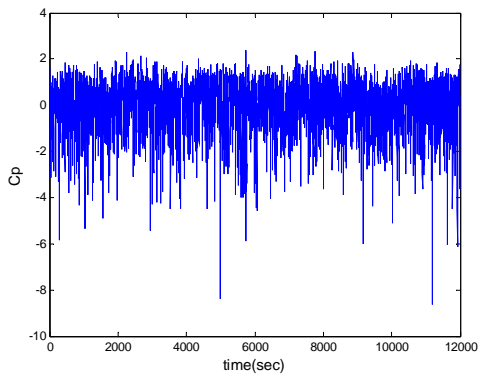
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

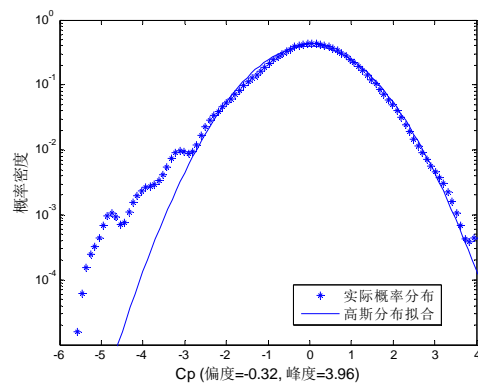
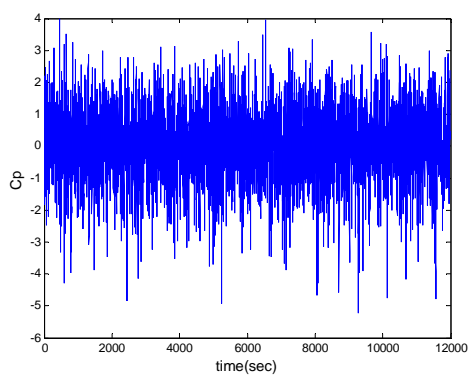


C 类风场 90°风向角

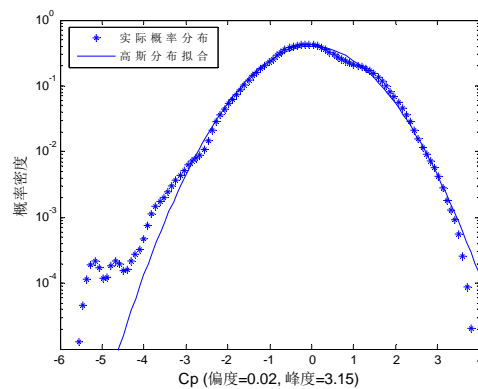
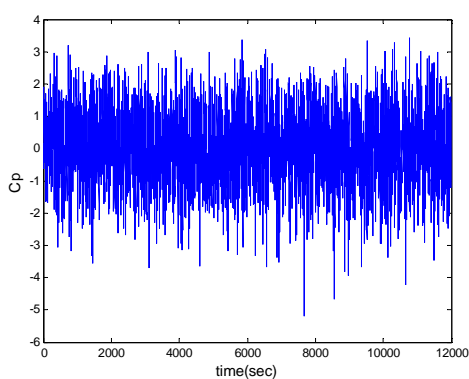
(2) 测点 1-3

时程曲线图

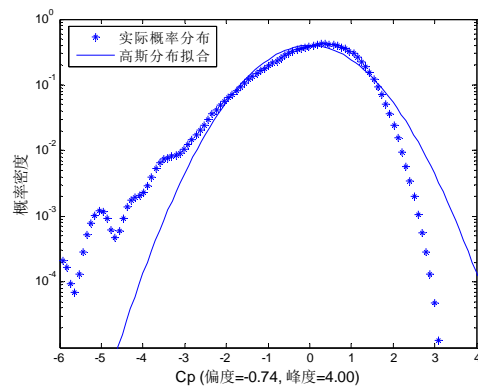
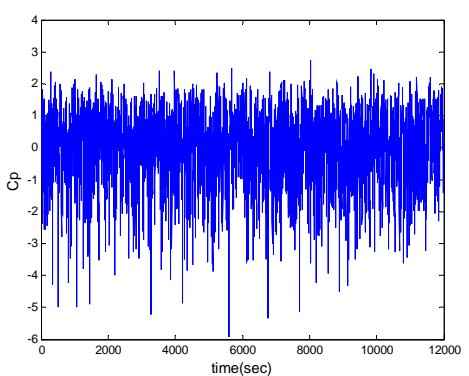
概率密度分布图



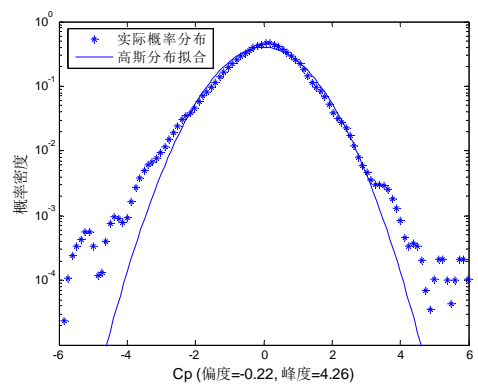
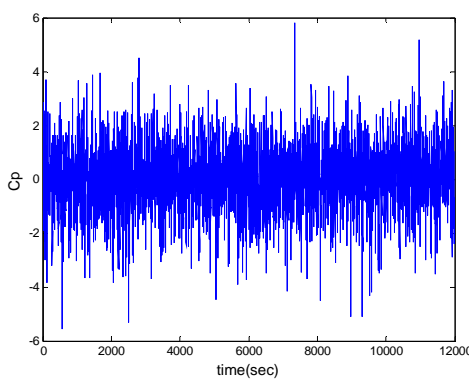
B 类风场 0°风向角



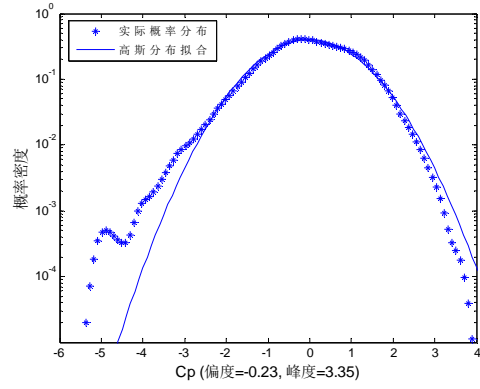
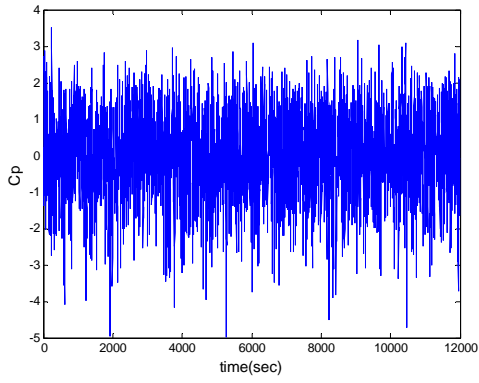
B 类风场 45°风向角



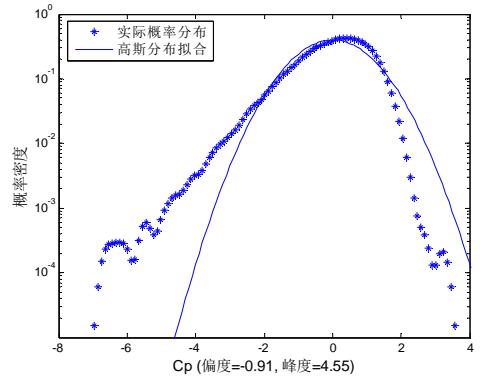
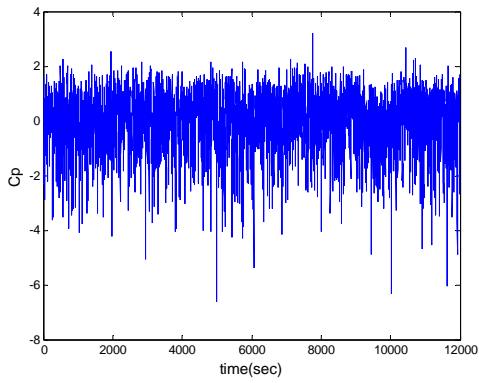
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

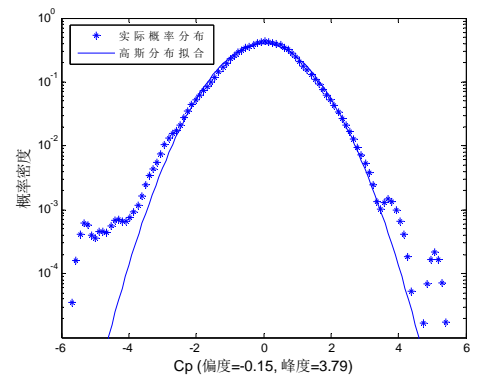
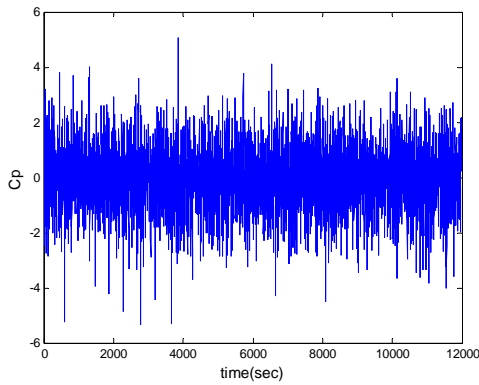


C 类风场 90°风向角

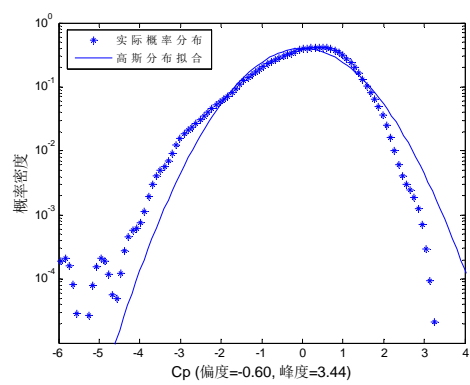
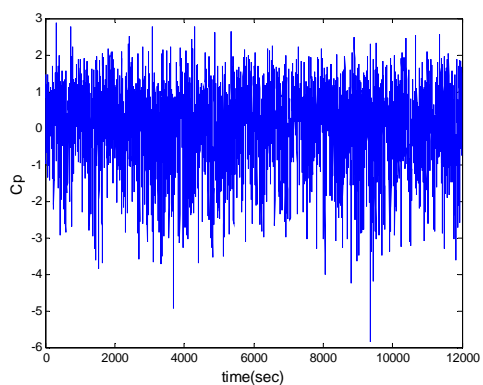
(3) 测点 1-6

时程曲线图

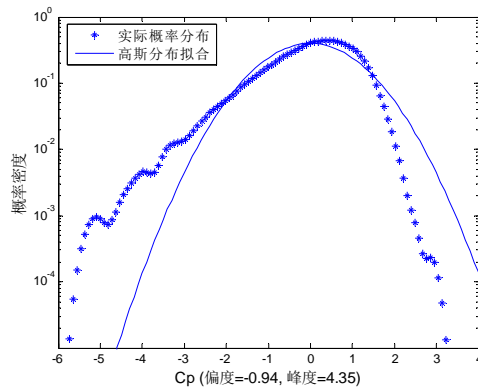
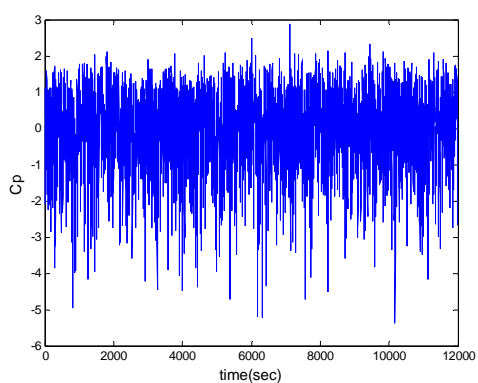
概率密度分布图



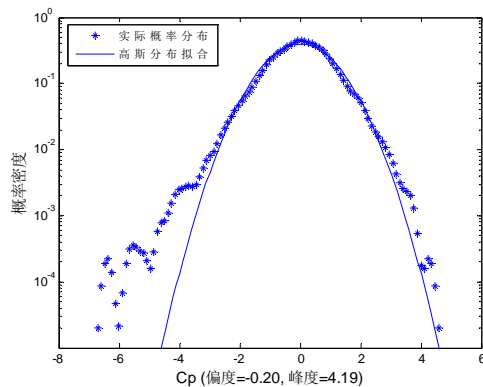
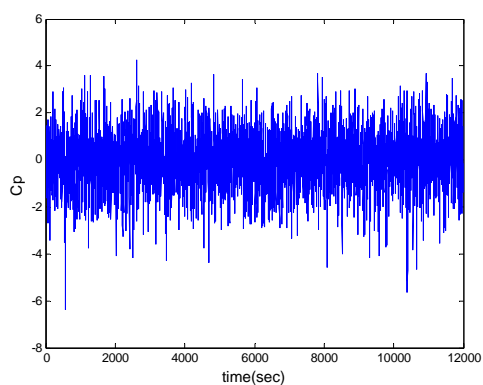
B 类风场 0°风向角



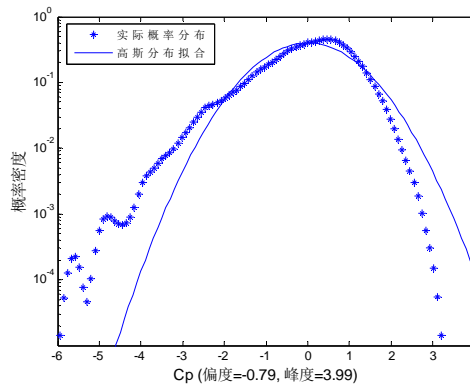
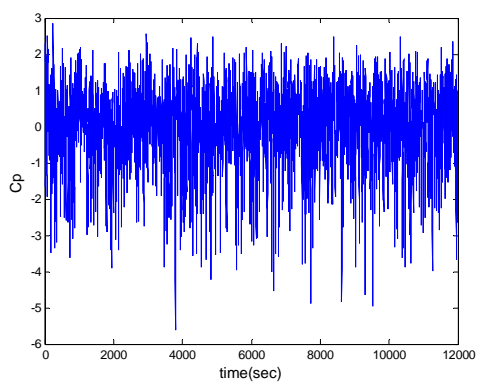
B 类风场 45°风向角



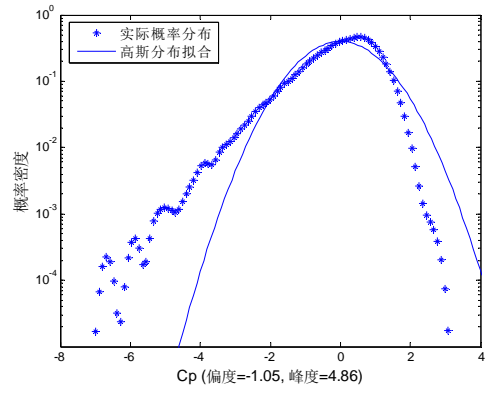
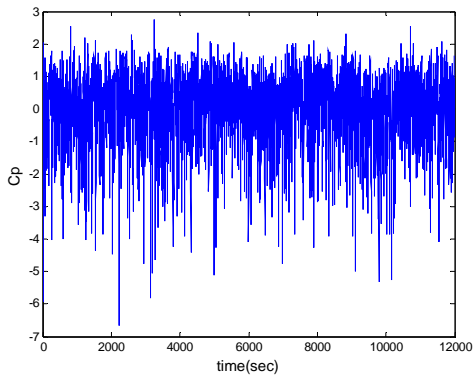
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

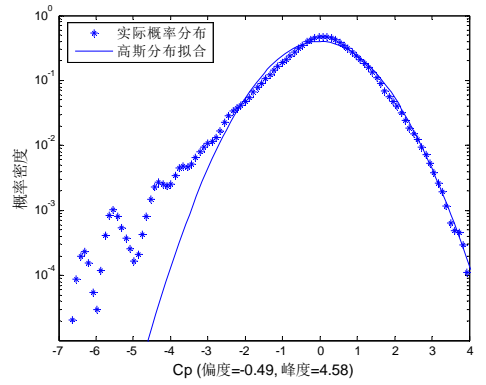
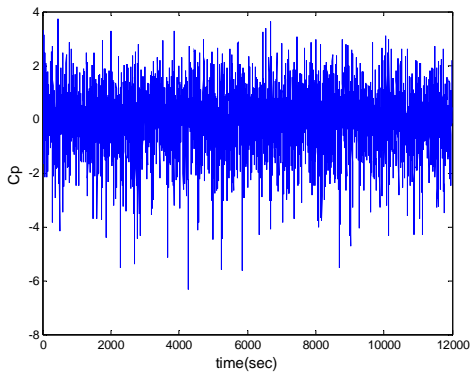


C类风场 90°风向角

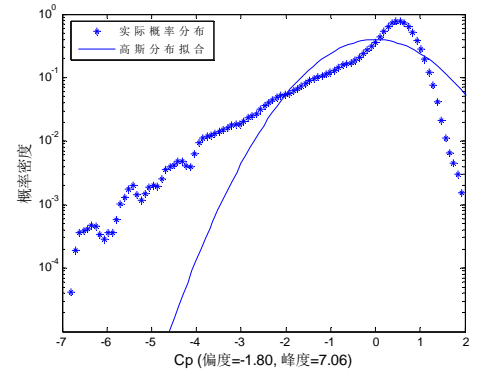
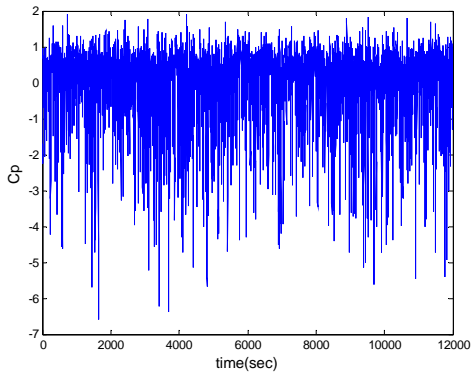
(4) 测点 1-9

时程曲线图

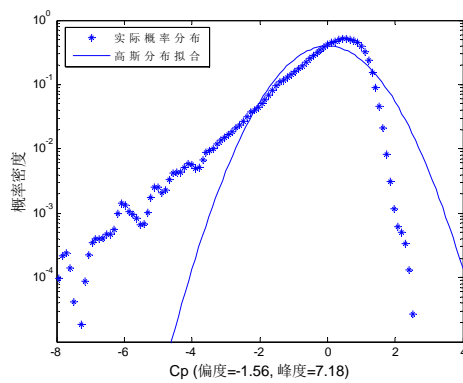
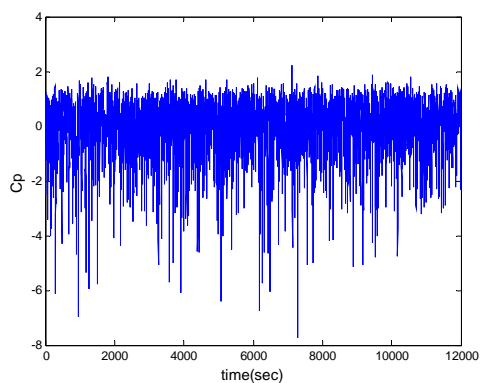
概率密度分布图



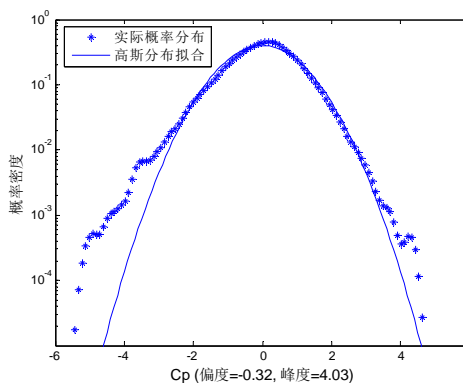
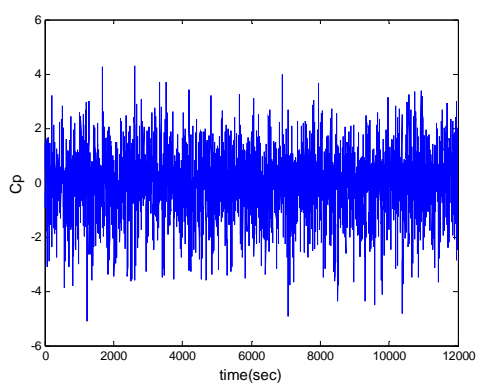
B类风场 0°风向角



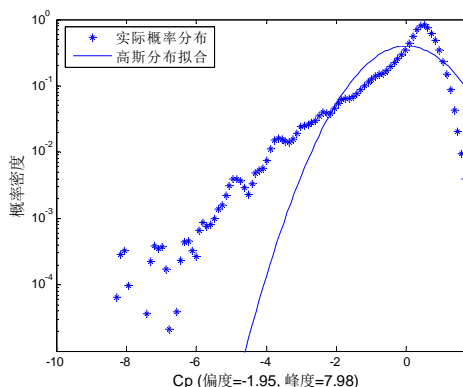
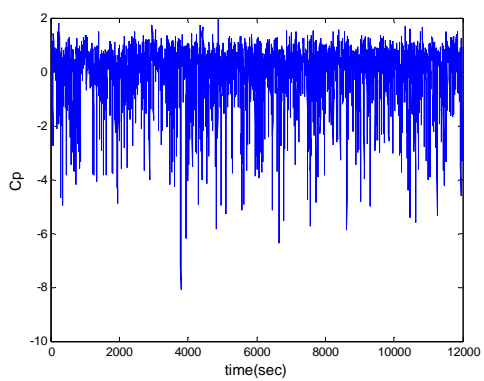
B类风场 45°风向角



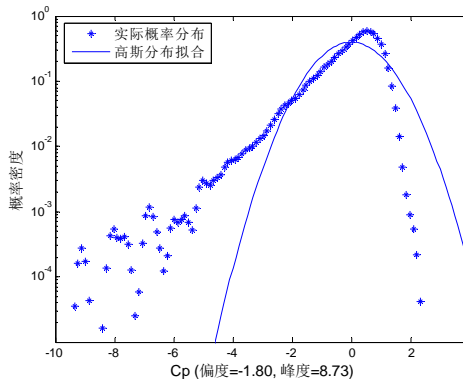
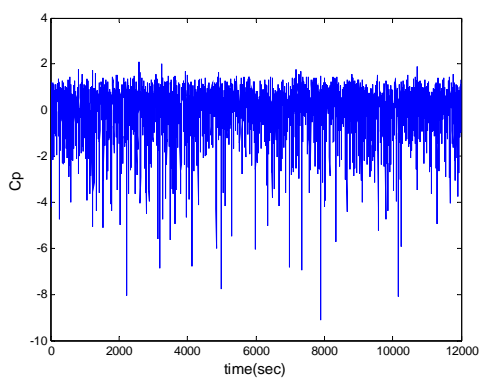
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



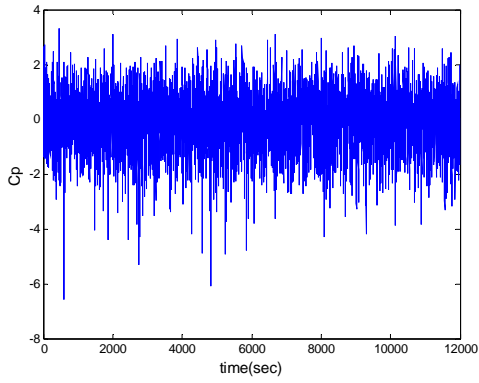
C 类风场 45°风向角



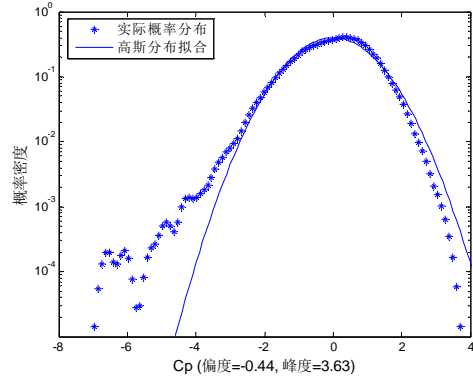
C 类风场 90°风向角

(5) 测点 1-10

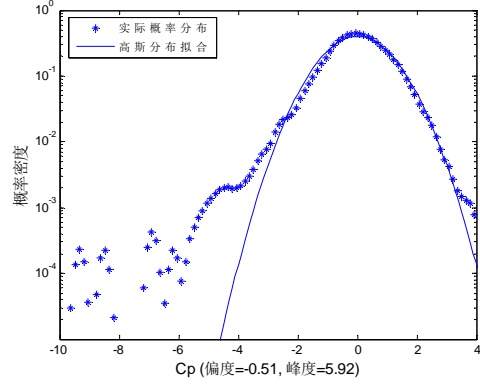
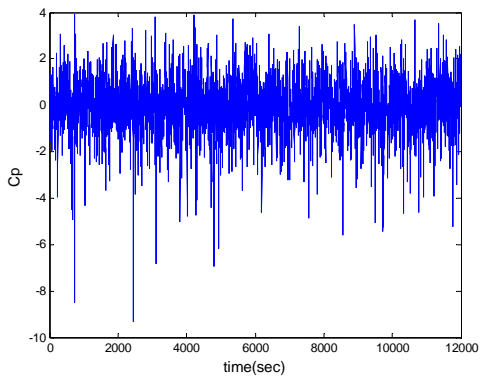
时程曲线图



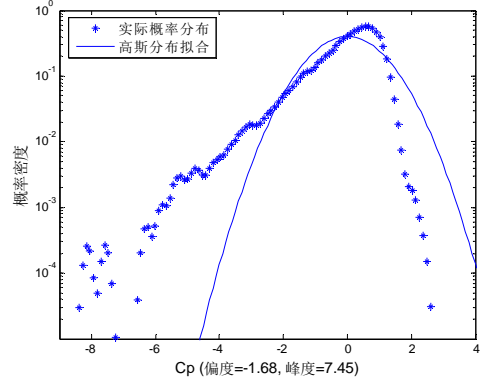
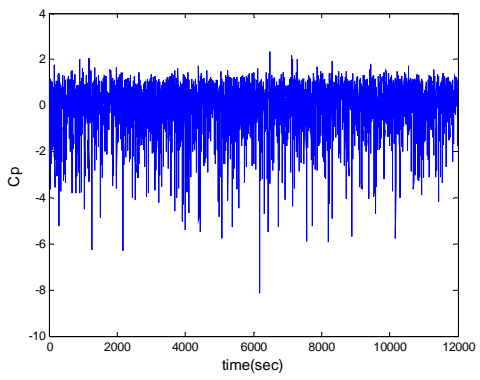
概率密度分布图



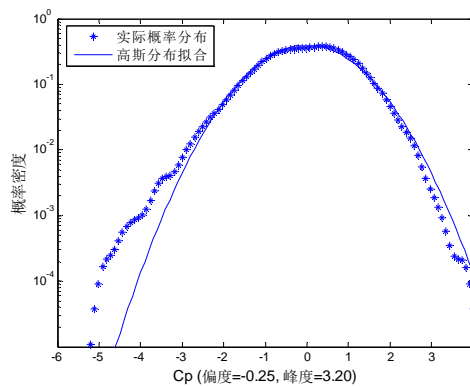
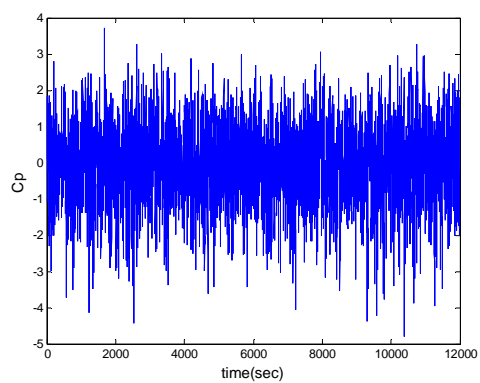
B 类风场 0°风向角



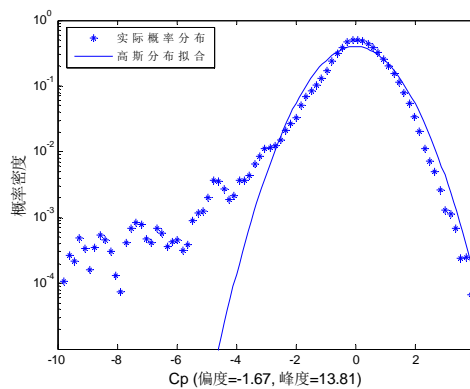
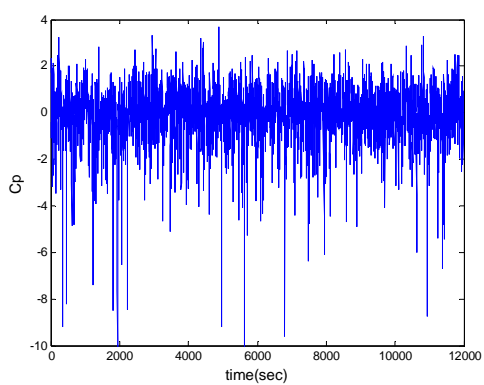
B 类风场 45°风向角



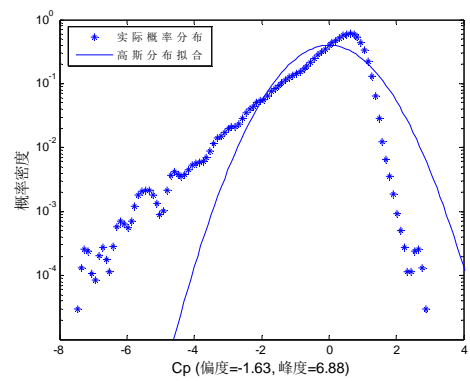
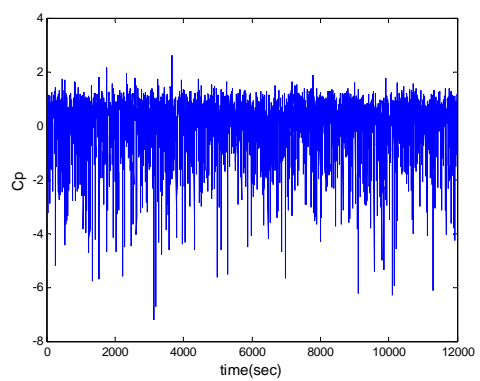
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

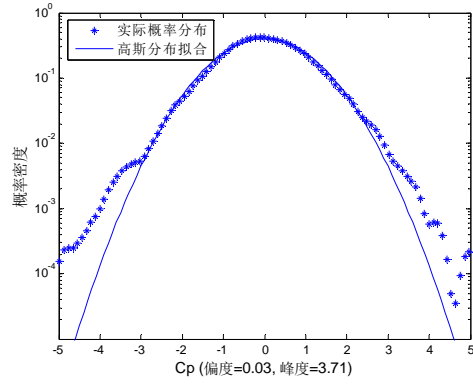
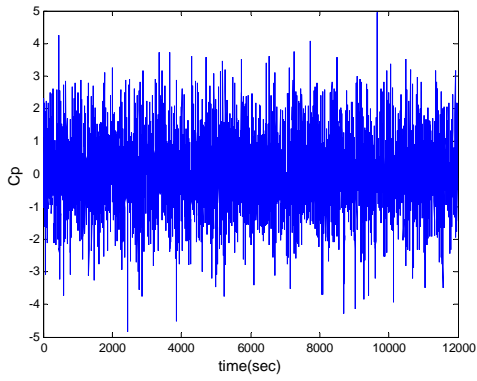


C 类风场 90°风向角

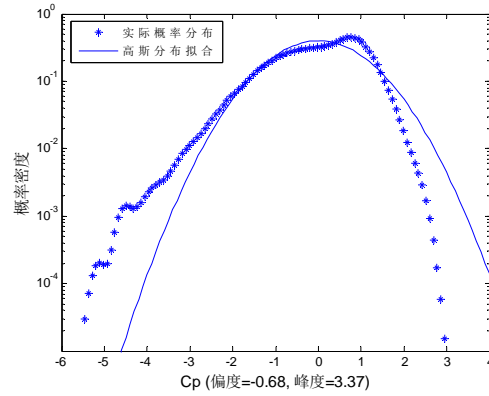
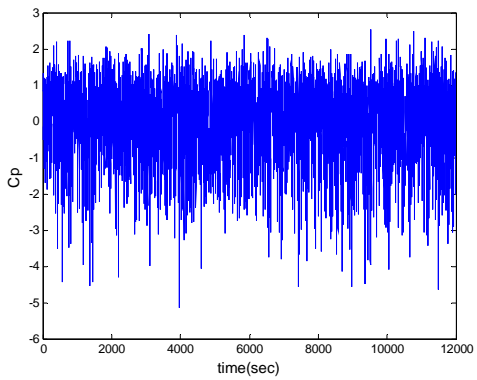
(6) 测点 1-12

时程曲线图

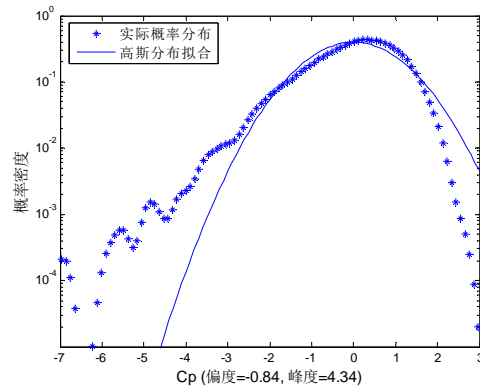
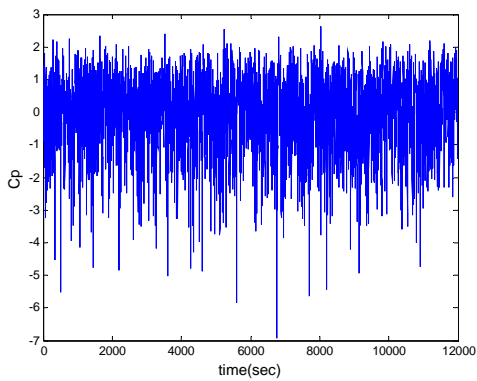
概率密度分布图



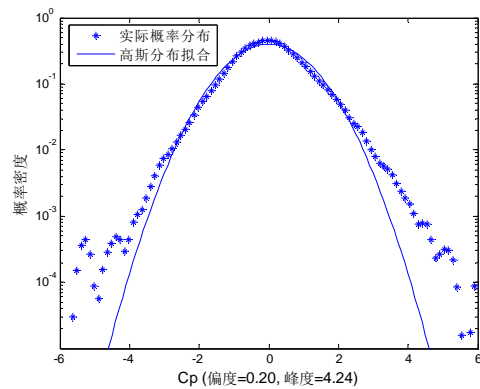
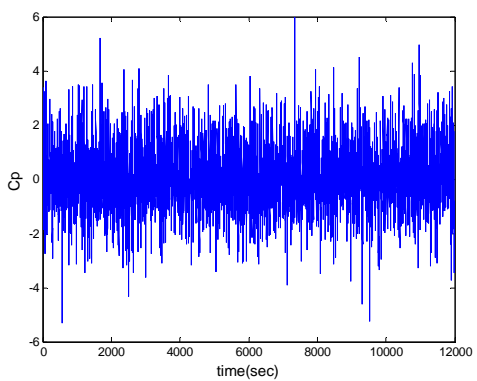
B 类风场 0°风向角



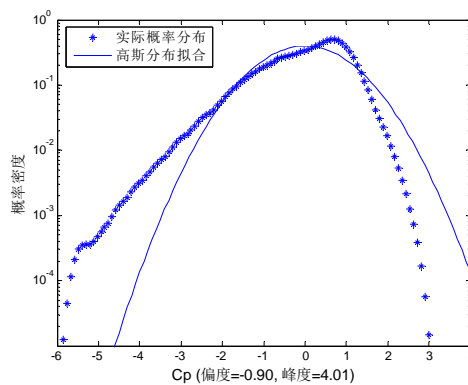
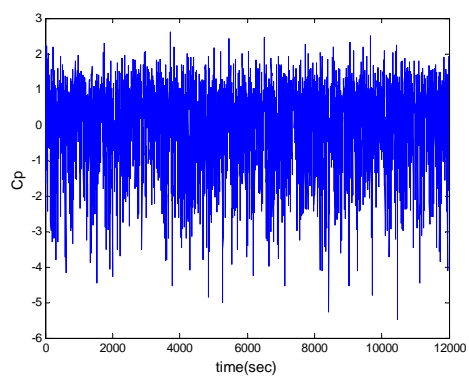
B 类风场 45°风向角



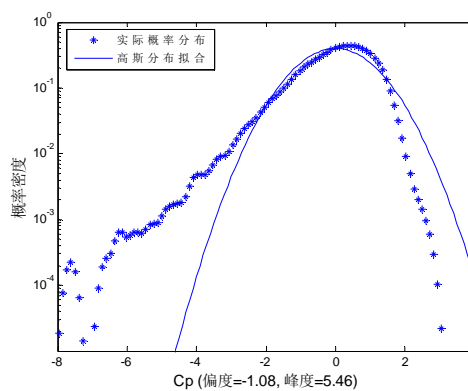
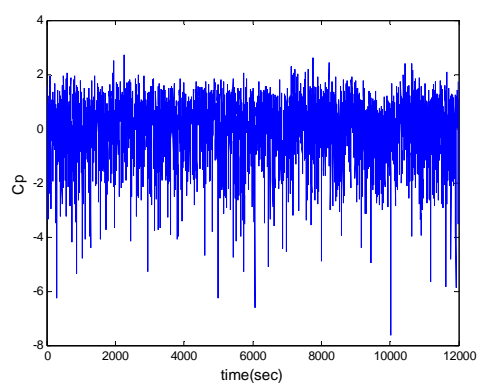
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



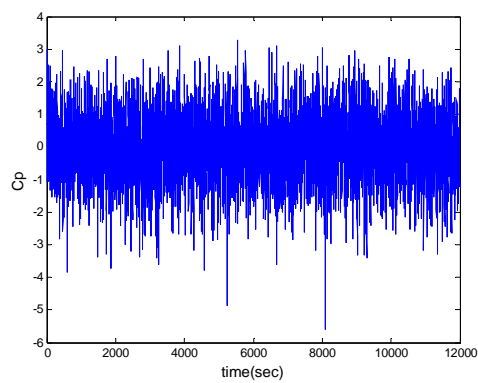
C 类风场 45°风向角



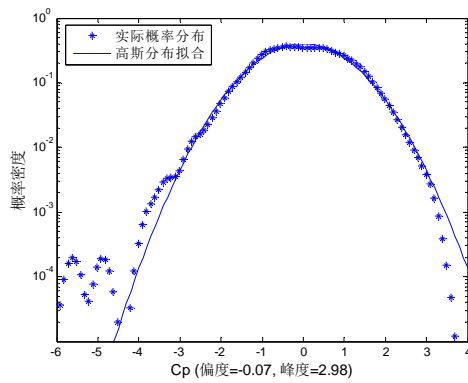
C 类风场 90°风向角

(7) 测点 1-20

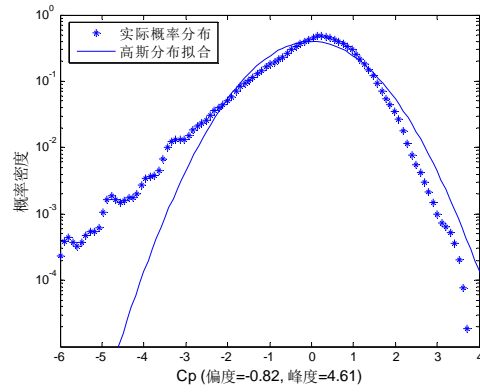
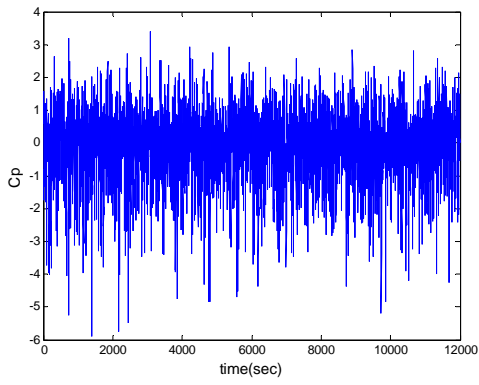
时程曲线图



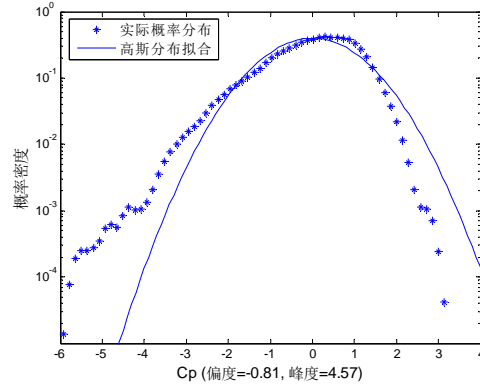
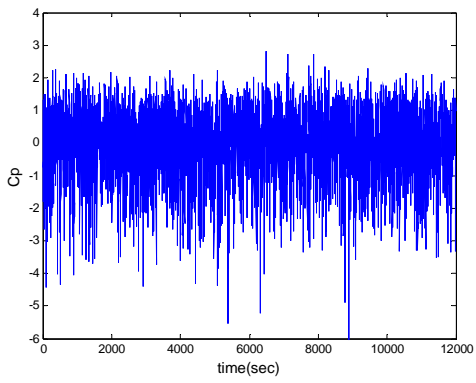
概率密度分布图



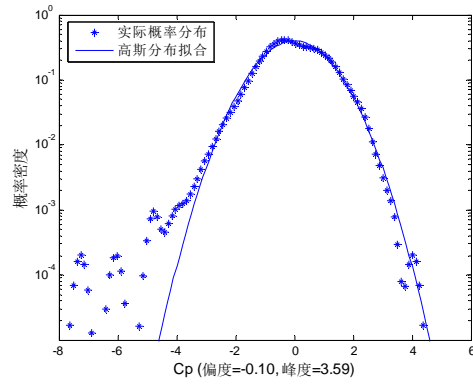
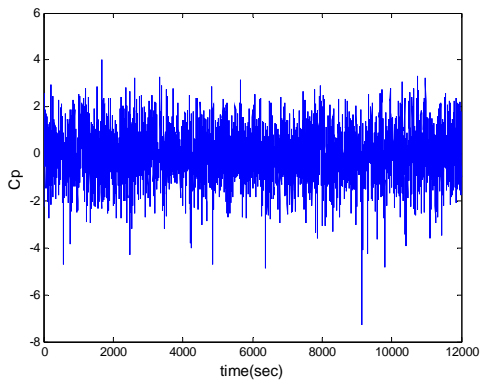
B 类风场 0°风向角



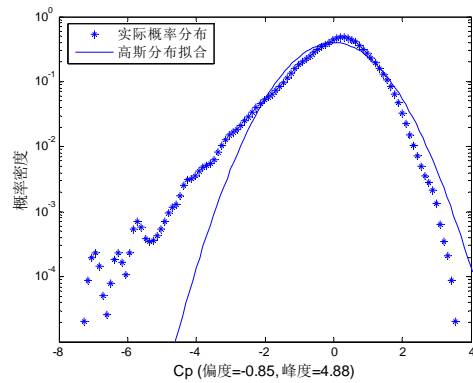
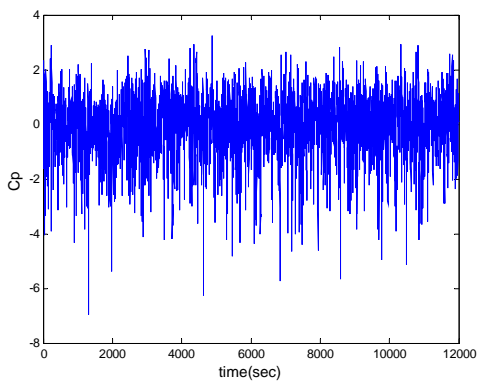
B 类风场 45°风向角



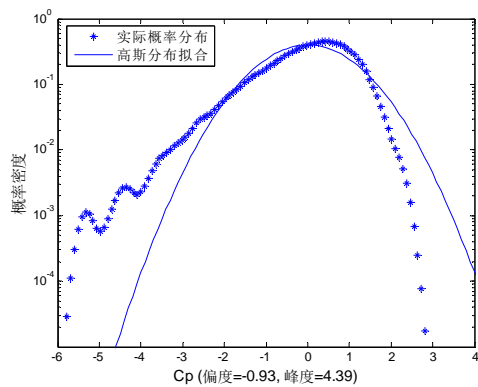
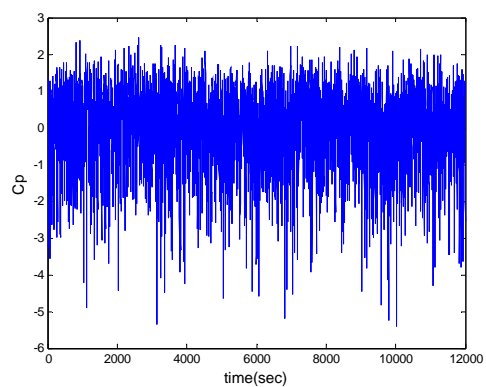
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

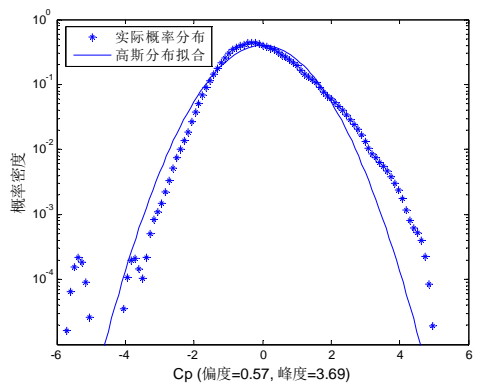
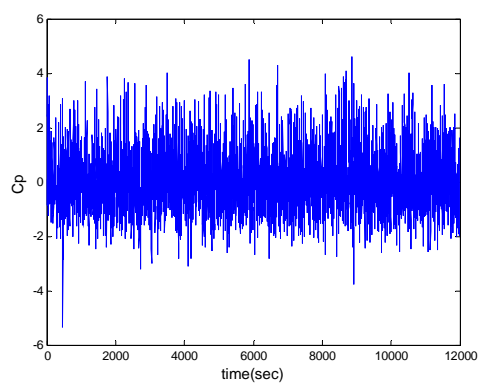


C 类风场 90°风向角

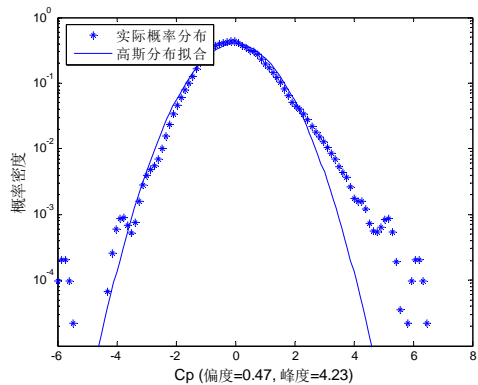
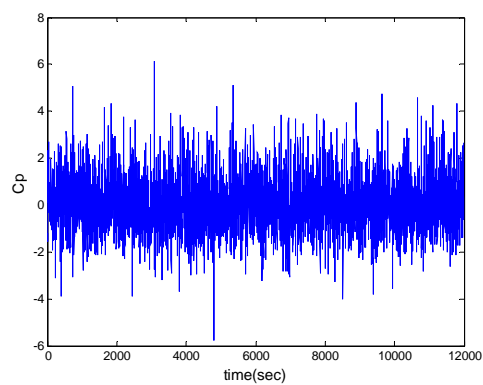
(8) 测点 2-10

时程曲线图

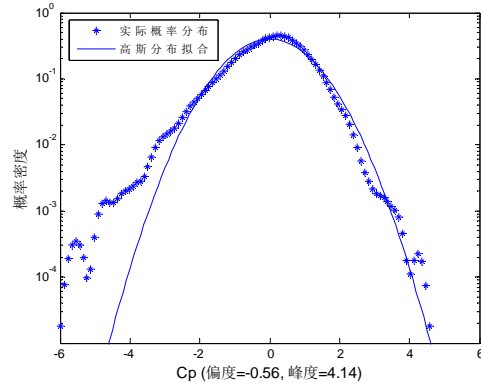
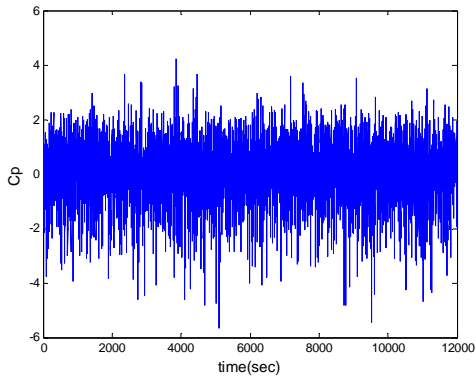
概率密度分布图



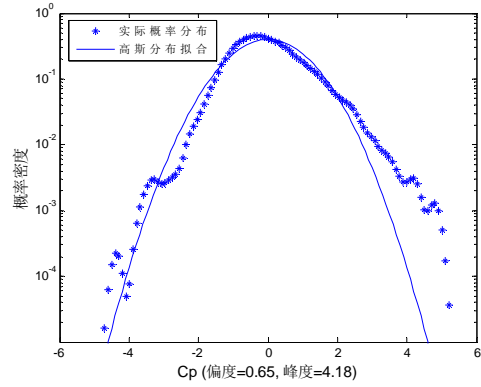
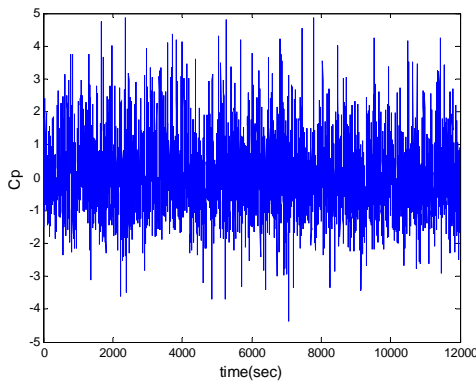
B 类风场 0°风向角



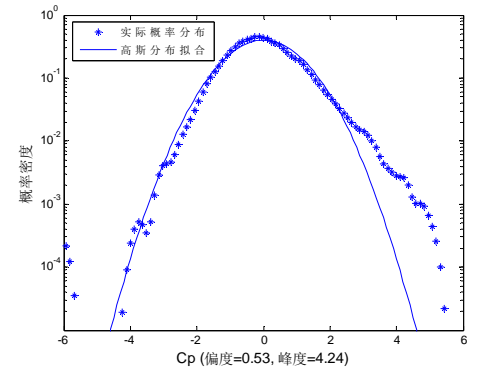
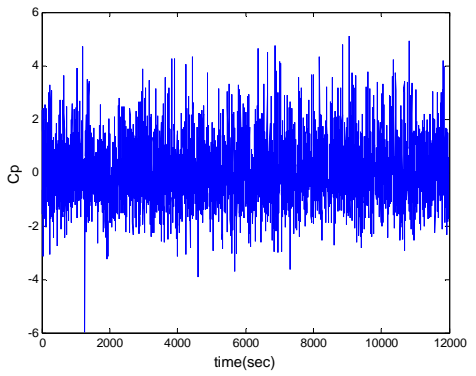
B 类风场 45°风向角



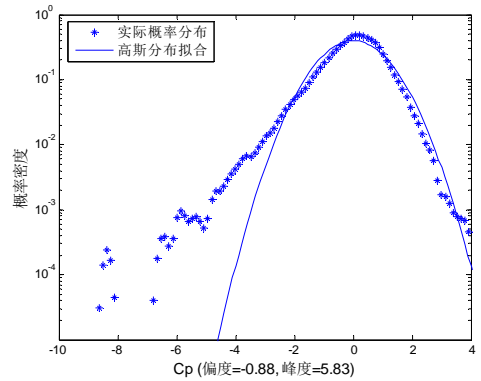
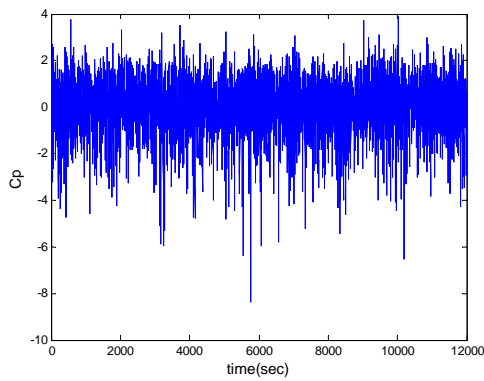
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



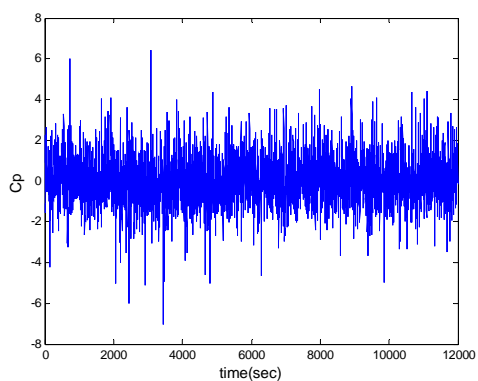
C 类风场 45°风向角



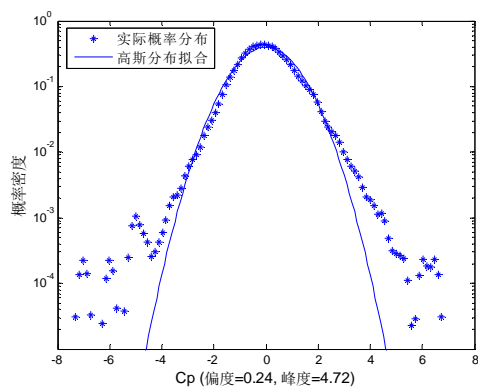
C 类风场 90°风向角

(9) 测点 2-14

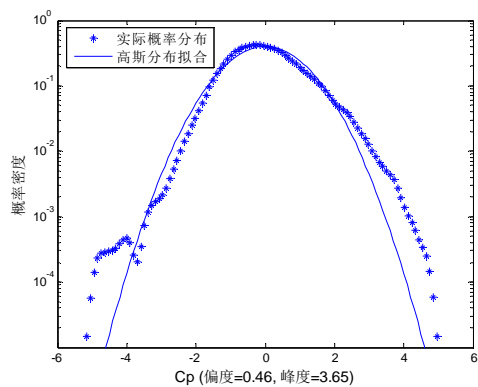
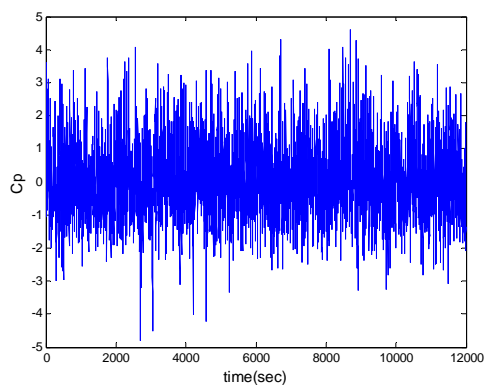
时程曲线图



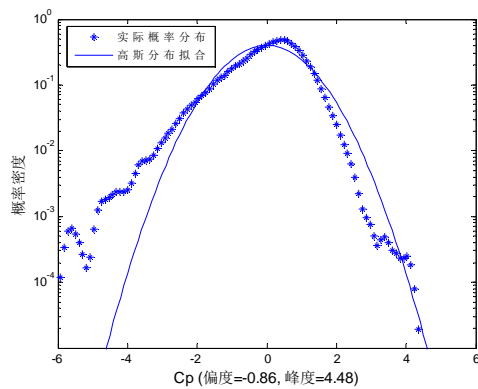
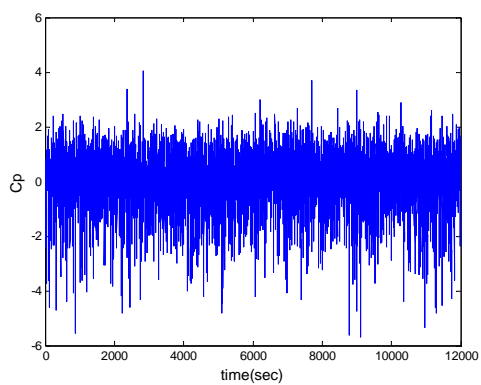
概率密度分布图



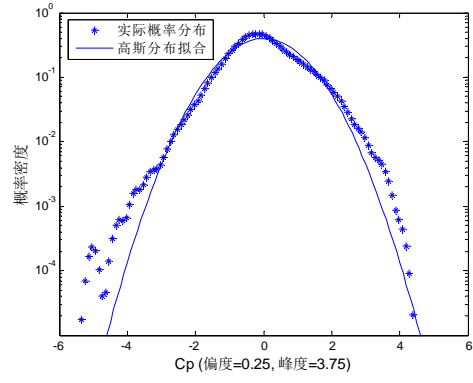
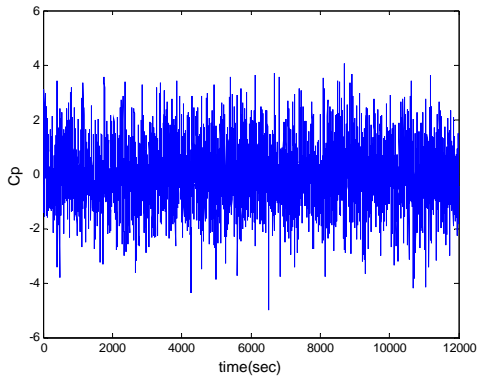
B 类风场 0°风向角



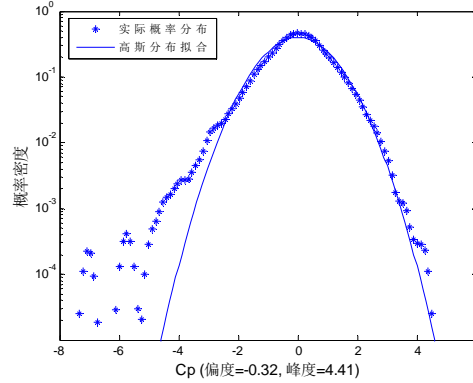
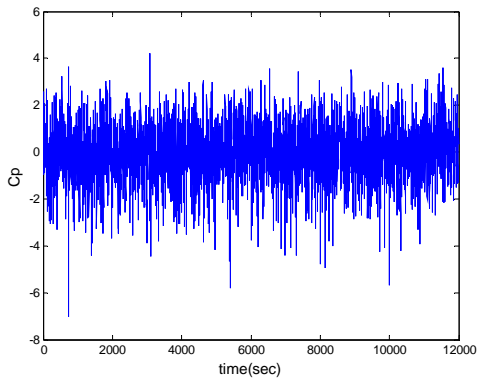
B 类风场 45°风向角



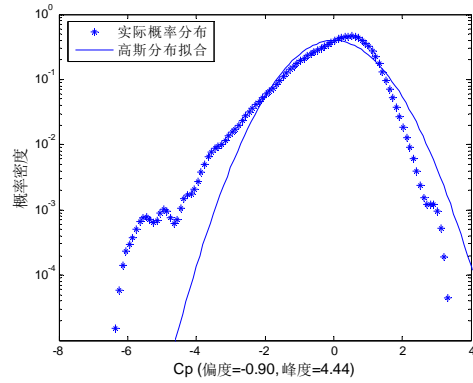
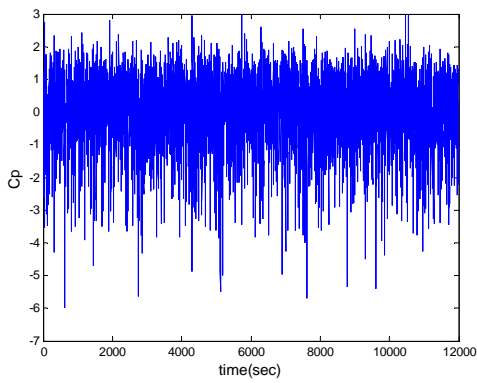
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

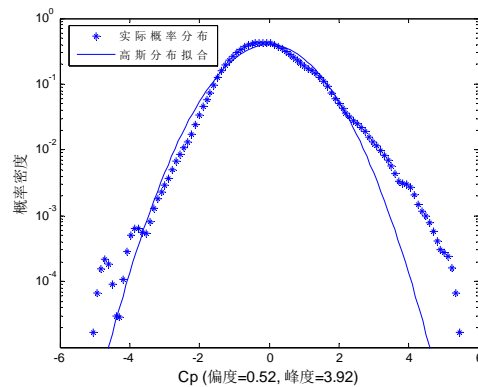
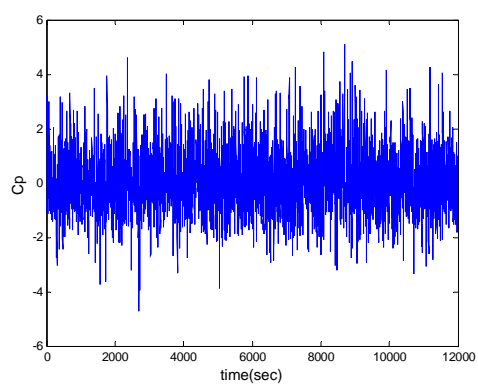


C 类风场 90°风向角

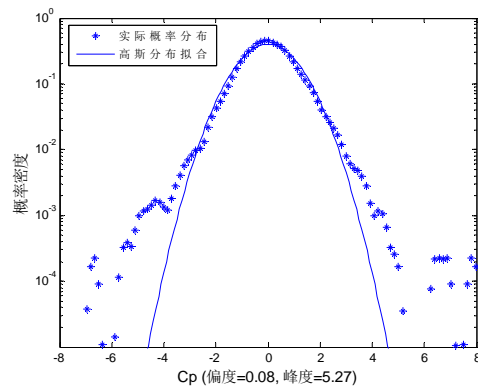
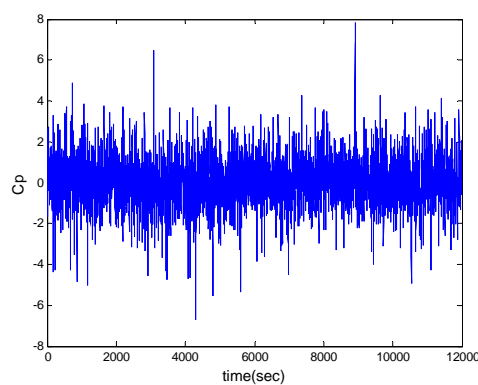
(10) 测点 2-18

时程曲线图

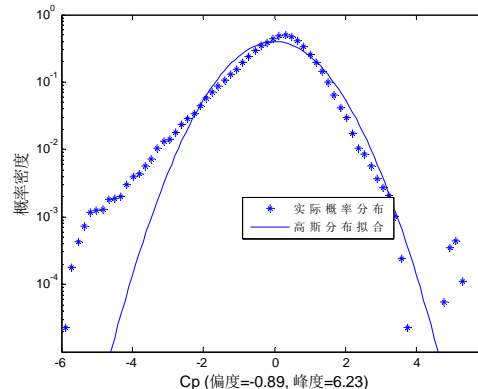
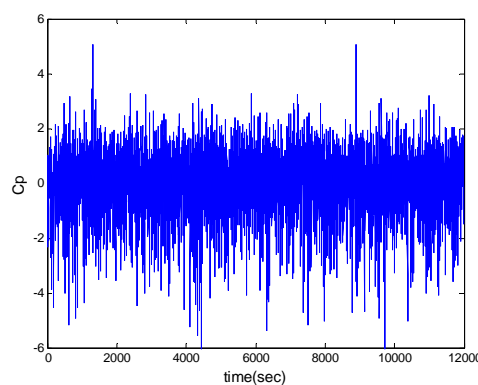
概率密度分布图



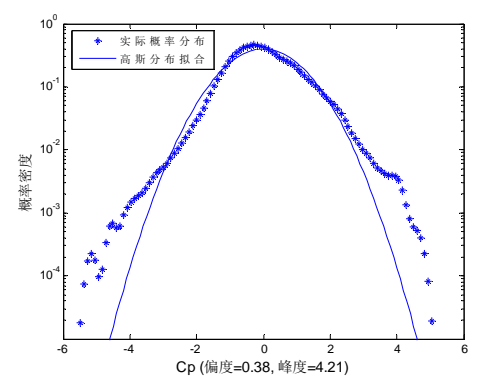
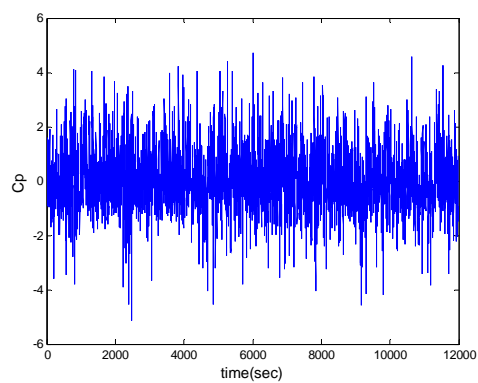
B类风场 0°风向角



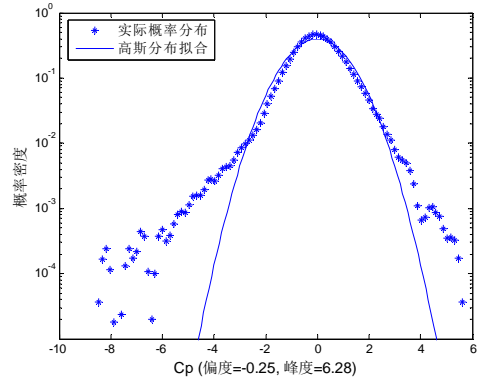
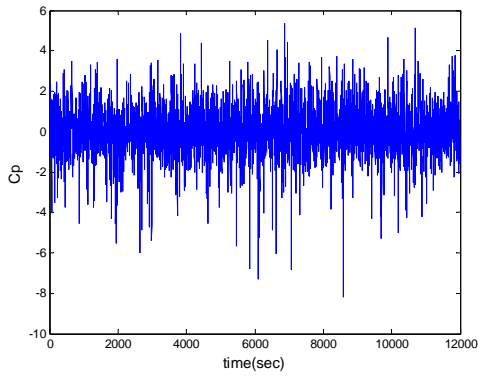
B类风场 45°风向角



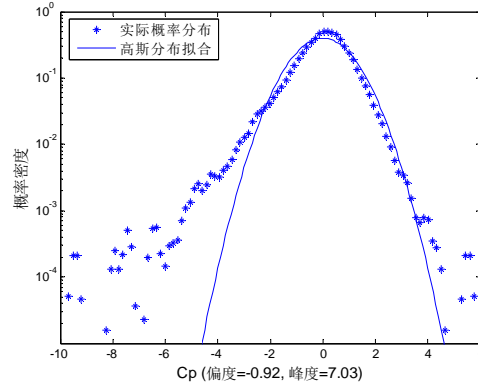
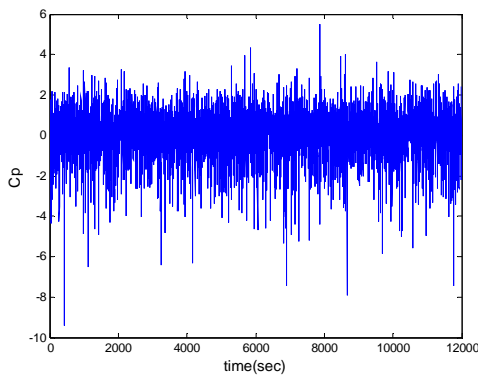
B类风场 90°风向角



C类风场 0°风向角



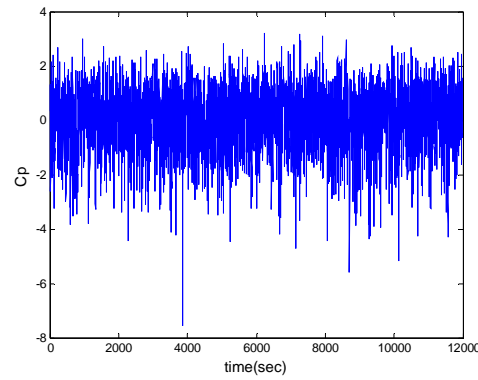
C类风场 45°风向角



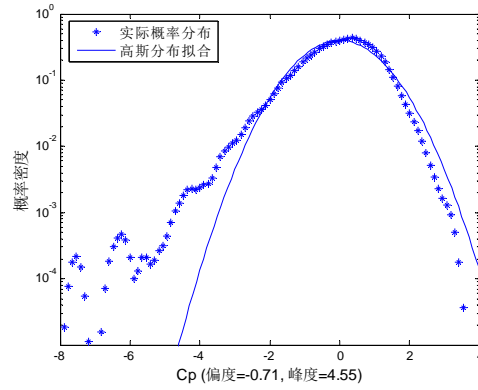
C类风场 90°风向角

(11) 测点 3-2

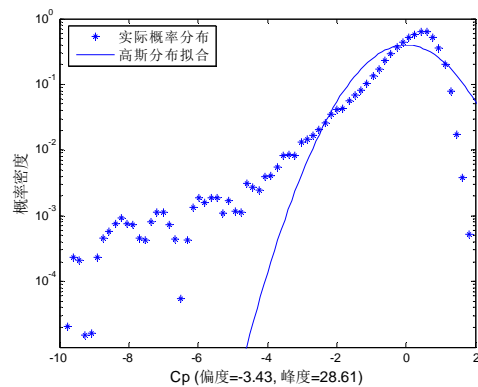
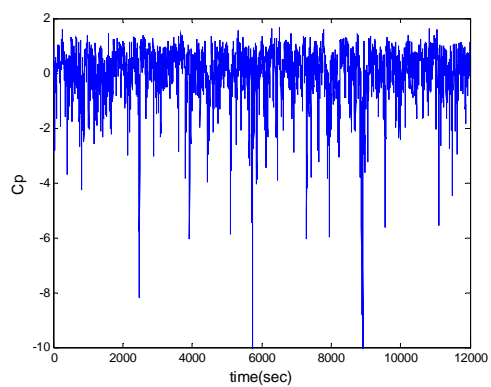
时程曲线图



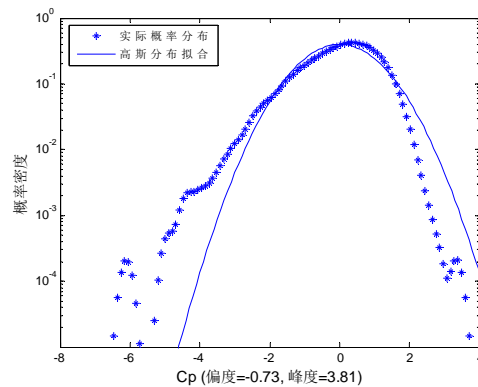
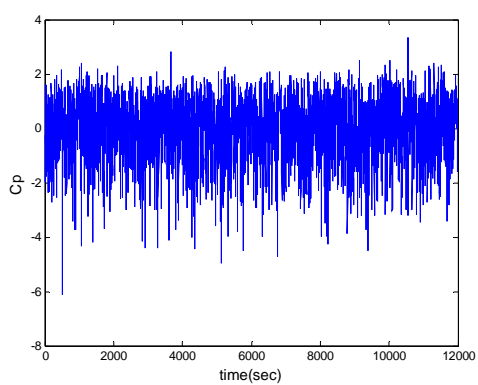
概率密度分布图



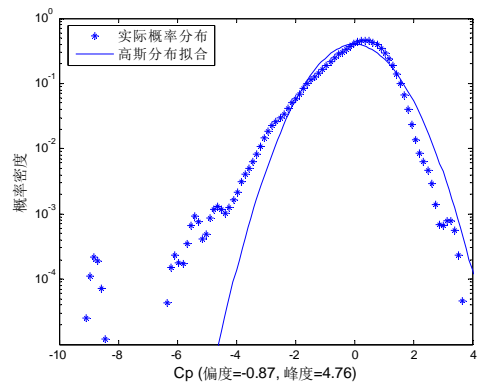
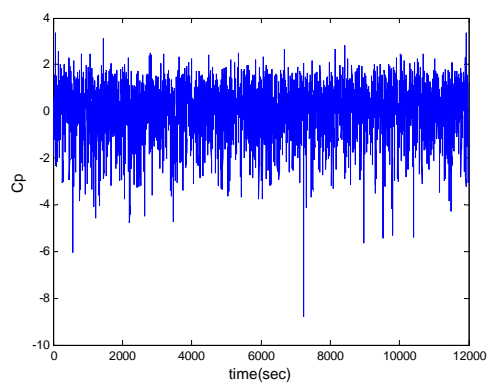
B类风场 0°风向角



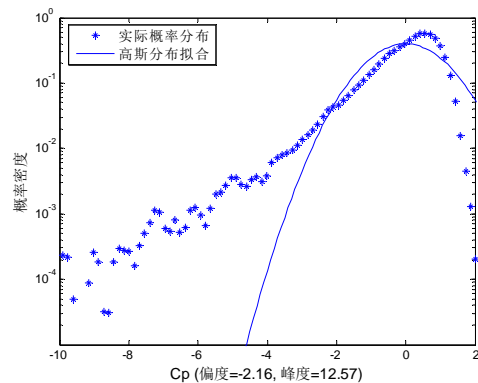
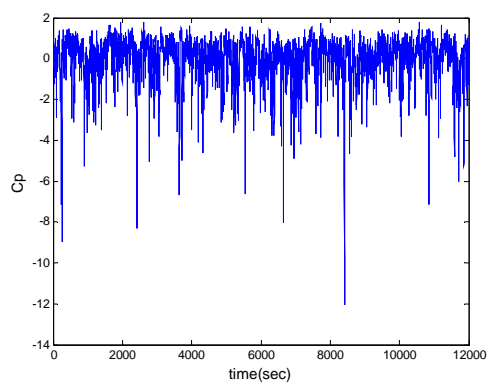
B 类风场 45°风向角



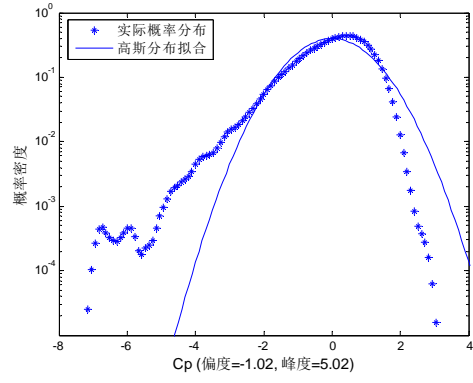
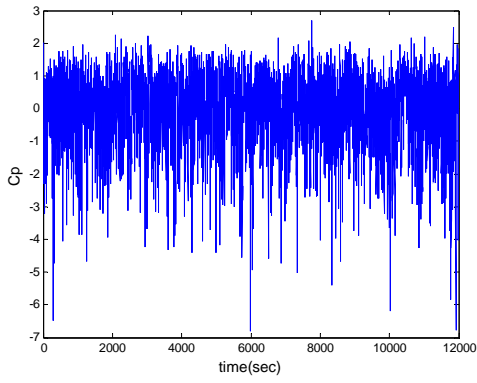
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



C 类风场 45°风向角

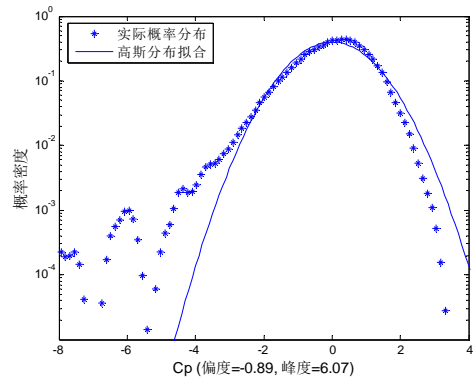
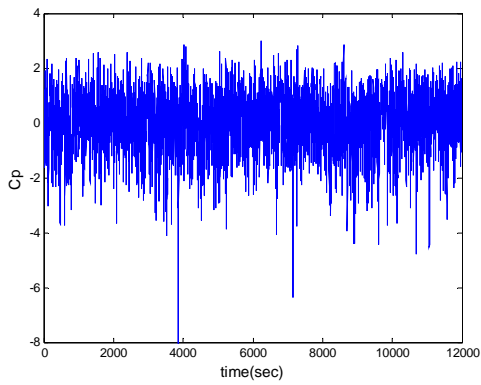


C 类风场 90°风向角

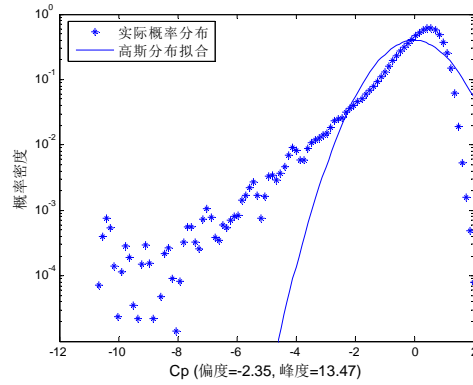
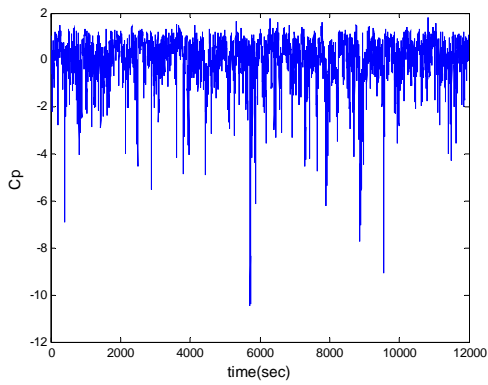
(12) 测点 3-8

时程曲线图

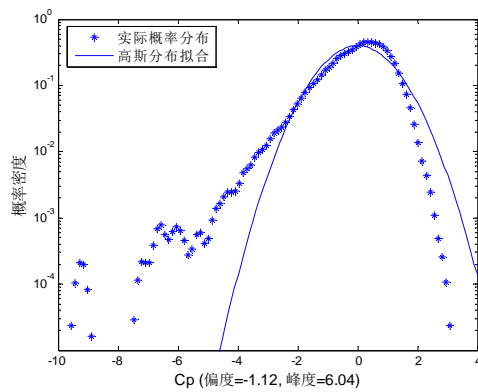
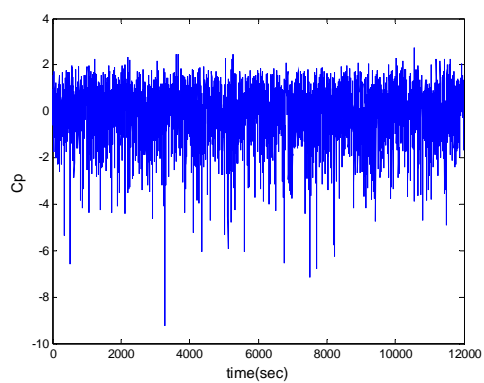
概率密度分布图



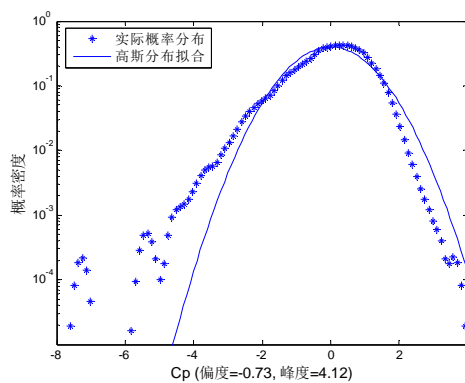
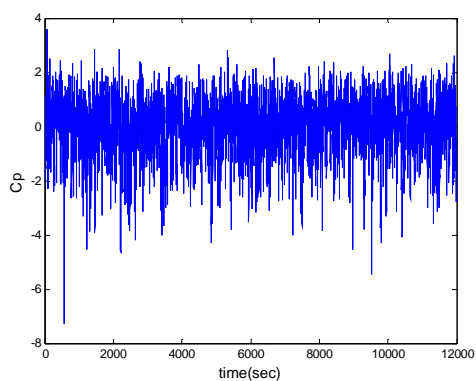
B 类风场 0°风向角



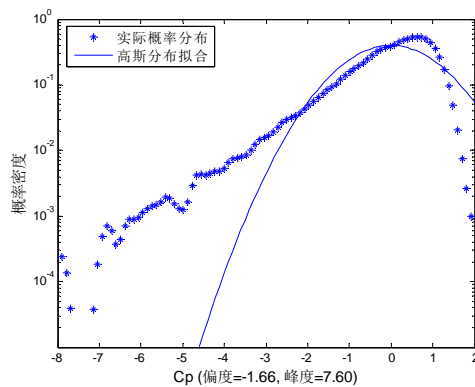
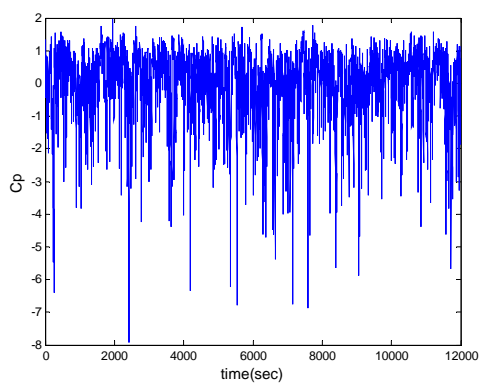
B 类风场 45°风向角



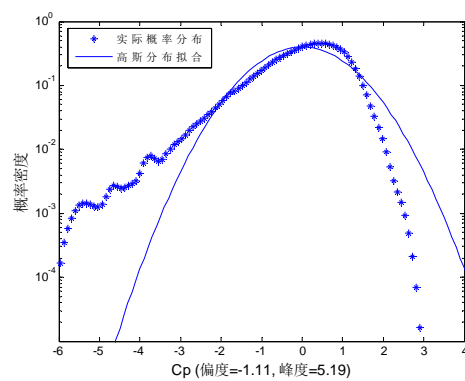
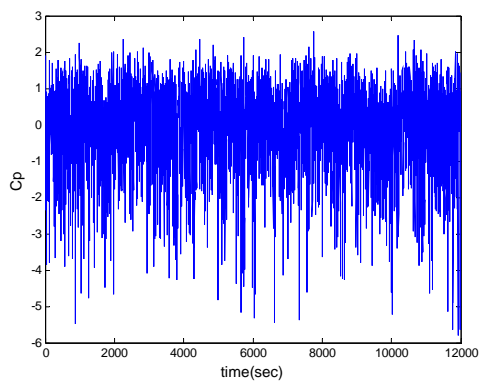
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



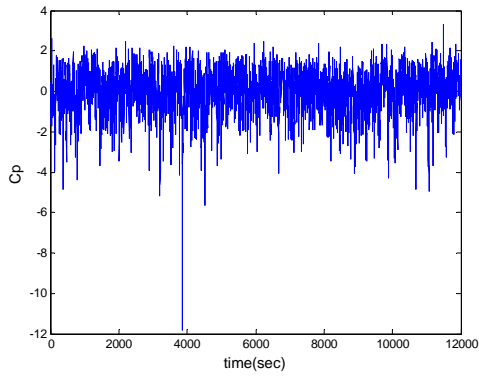
C 类风场 45°风向角



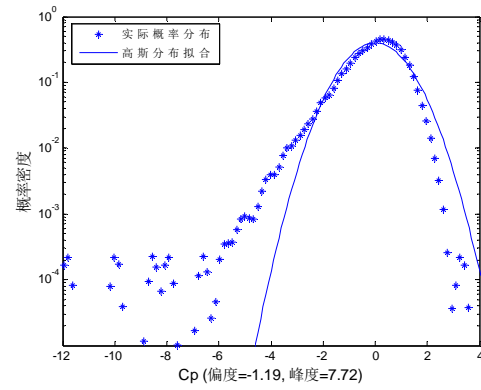
C 类风场 90°风向角

(13) 测点 3-25

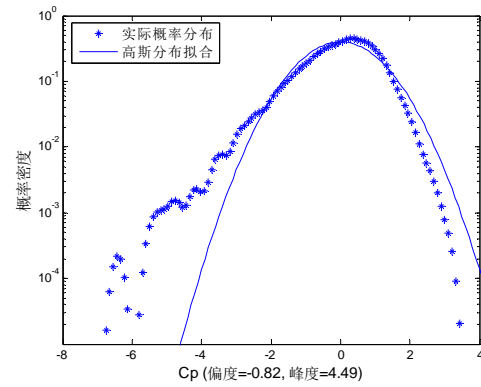
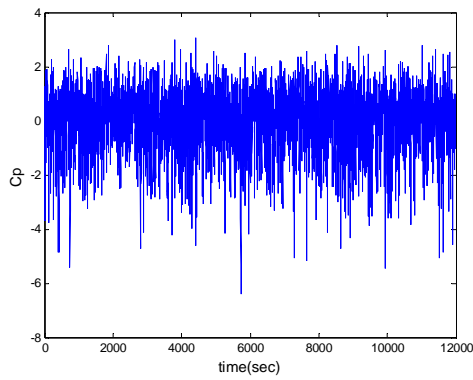
时程曲线图



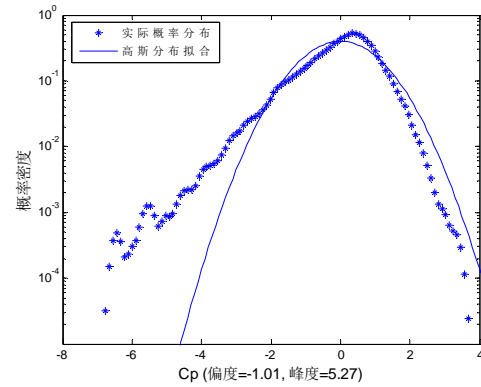
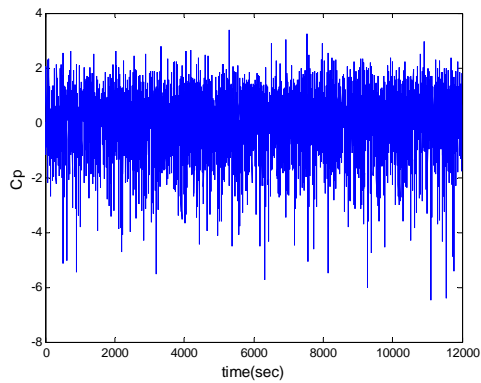
概率密度分布图



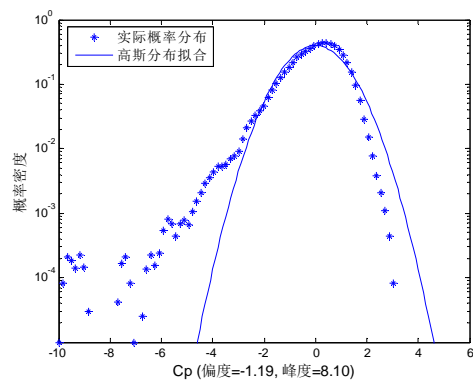
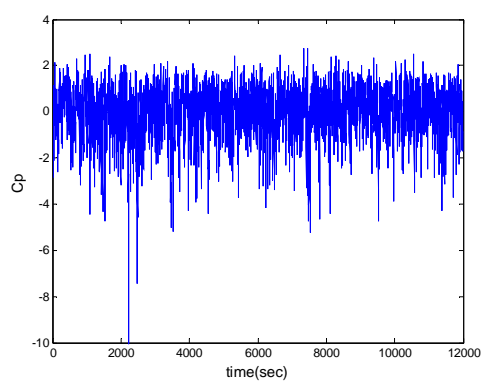
B 类风场 0°风向角



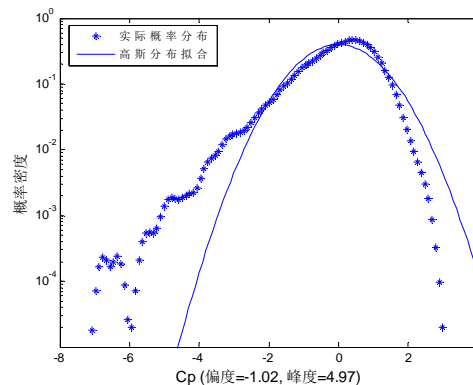
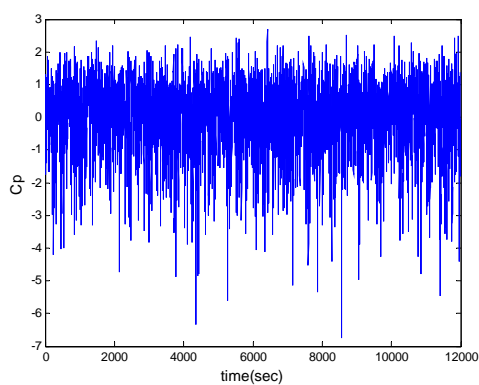
B 类风场 45°风向角



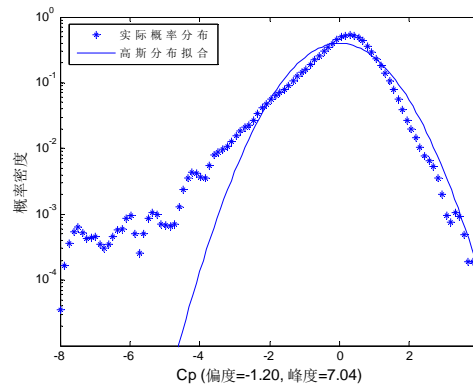
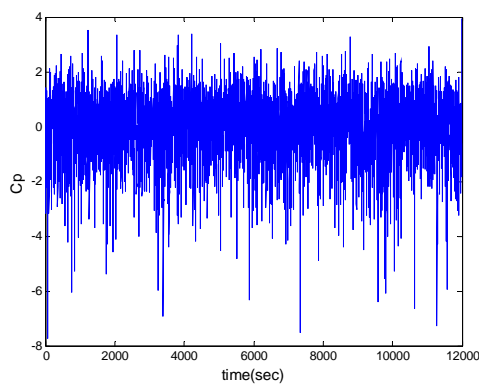
B 类风场 90°风向角



C 类风场 0°风向角



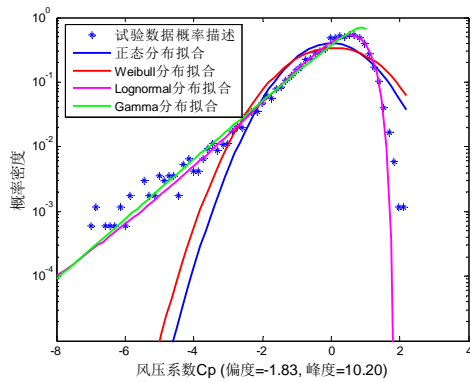
C 类风场 45°风向角



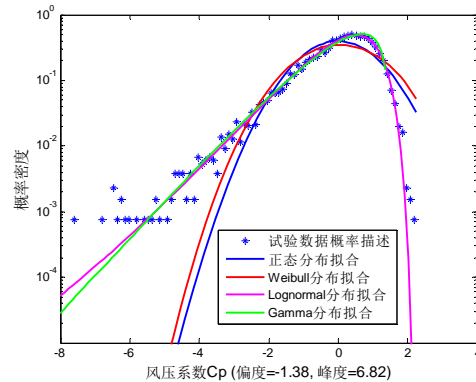
C 类风场 90°风向角

附录 B

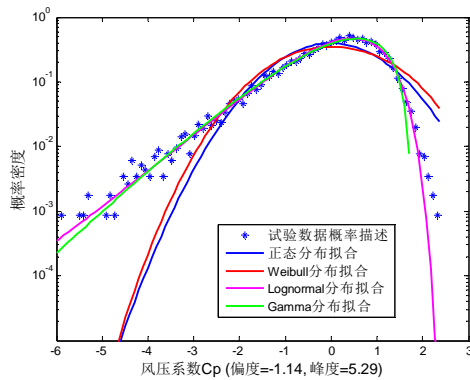
平屋面典型风向角下的典型测点的概率密度函数拟合图

(1) 0° 风向角

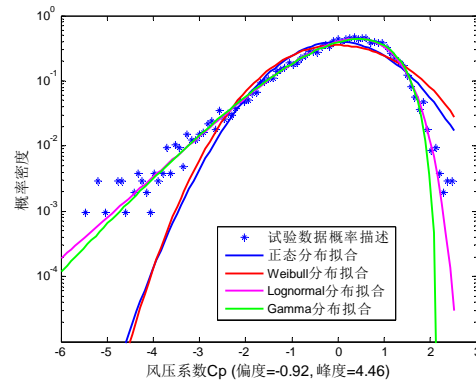
测点 1-19



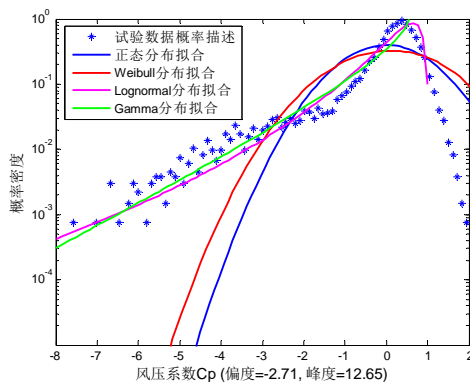
测点 1-33



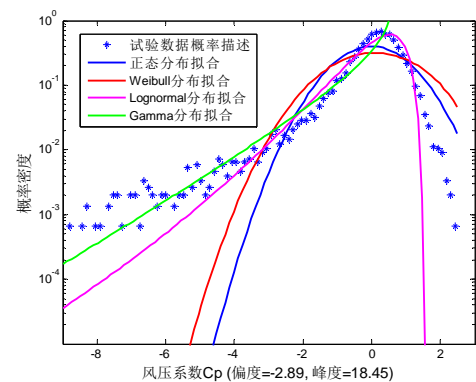
测点 1-38



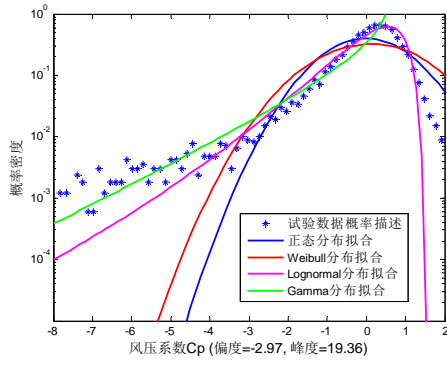
测点 1-57

(2) 45° 风向角

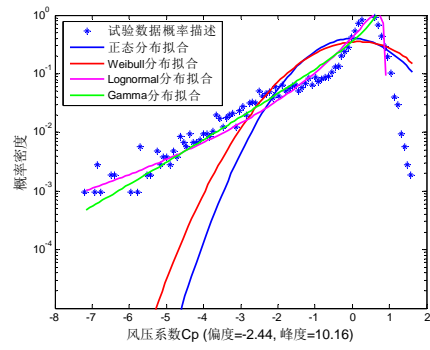
测点 1-17



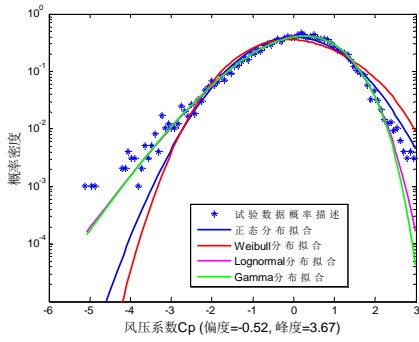
测点 1-18



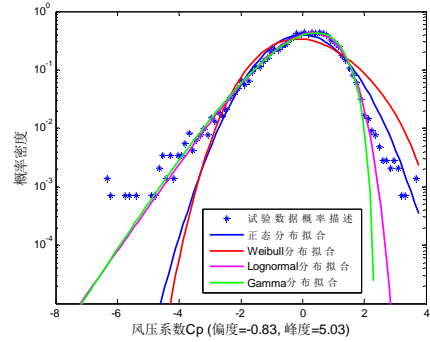
测点 1-31



测点 1-32

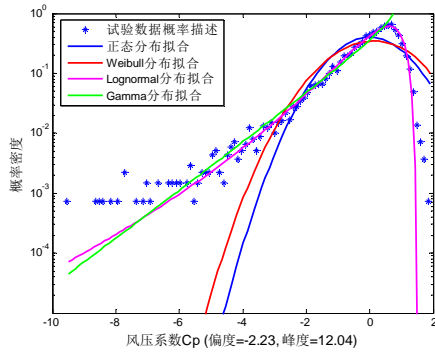


测点 1-33

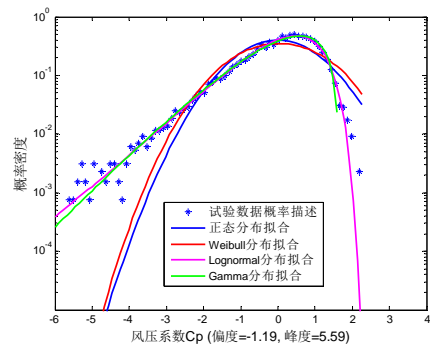


测点 1-39

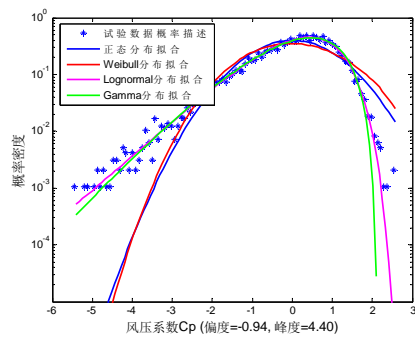
(3) 90° 风向角



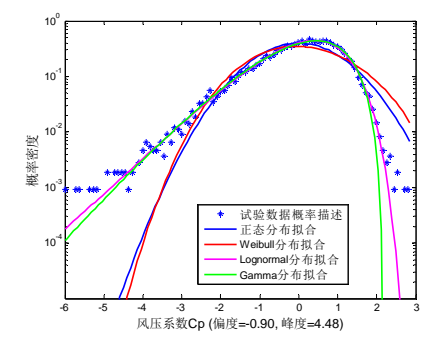
测点 1-1



测点 1-3



测点 1-4

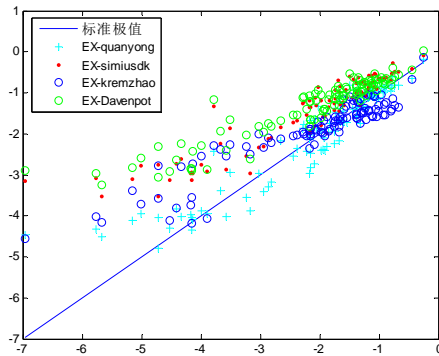


测点 1-6

附录 C

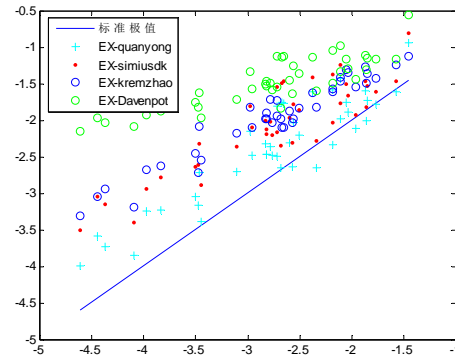
不同模型的各种极值估算方法比较图

(1) 三角挑檐双坡屋面 C 类风场



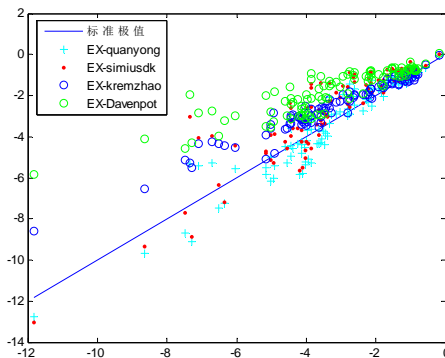
迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.4782 0.1018)
 err_simiusdk: (0.9388 0.7059)
 err_kremzhao: (0.6590 0.2155)
 err_Davenport : (1.0730 0.8233)

(a)



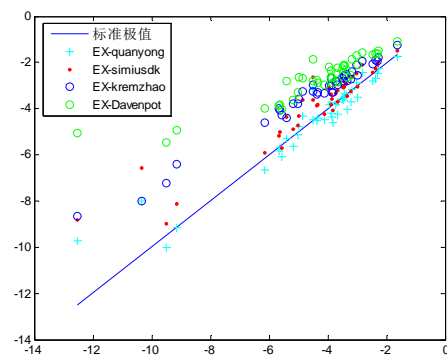
迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.4924 0.3713)
 err_simiusdk: (0.7752 0.6838)
 err_kremzhao: (0.8430 0.7892)
 err_Davenport : (1.3840 1.2819)

0° 风向角



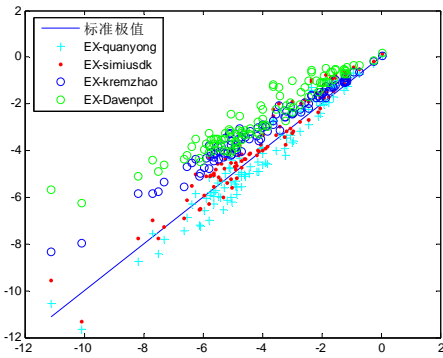
迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.6980 -0.0616)
 err_simiusdk : (1.0821 0.5775)
 err_kremzhao : (0.9898 0.6912)
 err_Davenport : (1.8210 1.4285)

(b)

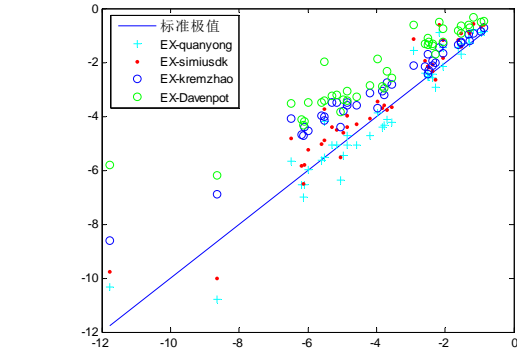


背风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.6792 0.0061)
 err_simiusdk : (0.9954 0.5773)
 err_kremzhao : (1.2972 1.1025)
 err_Davenport : (2.2813 1.7826)

45° 风向角



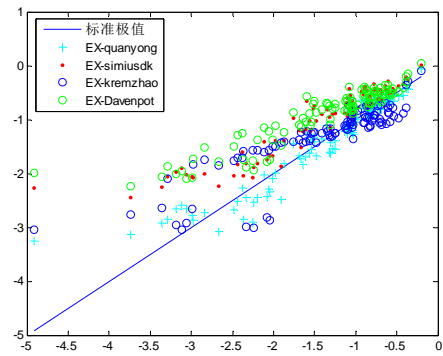
迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.5771 -0.1726)
 err_simiusdk: (0.6310 0.3622)
 err_kremzhao: (1.0999 0.9361)
 err_Davenport : (1.6745 1.4682)



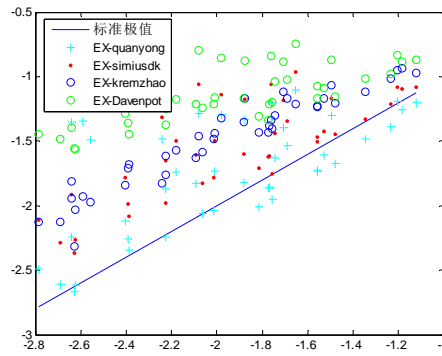
背风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.6687 -0.0423)
 err_simiusdk : (0.7760 0.4529)
 err_kremzhao: (1.1290 0.8974)
 err_Davenport : (1.8324 1.5498)

(c) 90° 风向角

(2) 硬山挑檐双坡屋面 B 类风场

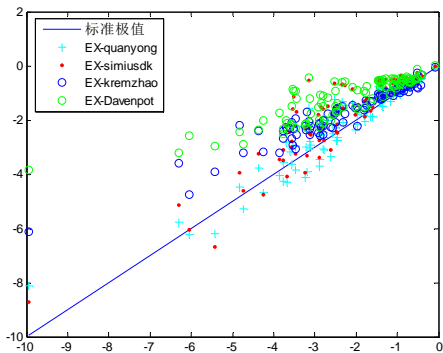


迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.2726 0.0143)
 err_simiusdk : (0.5442 0.4063)
 err_kremzhao : (0.4386 0.0917)
 err_Davenport : (0.6531 0.4982)

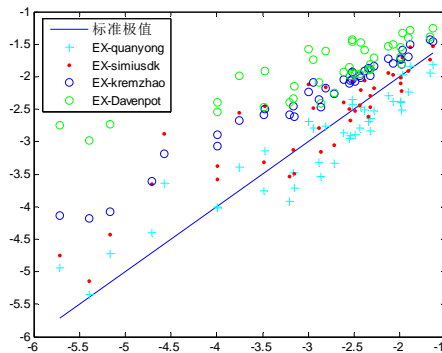


背风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.4418 0.2200)
 err_simiusdk: (0.5828 0.4433)
 err_kremzhao : (0.5068 0.4811)
 err_Davenport : (0.9331 0.8481)

(a) 0° 风向角



迎风面：(误差均方根 误差均值)

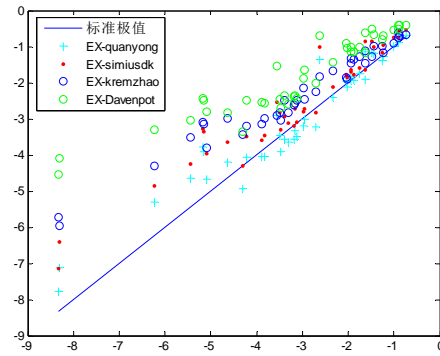
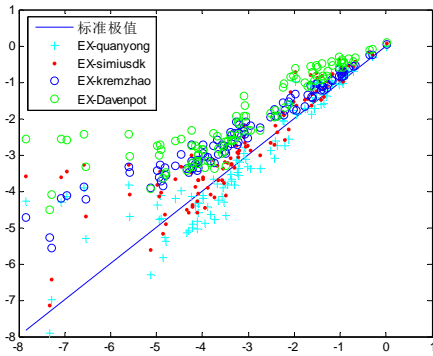


背风面：(误差均方根 误差均值)

err_quanyong: (0.4883 0.1269)
 err_simiusdk: (0.7910 0.5052)
 err_kremzhao: (0.8529 0.5535)
 err_Davenport: (1.3725 1.0212)

err_quanyong : (0.3882 -0.1306)
 err_simiusdk : (0.5276 0.2603)
 err_kremzhao : (0.6990 0.6098)
 err_Davenport : (1.2039 0.9896)

(b) 45° 风向角

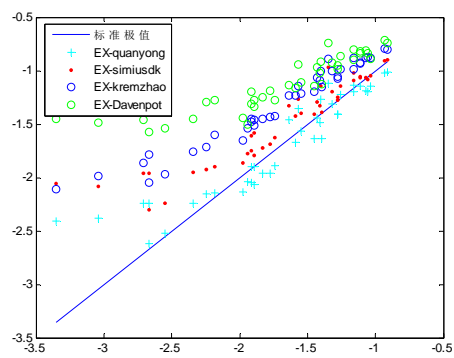
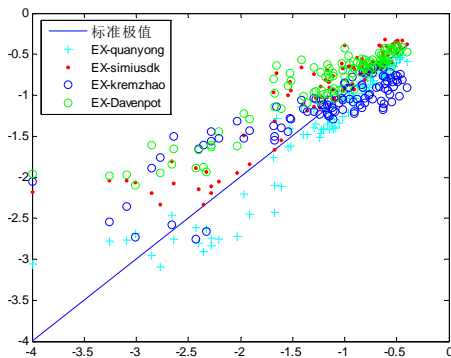


迎风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.7710 0.0154)
 err_simiusdk : (0.9046 0.4157)
 err_kremzhao: (1.0268 0.8002)
 err_Davenport: (1.4680 1.1333)

背风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.5167 0.1501)
 err_simiusdk : (0.7695 0.5374)
 err_kremzhao: (1.0092 0.7687)
 err_Davenport: (1.5662 1.2757)

(c) 90° 风向角

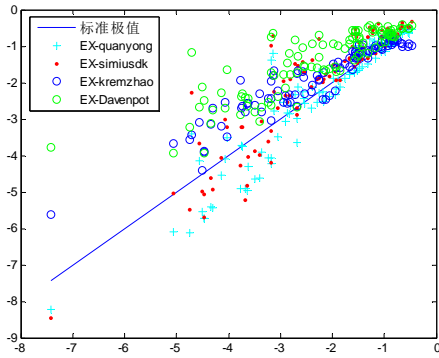
(3) 悬山挑檐双坡屋面 B 类风场



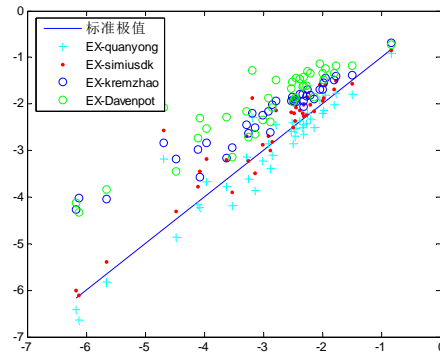
迎风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.2525 -0.1136)
 err_simiusdk: (0.3881 0.2575)
 err_kremzhao: (0.4065 0.0359)
 err_Davenport: (0.4897 0.3449)

背风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.2351 0.0258)
 err_simiusdk: (0.3506 0.2246)
 err_kremzhao: (0.4691 0.4031)
 err_Davenport: (0.7010 0.5861)

(a) 0° 风向角

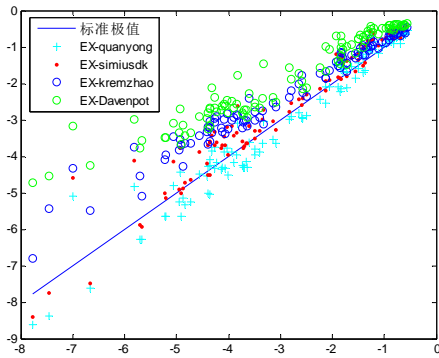


迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.5838 -0.1055)
 err_simiusdk : (0.7090 0.3013)
 err_kremzhao: (0.6623 0.4158)
 err_Davenport: (1.1056 0.8576)

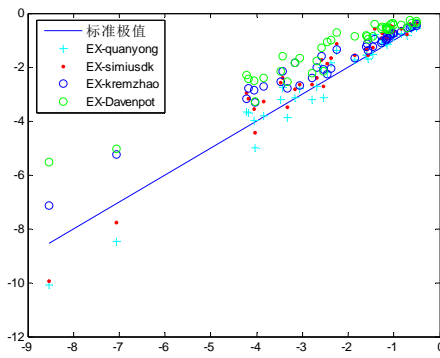


背风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.3865 -0.0940)
 err_simiusdk : (0.4960 0.2709)
 err_kremzhao: (0.8350 0.6927)
 err_Davenport: (1.0824 0.9397)

(b) 45° 风向角



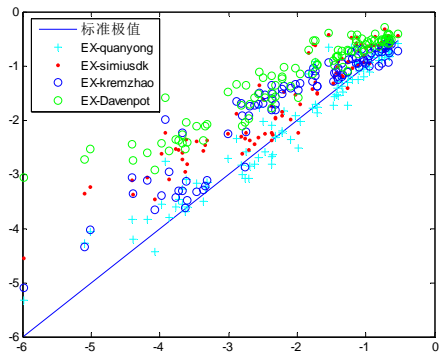
迎风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.4124 -0.0823)
 err_simiusdk : (0.5049 0.2882)
 err_kremzhao: (0.7989 0.6330)
 err_Davenport: (1.2609 1.0555)



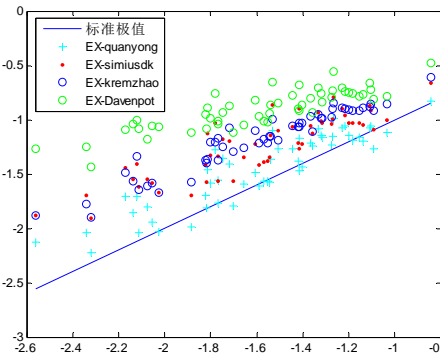
背风面：(误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.4854 0.0437)
 err_simiusdk: (0.5771 0.3264)
 err_kremzhao: (0.7042 0.5353)
 err_Davenport: (1.1211 0.9510)

(c) 90° 风向角

(4) 不对称双坡屋面 B 类风场



迎风面：(误差均方根 误差均值)

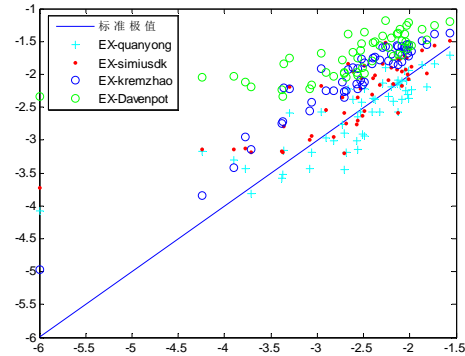
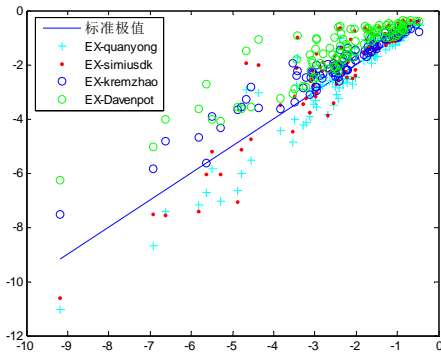


背风面：(误差均方根 误差均值)

err_quanyong : (0.3318 0.0871)
 err_simiusdk : (0.6624 0.4947)
 err_kremzhao : (0.5895 0.4299)
 err_Davenport : (0.9959 0.8230)

err_quanyong : (0.2077 0.1317)
 err_simiusdk : (0.3969 0.3480)
 err_kremzhao : (0.4251 0.4043)
 err_Davenport : (0.7235 0.6828)

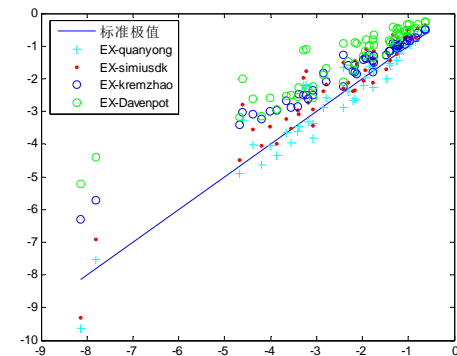
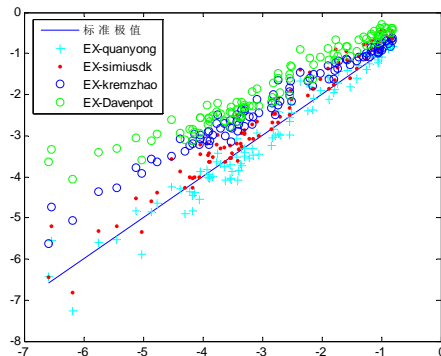
(a) 0° 风向角



迎风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.6609 -0.1324)
 err_simiusdk: (0.7790 0.2597)
 err_kremzhao: (0.6015 0.4087)
 err_Davenport: (1.1316 0.8903)

背风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.4186 -0.0166)
 err_simiusdk: (0.5193 0.2918)
 err_kremzhao: (0.5795 0.5403)
 err_Davenport: (1.0523 0.9023)

(b) 45° 风向角



迎风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong: (0.3146 -0.0444)
 err_simiusdk: (0.4194 0.3103)
 err_kremzhao : (0.7374 0.6361)
 err_Davenport : (1.1423 1.0168)

背风面: (误差均方根 误差均值)
 err_quanyong : (0.4519 0.0309)
 err_simiusdk: (0.5673 0.3341)
 err_kremzhao: (0.7209 0.5669)
 err_Davenport: (1.1599 0.9621)

(c) 90° 风向角

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

赵雅丽, 女, 山东人, 1978年10月生。

1996年9月进入山东大学攻读土木工程专业; 2000年7月毕业, 获学士学位。

2002年9月进入浙江大学攻读结构工程专业; 2005年3月毕业, 获硕士学位。

2005年3月进入同济大学桥梁工程系风工程专业攻读博士研究生。

已发表论文:

- [1] 赵雅丽, 全涌, 黄鹏, 顾明. 典型双坡屋面风压分布特性风洞试验研究. 同济大学学报, 2010.38(11) .
- [2] 顾明, 赵雅丽, 黄强. 低层房屋屋面风压的风洞试验和数值模拟. 空气动力学学报, 2009
- [3] 赵雅丽, 黄鹏, 全涌, 顾明. 典型双坡低矮建筑屋面风压分布特性试验研究. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 2007.10, 大连
- [4] 赵雅丽, 顾明, 全涌, 黄鹏. 低矮建筑双坡屋面极值风压分布特性分析. 工程力学 (已录用)

博士期间参加的科研项目:

- [1] 国家自然科学基金 (50708082、50778108)
- [2] 国家科技支撑计划课题 (2006BAJ06B05, 2006BAJ03B04)
- [3] 国家科技支撑计划项目 (2008BAJ08B14): 住宅建筑综合防灾标准研究
- [4] 北京大学奥运会乒乓球馆风洞试验研究 2005.5
- [5] 上海虹桥交通枢纽工程风洞试验研究, 2007.10-2007.12
- [6] 昆明新机场航站楼风洞试验研究, 2008.3-2008.6
- [7] 温州鹿城广场超高层塔楼(350米)风洞试验, 2008.11-2009.2
- [8] 深圳机场航站楼风洞试验, 2008.8-2009.9