



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402655

引用格式:张小敏,裴城,程小慷,等. 山体高度对机场航站楼屋盖风压分布的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(3): 1165-1173.

Zhang Xiaomin, Pei Cheng, Cheng Xiaokang, et al. Influence of mountain height on the wind pressure distribution on the roof of airport terminal buildings[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1165-1173.

建筑科学

山体高度对机场航站楼屋盖风压分布的影响

张小敏¹, 裴城^{1,2*}, 程小慷¹, 杨雄伟³, 马存明⁴

(1. 中国民用航空飞行学院机场学院, 广汉 618307; 2. 民航机场智慧运营与运维四川省工程研究中心, 广汉 618300;
3. 河北地质大学城市地质与工程学院, 石家庄 050031; 4. 西南交通大学, 四川省风工程试验研究中心, 成都 610031)

摘要 为研究山区不同山体高度上机场航站楼大跨屋盖的风压分布特性,对机场航站楼屋盖在0、30、60、90 m 山体高度上的刚性模型,进行的风洞测压试验,对比分析了不同山体高度对屋盖表面平均风压、脉动风压、脉动风压的非高斯特性、峰值因子以及极值风压的影响。结果表明:山体高度的增加显著增加了屋盖迎风前缘的平均风压与脉动风压系数,也加剧了屋盖前缘流动分离的程度,使得屋盖迎风前缘脉动风压的偏度、峰度以及概率密度函数明显偏离标准高斯分布,表现出强烈的非高斯特性。同时通过 Hermite 矩模型对峰值因子进行计算发现,屋盖表面大部分测点的峰值因子主要分布在3.5~4 范围内,远高于GB 50009—2012 的建议值2.5,屋盖前缘的极值风压值也会随山体高度的增加而增大,并且全风向角下屋盖边缘有着类似的变化规律,其中90 m 山体高度上屋盖表面最不利极值负压比0 m 山体高度上降低了44.9%。研究可为同类型机场航站楼的设计与建造提供有益的建议和参考。

关键词 山体高度; 机场航站楼; 大跨屋盖; 极值风压; 非高斯特性; 风洞试验

中图分类号 TU312⁺.1;

文献标志码 A

Influence of Mountain Height on the Wind Pressure Distribution on the Roof of Airport Terminal Buildings

ZHANG Xiao-min¹, PEI Cheng^{1,2*}, CHENG Xiao-kang¹, YANG Xiong-wei³, MA Cun-ming⁴

(1. Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of Smart Operation and Maintenance of Civil Aviation Airports, Guanghan 618300, China;
3. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;
4. Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[Abstract] To study the wind pressure distribution characteristics of long-span roofs of airport terminals at different mountain heights in mountainous areas, a rigid model wind tunnel pressure measurement test of airport terminals roofs at mountain heights of 0 m, 30 m, 60 m, and 90 m was conducted to compare and analyze the effects of the heights on the surface mean and pulsating wind pressure, non-Gaussian characteristics of pulsating wind pressure, peak factor, and extreme wind pressure of the roof surface. The results show that the increase in mountain height significantly increases the mean and fluctuating wind pressure coefficient at the windward leading edge of the roof, and also intensifies the degree of flow separation at the leading edge of the roof. This causes the skewness, kurtosis, and probability density function of the fluctuating wind pressure at the windward leading edge of the roof to deviate significantly from the standard Gaussian distribution, exhibiting strong non-Gaussian characteristics. At the same time, the Hermite moment model was used to calculate the peak factor, and it was found that the peak factor of most measuring points on the roof surface was mainly distributed in the range of 3.5~4, which was much higher than the recommended value of 2.5 in GB 50009—2012. The extreme wind pressure value at the front edge of the roof also increased with the increase of the mountain height, and there was a similar variation pattern at the edge of the roof under all wind directions. Among them, the most unfavorable extreme negative pressure on the roof surface at a mountain height of 90m decreased by 44.9% compared to the 0m mountain height. Research can provide useful suggestions and references for the design and construction of terminals in similar airports.

收稿日期: 2024-04-12 修订日期: 2024-07-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费(J2022-016, 24CAFUC10210, PHD2023-024); 国家重点研发计划(2022YFC3005301); 国家自然科学基金(52078438); 河北省自然科学基金(E2023403007)

第一作者: 张小敏(1999—), 女, 汉族, 河南周口人, 硕士研究生。研究方向: 大跨屋盖抗风设计。E-mail: zxm_fmwyj@163.com。

* 通信作者: 裴城(1992—), 男, 汉族, 四川成都人, 博士, 讲师。研究方向: 结构抗风设计。E-mail: peicheng_xnjt@163.com。

[**Keywords**] mountain heights; airport terminal; long-span roof; extreme wind pressure; non-Gaussian features; wind tunnel test

大跨屋盖结构由于质量轻、柔性大、阻尼小等一系列特点,对风荷载的作用十分敏感,给结构设计带来了很大的挑战。风荷载已成为大跨屋盖结构的主要设计荷载,由风导致的屋盖结构的破坏事件时有发生^[1-4]。随着“交通强国”的全面实施^[5-6],中国西部机场建设蓬勃发展,机场建设体现民航需求,山区机场航站楼多建在山顶或群山环抱的山谷。而山区风场条件复杂,不仅受到大气环流的影响,还受到当地地形和气候的局部影响,因此使得机场航站楼大跨结构的风压分布特性与平原和沿海地区的风场有显著差异。因此,本文中将根据国家发展战略,聚焦西部山区机场航站楼大跨屋盖结构的风压分布特性进行研究。

针对大跨屋盖风压分布特性研究,国内外学者进行了一系列研究。Yang等^[7]通过在风洞试验,研究了不同风场对机场航站楼大跨屋盖边界层湍流风荷载的影响,发现湍流积分尺度对非高斯特性有较显著的影响。Song等^[8]通过对某机场航站楼大跨结构进行刚性模型测压试验,研究了不同风向角下大跨屋盖结构的风压分布规律,结果发现不同风向角下屋顶上多数平均风压都是负值,屋盖前缘的负压值最为显著。汪之松等^[9]基于风洞试验,研究了平均风剖面、风速、风向、湍流强度等因素对屋面风压的影响。结果发现:屋盖迎风前缘负风压最大,风速对屋盖的风压系数均值和极值影响较小,而湍流度对极值风压影响较大。郑德乾等^[10]基于风洞试验数据,对不同风向角下机场航站楼屋盖表面平均风压系数和脉动风压系数的变化规律进行了研究,并用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟揭示了其屋盖风荷载表面的作用机理。李正良等^[11]通过风洞试验,研究了周边建筑物对某机场航站楼大跨曲面屋盖表面风压的遮挡效应,发现上游周边建筑对大跨屋盖有一定的遮挡效应,且会减小屋盖表面的风压。李驰宇等^[12]对B类地形下的某大跨屋盖进行了风洞测压试验,研究了不同风向角对屋盖结构表面风荷载特性的影响,结果发现:在45°风向角下,脉动风压系数和极值风压系数的最大值大于其他风向角,为最不利风向角。Chen等^[13]对大跨度屋盖进行了不同湍流作用下的风洞试验,研究了不同湍流对大跨度屋盖风荷载非高斯特性的影响,结果发现随着湍流的增加,风荷载的非高斯特性更加显著,并且峰值因子呈正相关增加。张建等^[14]通过对波纹状大跨屋盖的风压分布特性进行研究,发现波纹形状能加剧了迎风侧屋盖前缘的分离,

并对围护结构的负压极值有显著的影响。李波等^[15]对不同建筑造型的屋盖风荷载特性进行了研究,发现当风向角与屋盖波纹存在一定的夹角时,波纹间距对屋盖表面风压有一定影响。王程等^[16]通过对典型屋盖的二维缩尺模型进行数值模拟。研究了不同坡角对屋面风压分布特性的影响,结果发现:屋脊处的极值吸力随着屋面坡度的增加而增大。王芳等^[17]通过对大跨屋盖表面有无建筑装饰条带的刚性模型进行风洞试验,研究了建筑装饰条带对大跨屋盖风荷载特性的影响。发现建筑装饰条带对风荷载的影响与风向角有关,并且建筑装饰条带会增大最不利的极值负压。

综上所述,针对机场航站楼大跨屋盖表面风荷载的研究多集中于周边建筑、不同风向角、不同风场、不同坡角、不同湍流强度及建筑装饰条带对大跨屋盖的影响等,关于山区不同山体高度对机场航站楼大跨屋盖风压分布特性影响的研究甚少。为此选取一典型山区机场航站楼大跨屋盖为研究对象,通过在风洞中设置不同山体高度上的机场航站楼进行刚性模型测压试验,对比分析了不同山体高度下屋盖表面平均风压系数、脉动风压系数、脉动风压的非高斯特性、峰值因子以及极值风压的差异。从而得到不同山体高度对航站楼大跨屋盖风压分布特性的影响结果,可为同类型机场航站楼设计及建造提供参考。

1 风洞试验

1.1 试验模型及试验布置

本文中风洞试验的研究对象为山区某机场航站楼的大跨度曲面屋盖。此屋盖全长跨度为102 m,最大宽度为53 m,高度为30 m。试验模型按缩尺比1:200进行设计,模型表面采用2 mm ABS胶板和3d打印的树脂制作而成,能满足风洞试验屋盖测压的要求。为研究山区不同山体高度对机场航站楼大跨屋盖风压分布特性的影响,试验设置了机场航站楼处于0、30、60、90 m山体高度上的刚性模型测压试验,其试验模型照片如图1所示。

本次机场航站楼大跨屋盖刚性模型的风洞试验在西南交通大学XNJD-1风洞实验室中进行。该试验段截面尺寸为长8.0 m、宽3.6 m、高3.0 m,试验段配备有Scanivalve扫描阀和眼镜蛇测速仪器,主要用于压力的测量和风速数据的采集。采样频率为256 Hz,采样时长取60 s,阻塞率小于0.5%。为了在大跨屋盖表面获得准确的风荷载特性,在屋

盖表面对称性地布置了 205 个测压点。并对屋盖曲面边缘、圆孔周围及屋盖侧边缘处存在流动分离的模型测点区域,进行了加密处理,其模型测点布置 (A_1 、 A_2 、 A_3 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 D_1 、 D_2 、 D_3) 和风向角 α 定义如图 2 所示。

在工况方面,设置了机场航站楼模型处于 0、30、60、90 m 山体高度等四种工况,且在每一种山体高度下每隔 15° 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 风向角(屋盖两侧区域对称)范围内设置了 12 种情况,具体试验工况数据如表 1 所示。

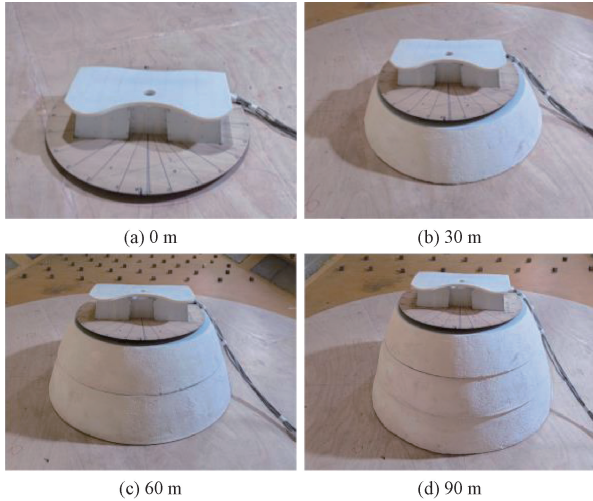


图 1 不同山体高度上风洞试验模型照片
Fig. 1 Photos of wind tunnel test models at different mountain heights

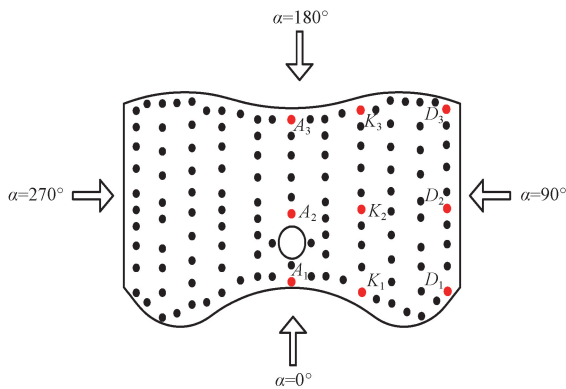


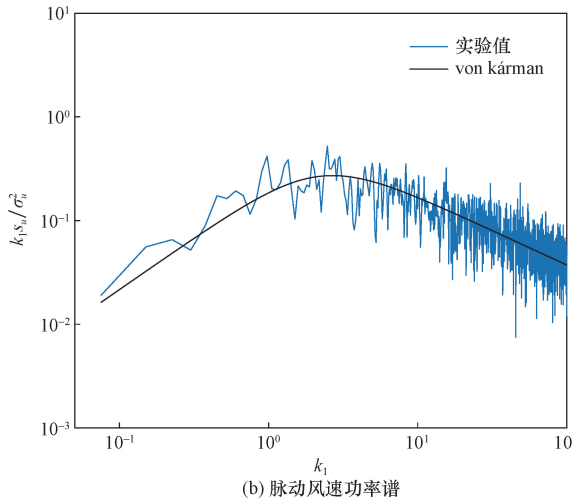
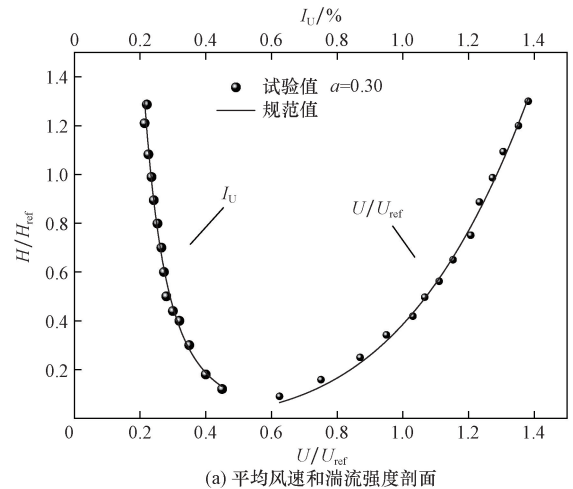
图 2 模型测点和风向角设置
Fig. 2 Model measurement points and wind direction angle settings

表 1 试验工况
Table 1 Test conditions

山体高度 H/m	风向角 $\alpha/(^\circ)$
$H_1 = 0$	0、15、30、...、180
$H_2 = 30$	0、15、30、...、180
$H_3 = 60$	0、15、30、...、180
$H_4 = 90$	0、15、30、...、180

1.2 山区复杂风环境模拟

该机场航站楼所处位置在 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[18] 中属于 D 类地貌,为了准确的模拟该地形所受到风场环境,在风洞试验中采用尖劈和粗糙元对风场进行模拟。图 3(a) 所示为模拟的 D 类大气边界风场的平均风速和湍流强度剖面。图 3(b) 为脉动风速功率谱图。从图 3 风场模拟结果中可知,平均风速剖面、湍流强度剖面的试验值与规范值基本一致,脉动风速功率谱的试验值与 von Kármán 谱较为吻合,可见试验模拟的风场满足试验要求。



U 为风速, H 为高度, I_U 为湍流强度, U_{ref} 为模型参考点风速, H_{ref} 为模型参考点高度, α 为风速剖面指数, S_u 为风速功率谱密度, k_1 为一个特定频率, σ_u^2 为风速信号的方差

图 3 风洞试验模拟的 D 类大气边界层
Fig. 3 D-class atmospheric boundary layer simulated in wind tunnel tests

1.3 数据处理方法

风洞试验获得的试验数据通常是以风压系数的形式给出,对屋盖表面的风压需进行无量纲化处理,得到其风压系数时程^[19-20]。计算方法为

$$C_{pi}(t_j) = [P_i(t_j) - P_\infty] / 0.5\rho U_0^2 \quad (1)$$

式(1)中: $C_{pi}(t_j)$ 为模型上 t_j 时刻第 i 个测点的风压系数; P_i 为压力扫描阀测得的风压值; P_∞ 为参考点处平均静压; U_0 为模型顶部高度处的风速; ρ 为空气密度。

根据上述风压系数, 计算屋盖表面各测点的平均风压和脉动风压系数, 公式为

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^N C_{pi}(t_j)}{M} \quad (2)$$

$$C_{pri} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^N [C_{pi}(t_j) - \bar{C}_{pi}]^2} \quad (3)$$

式中: \bar{C}_{pi} 为平均风压系数; C_{pri} 为脉动风压系数; M 为测点总采样点数。

2 实验结果分析

2.1 平均风压系数和脉动风压系数

以 0° 风向角下结果为例进行分析, 图 4 给出了航站楼处于四种山体高度下屋盖的平均风压系数等值线云图。可知: 机场航站楼在 $H_1 \sim H_4$ 山体高度上时, 整体上表现为屋盖前缘的平均风压系数变化剧烈, 屋盖中间及后缘区域的平均风压系数变化比较缓慢。同时, 通过云图可以看出, 随着航站楼所处山体高度的增加, 屋盖前缘及凸起处的平均风压系数逐渐增大。其中, H_4 山体高度下屋盖前缘的负压分布范围最大, 在 -2.62 左右, 相比于 H_1 的最大平均风压系数增加了 107.9% 。表明山体高度的增加能加剧屋盖迎风前缘流动分离。

图 5 给出了 0° 风向角时航站楼处于四种山体高度下屋盖表面的脉动风压系数等值线云图。可知,

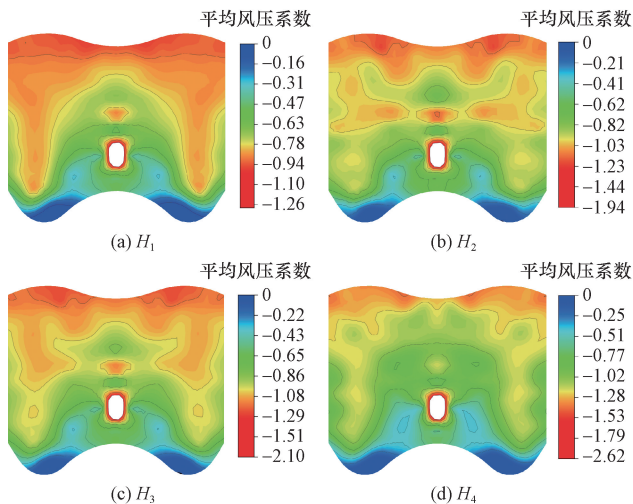


图 4 不同山体高度上屋盖表面平均风压系数云图

Fig. 4 Cloud chart of mean wind pressure coefficient on roof surface at different mountain heights

航站楼在四种山体高度上时, 其屋盖表面的脉动风压系数整体上表现为屋盖前缘及曲面凸起处的脉动风压系数较大, 而屋盖迎风侧后方绝大部分区域的脉动风压系数相对较小。同时, 通过云图可以看出, 屋盖表面的脉动风压系数与平均风压系数具有类似的分布规律, 即随着航站楼所处山体高度的增加, 屋盖前缘的脉动风压值逐渐增大。其中, 屋盖在 $H_2 \sim H_4$ 上的脉动风压系数相比于 H_1 最大脉动风压系数分别增加了 4.7% 、 9.4% 、 20.3% 。

由上述结果可知, 山体高度的增加能加剧航站楼屋盖前缘及凸起处流动分离的剧烈程度, 可能使其表面风压呈现出较显著的非高斯特性。因此, 有必要对不同山体高度下屋盖表面脉动风压的非高斯性进行研究。

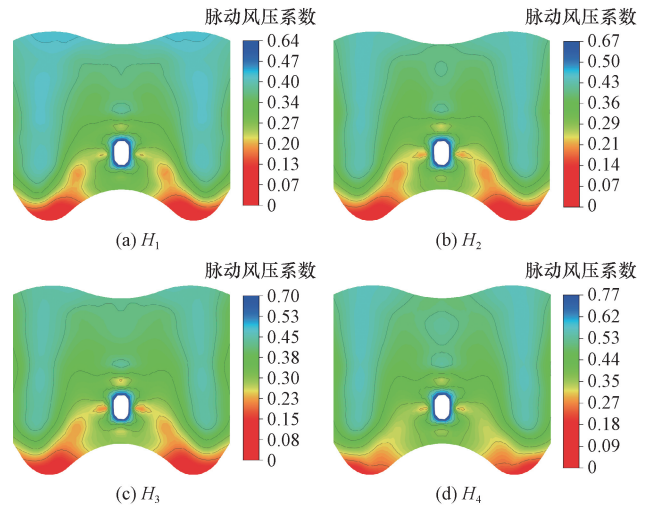


图 5 不同山体高度上屋盖表面脉动风压系数云图

Fig. 5 Cloud map of fluctuating wind pressure coefficient on roof surface at different mountain heights

2.2 脉动风压的非高斯特性

偏度和峰度是非高斯概率分布区别于标准 Gaussian 分布的重要指标。偏度和峰度的计算公式为

$$S_{ki} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\left(\frac{C_{pi}(t_j) - \bar{C}_{pi}}{C_{pri}} \right)^3 \right] \quad (4)$$

$$K_{ui} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\left(\frac{C_{pi}(t_j) - \bar{C}_{pi}}{C_{pri}} \right)^4 \right] \quad (5)$$

式中: S_{ki} 和 K_{ui} 分别为第 i 个测点的脉动风压的偏度和峰度。

图 6 给出了 0° 风向角时机场航站楼在不同山体高度上屋盖表面所有测点脉动风压的偏度-峰度散点图。由结果可以看出, 机场航站楼在 $H_1 \sim H_4$ 四种山体高度时, 其屋盖模型表面各测点脉动风压的

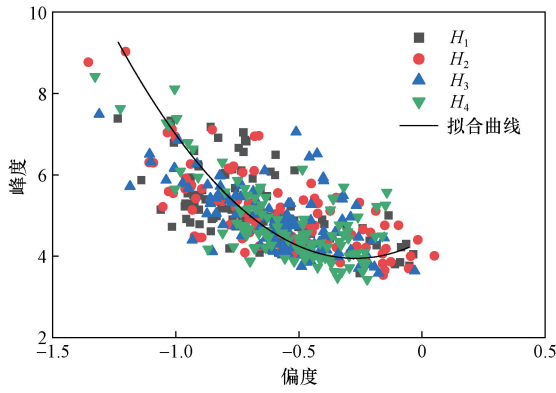


图6 不同山体高度上偏度-峰度散点图

Fig. 6 Scatter plot of upwardly skewed kurtosis at different mountain heights

偏度与峰度存在一定的偏差,但从整体上看屋盖表面的偏度与峰度间呈现非线性关系。在四种山体高度上屋盖表面大多数测点风压的偏度值与峰度值都分布在 $-1.0 < S < 0$ 及 $3.5 < K < 6.0$ 范围内,其偏度与峰度值明显偏离标准 Gaussian 分布。且不同山体高度上屋盖表面各测点脉动风压的偏度值大多数为负值,长尾在负向(吸力一侧)。

图7给出了 0° 风向角时航站楼处于四种山体高度上屋盖模型表面所有测点脉动风压的偏度与峰度等值线云图。由图可知,机场航站楼在四种山体高度上时,其屋盖表面的偏度和峰度整体上表现为屋盖前缘及两侧的偏度和峰度较大,而屋盖后方的绝大部分区域的负偏度和峰度值相对较小。同时,通过云图可以看出,机场航站楼屋盖在山体高度 $H_2 \sim H_4$ 上的偏度相比于山体高度 H_1 最大偏度分别增加了 14.6%、8.9%、11.4%、峰度分别增加了 21.8%、1.4%、12.2%。表明随着航站楼所处山体高度的增加,屋盖前缘及两侧的偏度和峰度值呈现出明显的先增大后减小再增大变化趋势。

由上述结果可知,山体高度 $H_1 \sim H_4$ 对屋盖前缘及两侧偏度和峰度的影响最为剧烈,使得屋盖前缘及两侧脉动风压的非高斯性更显著。

为进一步研究机场航站楼在不同山体高度上屋盖表面脉动风压的非高斯特性,图8给出了 0° 风向角时机场航站楼在四种山体高度上屋盖表面典型测点(测点位置及编号见图2)的脉动风压概率分布函数,并将其与标准 Gaussian 曲线分布进行对比。图中纵坐标为脉动风压概率密度(probability density function, PDF),横坐标为数据归一化处理后的风压系数 $(C_p - \bar{C}_p)/C_{pr}$ 。由图8(a)~图8(c)可知,在四种山体高度上屋盖前缘测点 A_1 和圆孔周围测点 A_2 的脉动风压概率密度函数与标准 Gaussian 分布曲线出现严重偏离,不满足高斯分布。而屋盖后缘

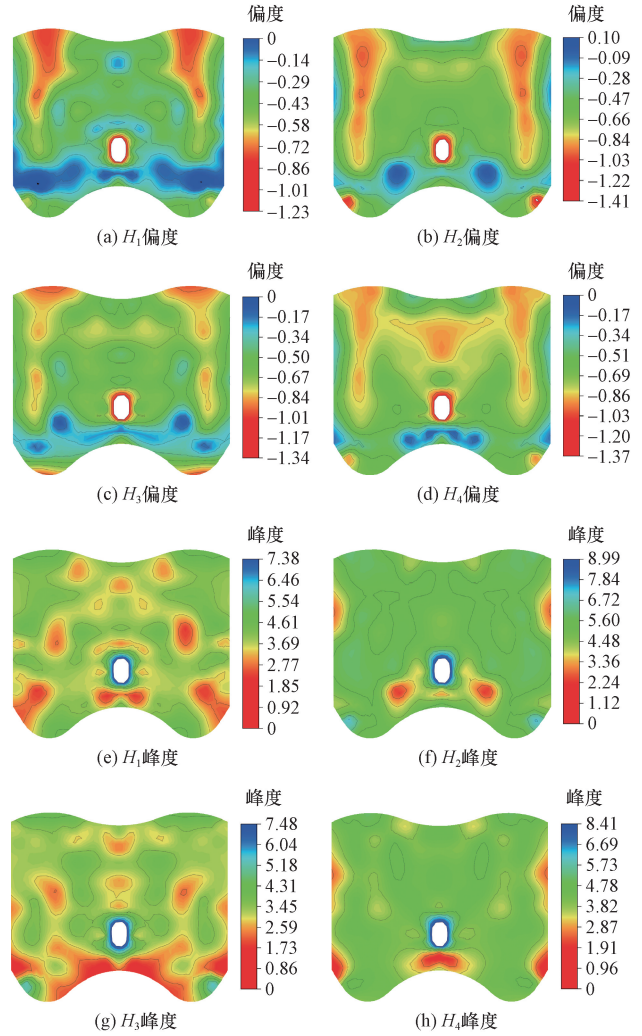


图7 不同山体高度上屋盖表面脉动风压的偏度和峰度图

Fig. 7 Skewness and kurtosis maps of wind pressure on roof surfaces at different mountain heights

测点 A_3 的脉动风压概率密度分布与标准 Gaussian 分布基本吻合,满足高斯分布。通过将不同山体高度上相应测点值与标准 Gaussian 分布曲线进行对比可知,随着航站楼所处山体高度的增加,屋盖表面的脉动风压概率密度函数呈现先增大后减小的变化趋势。其中测点 A_1 在山体高度 H_3 下由于受流动分离影响最为显著,其最大偏差达到 17.9%,测点 A_2 由于处于屋盖圆孔周围导致其处于分离泡内,其最大偏差达到 15.4%。由图8(d)~图8(f)可知,屋盖前缘测点 K_1 的风压概率密度分布也显著偏离标准 Gaussian 分布,且其偏离程度随着航站楼所处山体高度的增加,呈现先增大后减小的变化趋势。而对于测点 K_2 、 K_3 ,由于距离屋盖前缘和边缘较远,其风压概率密度函数基本满足高斯分布。由图8(g)~图8(i)可知,位于屋盖边缘的测点 D_1 、 D_2 、 D_3 在四种山体高度上的脉动风压概率密度函数均明显偏离标准 Gaussian 分布曲线,不满足高斯分布,

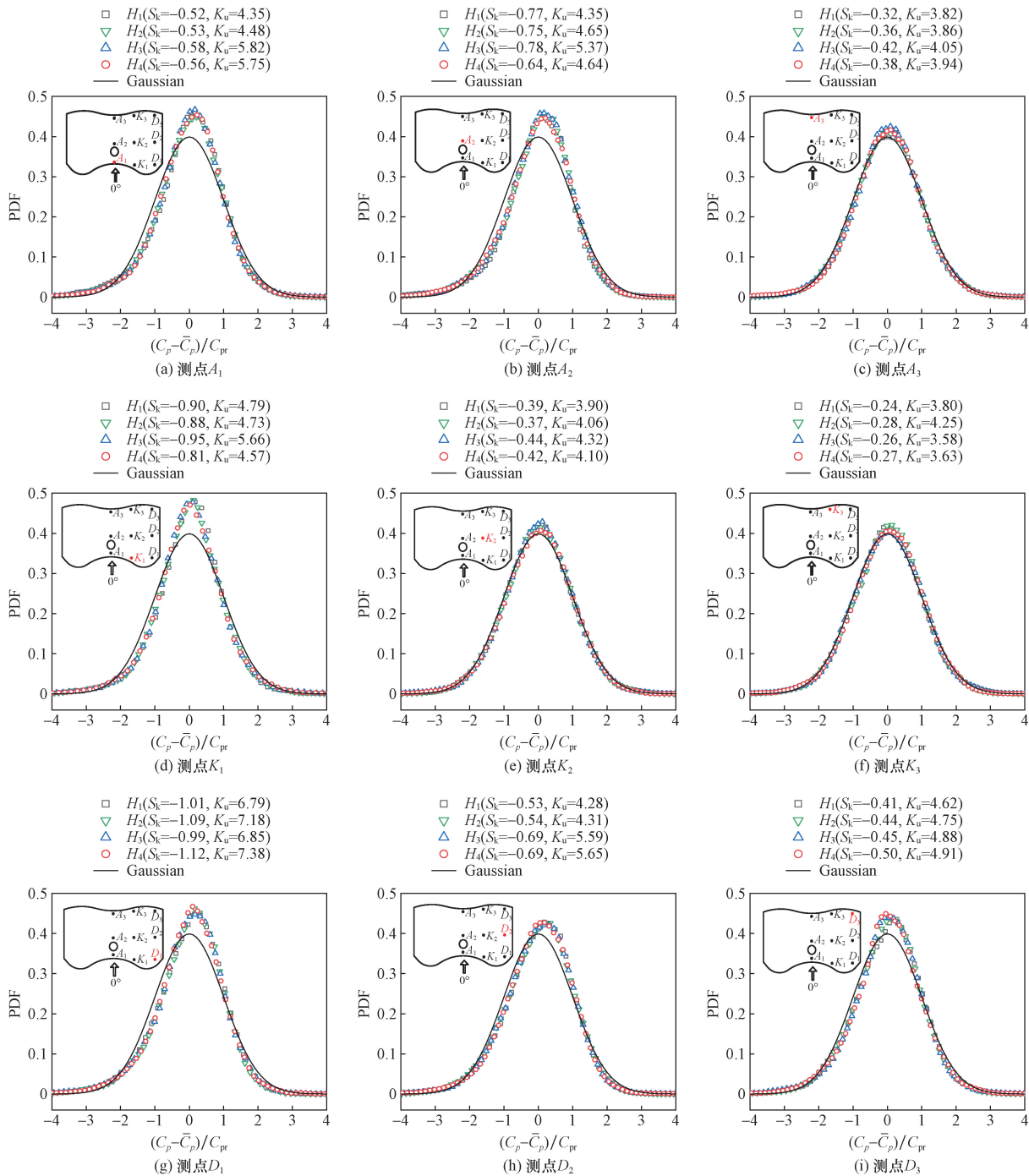


图8 不同山体高度上屋盖表面脉动风压概率密度分布曲线

Fig. 8 Probability density distribution curve of wind pressure on roof surfaces at different mountain heights

且山体高度 H_4 上的非高斯特性较其他山体高度下更显著。

由上述分析可知,山体高度的增加能加剧屋盖前缘及两侧脉动风压概率密度函数偏离标准 Gaussian 分布曲线的程度,使得屋盖前缘及两侧边缘的非高斯性更显著。因此,下面将基于不同山体高度上屋盖表面脉动风压的非高斯特性,对屋盖非高斯区域测点的峰值因子展开计算,以便为此类山区机场

航站楼屋盖脉动风压非高斯峰值因子的取值提供一定的借鉴和参考。

2.3 脉动风压非高斯峰值因子

峰值因子是计算屋盖表面极值风压的关键参数,在传统的大跨屋盖抗风设计中,通常假定屋盖表面脉动风压符合高斯分布,然后采用规范中统一的峰值因子对屋盖表面的极值风压进行计算^[21-25]。然而,这可能会对屋盖表面呈现非高斯特性区域的

抗风安全性带来隐患。因此,本文中将在风压时程三阶统计量偏度和四阶统计量峰度的基础上,将非高斯过程转换成高斯过程的 Hermite 级数^[26-27],进而来求解屋盖表面的峰值因子,其对应的峰值因子 g 的表达式为

$$g = \kappa \left\{ \left(\beta + \frac{\gamma}{\beta} \right) + h_3 \left[\beta^2 + (2\gamma - 1) + \frac{1.98}{\beta^2} \right] + h_4 \left[\beta^3 + 3\beta(\gamma - 1) + \frac{3}{\beta} \left(\frac{\pi^2}{6} - \gamma + \gamma^2 \right) + \frac{5.44}{\beta^3} \right] \right\} \quad (6)$$

式(6)中: κ 、 h_3 、 h_4 为 Hermite 级数法的参数,分别为

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + 2h_3^2 + 6h_4^2}} \quad (7)$$

$$h_3 = \frac{S_k}{4 + 2\sqrt{1 + 1.5K_u}} \quad (8)$$

$$h_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5K_u} - 1}{18} \quad (9)$$

式中: S_k 、 K_u 风压时程的三阶统计量偏度和四阶统计量峰度; γ 为欧拉常数, $\gamma = 0.577 2$; $\beta = \sqrt{2\ln(v_0 T)}$; T 为时距; v_0 为零穿越率(即 $v_0 = \sqrt{m_2/m_0}$); $m_i = \int_0^\infty n^i S_{iy}(n) dn$; m_i 为 i 阶谱矩; n

为频率; $S_{iy}(n)$ 为单边功率谱密度。

为进一步研究不同山体高度上屋盖表面脉动风压非高斯峰值因子的变化规律,这里选取上述非高斯区域前缘和后缘典型测点为对象,采用 Hermite 级数法对不同山体高度上屋盖表面典型

测点在各风向角下的风压非高斯峰值因子进行计算,其非高斯区域典型测点峰值因子随风向角 α 的变化情况,如图 9 所示。

由图 9 可知,屋盖前缘测点 A_1 、 K_1 、 D_1 在多个风向角下,其脉动风压峰值因子在四种山体高度上均超过了 4,且在 0° 及 $75^\circ \sim 90^\circ$ 风向角下,不同山体高度对三个测点的脉动风压峰值因子影响最为显著,其最大脉动风压峰值因子超过了 5。同时,从三个测点的放大图可以发现,在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 风向角下,测点 A_1 、 K_1 、 D_1 的脉动风压峰值因子会随山体高度的增加而有所增大。而屋盖后缘测点 A_3 、 K_3 、 D_3 在多个风向角下,其脉动风压峰值因子都超过了 4,特别是在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 与 $165^\circ \sim 180^\circ$ 风向角下,出现了峰值因子上凸的两个最大值区域,其最大脉动风压峰值因子都超过了 5,表明不同山体高度在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 与 $165^\circ \sim 180^\circ$ 风向角下对屋盖后缘部分测点的脉动风压峰值因子有较显著的影响。

由上述结果知,非高斯区的脉动风压峰值因子与山体高度、测点位置及风向角有一定的关系,且四种山体高度上屋盖表面多数测点的峰值因子都超过 4,远大于建筑荷载规范中的建议值 2。

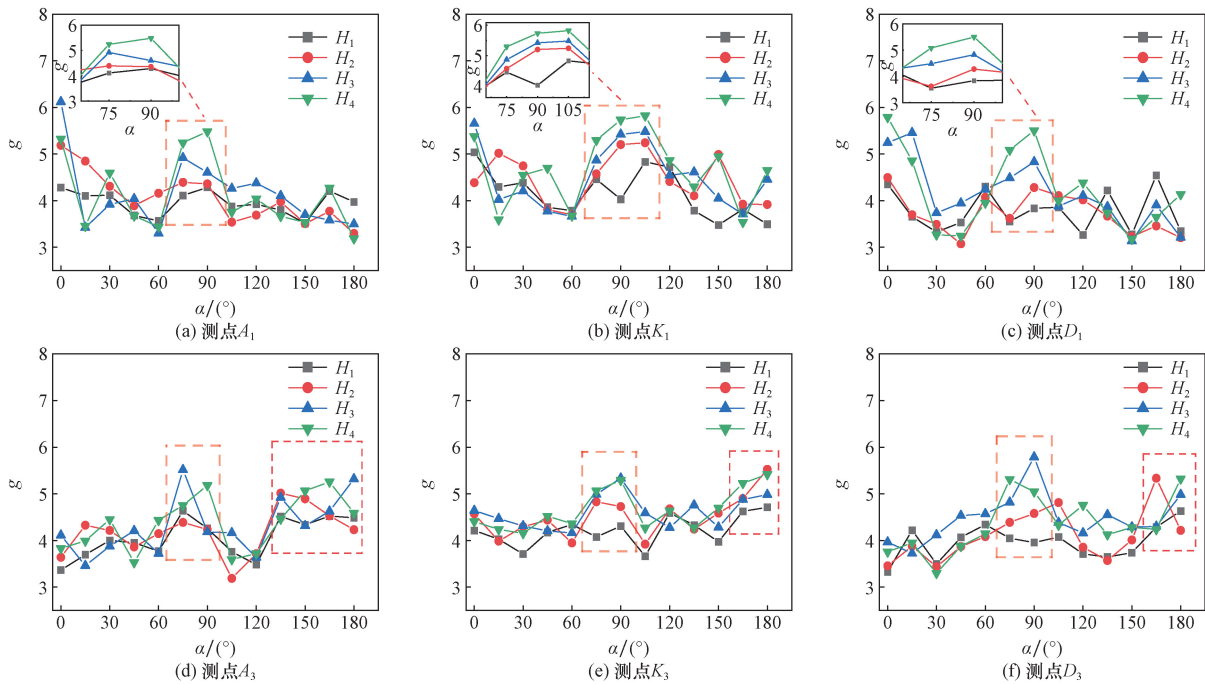


图 9 不同山体高度上屋盖典型测点峰值因子随风向角 α 变化

Fig. 9 Peak factor variation of typical measurement points of roofs at different mountain heights with α

2.4 极值风压

极值风压是围护结构抗风设计的重要参考依据,它的准确与否直接关系到围护结构的安全性。为此,本节将研究不同山体高度对屋盖表面极值风压的影响。极值风压 C_{pi-ex} 的表达式为

$$C_{pi-ex} = \bar{C}_{pi} - g_i C_{pri} \quad (10)$$

图 10 给出了航站楼屋盖在四种山体高度上全风向角下的极小值风压系数包络云图。由图可知:四种山体高度上屋盖表面最不利极值负压均分布在各风向角的屋盖前缘、后缘及侧边缘处,而中间区域的极值负压值较小。同时,由图 10 也可以看出,随着航站楼所处山体高度的增加,全风向角下屋盖前缘、后缘及侧边缘的最不利极值负压值均呈现逐渐降低的趋势,其中航站楼在 90 m 山体高度上屋盖边缘(前缘、后缘及侧边缘)的最不利极值负压值为 -6.58 ,比 0 m 山体高度上屋盖的最不利极值负压降低了 44.9%。此外,除屋盖边缘以外的区域,山体高度的增加也使得极小值风压系数普遍降低。可见,山体高度的增加会使航站楼屋盖最不利极值负压值有所减小,从而对围护结构的抗风设计产生不利影响。

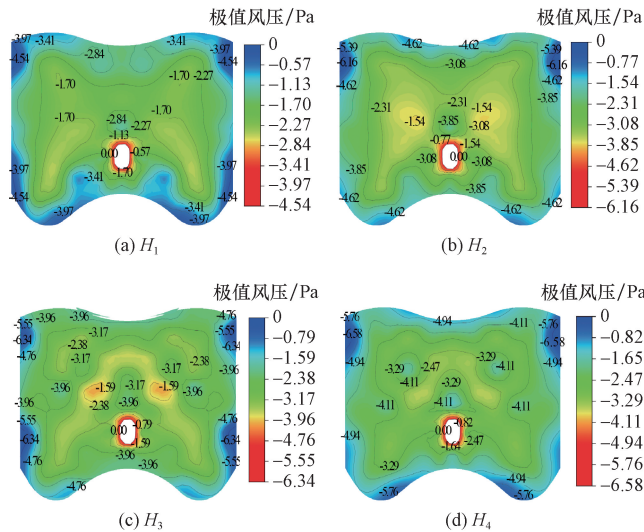


图 10 全风向角下屋盖表面极小值风压系数包络图云图

Fig. 10 Envelope diagram of the minimum wind pressure coefficient on the roof surface under all wind directions

3 结论

选取了一典型山区机场航站楼为工程背景,通过对航站楼模型进行风洞测压试验,对比分析了不同山体高度对屋盖表面风压系数、脉动风压的非高斯特性、峰值因子以及极值风压的影响,得出以下主要结论。

(1) 机场航站楼屋盖的表面风压在四种山体高

度上的较大值均出现在受流动分离影响显著的屋盖迎风前缘及曲面凸起处,且随着航站楼所处山体高度的增加,屋盖前缘的平均和脉动风压系数显著增大。

(2) 随着航站楼所处山体高度的增加,屋盖前缘及两侧的偏度、峰度和概率密度函数呈现先增大后减小再增大变化趋势,且屋盖前缘及两侧脉动风压的非高斯性更显著。

(3) 在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 风向角下,屋盖前缘典型测点的峰值因子会随山体高度的增加而有所增大。且多数测点的峰值因子分布在 3.5~4 范围内,远大于建筑荷载规范中的建议值 2.5。若仍采用规范中假定为高斯分布的峰值因子值进行屋盖的抗风设计,可能会使其结构存在一定的安全隐患。

(4) 四种山体高度上屋盖表面最不利极值负压均分布在各风向角的屋盖边缘(前缘、后缘及侧边缘)处。同时,随着航站楼所处山体高度的增加,全风向角下屋盖前缘、后缘及侧边缘的最不利极值负压值均呈现逐渐降低的趋势,其中航站楼在 90 m 山体高度上屋盖边缘处的最不利极值比 0 m 山体高度上的最不利极值负压降低了 44.9%。因此,在山区围护结构抗风设计时应当考虑山体高度效应。

参考文献

- [1] Hao Y, Han T, Wu H, et al. Study on the wind-induced interference effect of a large-span roof structure building group[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(4): 1392-1410.
- [2] 魏鹏祥, 邓挺, 杜明儒, 等. 典型低矮双坡房屋并列布置平均风压干扰效应的风洞试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 332-337.
Wei Pengxiang, Deng Ting, Du Mingru, et al. Wind tunnel experiment of interference effect of wind pressure of typical low-rise gable-roofed building in side-by-side arrangement[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(31): 332-337.
- [3] Min Q, Luo Y, Yang K, et al. Wind resistance performance analysis of metal roof system of the long-span integrated photovoltaic building[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86: 108986.
- [4] 李志国, 彭宇轩, 秦川等. 大跨曲面屋盖脉动风荷载非高斯分布特性试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(7): 84-89, 106.
Li Zhiguo, Peng Yuxuan, Qin Chuan, et al. Experimental study on non-gaussian distribution characteristics of fluctuating wind loads on a long-span curved roof[J]. Industrial Building, 2021, 51(7): 84-89, 106.
- [5] 肖建华, 邹明权, 周世健, 等. “一带一路”重大铁路建设生态与经济影响遥感监测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4605-4613.
Xiao Jianhua, Wu Mingquan, Zhou Shijian, et al. Remote sensing monitoring of ecological and economic impact of major railway construction in the Benguela railway[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4605-4613.
- [6] Latief R, Pei Y, Javeed S A, et al. Environmental sustainability in the belt and road initiative(BRI) countries; the role of sustainable tourism, renewable energy and technological innovation[J]. Eco-

- logical Indicators, 2024, 162: 112011.
- [7] Yang X, Zhou Q, Lei Y, et al. Non-Gaussian features of dynamic wind loads on a long-span roof in boundary layer turbulences with different integral-scales[J]. Wind and Structures, 2022, 34(5): 421-435.
- [8] Song J, Xu W, Hu G, et al. Non-Gaussian properties and their effects on extreme values of wind pressure on the roof of long-span structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 184: 106-115.
- [9] 汪之松, 王宇杰, 余波, 等. 不同风场中特高压换流站阀厅屋盖风压特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 146-155.
Wang Zhisong, Wang Yujie, Yu Bo, et al. Experimental study on the wind pressure characteristics of a UHV converter station roof in different wind fields[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(2): 146-155.
- [10] 郑德乾, 柳阔, 全涌, 等. 杭州萧山国际机场 T4 航站楼主楼屋盖风荷载的风洞试验与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(23): 28-33.
Zheng Deqian, Liu Kuo, Quan Yong, et al. Study on wind tunnel test and numerical simulation of wind load on the roof of Hangzhou Xiaoshan International Airport T4 terminal building[J]. Building Structure, 2021, 51(23): 28-33.
- [11] 李正良, 薛冀桥, 刘堃, 等. 基于风洞试验的大跨航站楼屋盖风振响应分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(25): 120-126.
Li Zhengliang, Xue Jiqiao, Liu Kun, et al. Wind-induced vibration response analysis for long-span terminal roof based on wind tunnel test[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25): 120-126.
- [12] 李驰宇, 戴益民, 刘泰廷, 等. 大跨屋盖风载特性风洞试验研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2021, 31(1): 85-94.
Li Chiyu, Dai Yimin, Liu Taitin, et al. Wind tunnel test study on wind load characteristics of long-span roof [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science Edition), 2021, 31(1): 85-94.
- [13] Chen F B, Zhang T, Yi J R, et al. Non-Gaussian characteristics and extreme wind pressure of long-span roof under various approaching flow turbulences[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107266.
- [14] 张建, 李波, 单文珊, 等. 波纹状悬挑大跨屋盖的风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 111-117.
Zhang Jian, Li Bo, Shan Wenshan, et al. Wind load on wavy-shaped long-span cantilevered roof[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 111-117.
- [15] 李波, 魏梓曦, 单文珊, 等. 建筑造型对悬挑屋盖风荷载的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 94-101.
Li Bo, Wei Zixi, Shan Wenshan, et al. Effect of architectural surfaces on wind load of cantilever roof[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(5): 94-101.
- [16] 王程, 李方慧, 张杰, 等. 坡角对双坡屋盖风荷载特性影响分析[J]. 黑龙江大学工程学报, 2022, 13(4): 27-32.
Wang Cheng, Li Fanghui, Zhang Jie, et al. Influence of slope angle on wind load characteristics of gable roof[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2022, 13(4): 27-32.
- [17] 王芳, 王思怡, 谢敬凯, 等. 建筑装饰条带对大跨屋盖表面风荷载特性影响的研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(8): 82-88, 227.
Wang Fang, Wang Siyi, Xie Jingkai, et al. Research on the effect of building decorative strips on the wind load characteristics of surface of long-span roofs [J]. Industrial Construction, 2023, 53(8): 82-88, 227.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] 邹琼, 刘毅超, 李正农. 平屋顶槽式聚光器风压分布及形成机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 10039-10048.
Zou Qiong, Liu Yichao, Li Zhengnong. Wind pressure distribution and formation mechanism of slotted concentrators on flat roofs[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 10039-10048.
- [20] 张慎, 王义凡, 程明, 等. 体育场馆膜建筑平均风压数值模拟及验证分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5768-5777.
Zhang Shen, Wang Yifan, Cheng Ming, et al. Mean wind pressure simulation and validation of stadium membrane building[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5768-5777.
- [21] 李玉学, 白硕, 杨庆山, 等. 大跨度封闭式柱面屋盖脉动风荷载非高斯分布试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 62-69.
Li Yuxue, Bai Shuo, Yang Qingshan, et al. Experiment study on non-Gaussian distribution of fluctuating wind load on long-span enclosed cylindrical shell roof[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7): 62-69.
- [22] Wu Y, Wen Z, Wu X, et al. Peak factor estimation method of non-Gaussian wind pressures on long-span tri-centered cylindrical roof structures [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2023, 32(3): e1994.
- [23] 叶继红, 孙虎跃. 大跨屋盖表面局部体型系数和峰值风压研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 11-20.
Ye Jihong, Sun Huyue. Local shape factors and peak wind pressure of large-span roofs[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 11-20.
- [24] Huang D, Chen G. Wind pressure distribution, non-Gaussian characteristics, and conical vortices of a large-span roof with variable arc angles[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104929.
- [25] 李波, 田玉基, 杨庆山. 非高斯风压时程的矩模型变换与峰值因子计算公式[J]. 振动工程学报, 2016, 29(3): 395-402.
Li Bo, Tian yuji, Yang Qingshan. Moment-based transformation of non-Gaussian wind pressure histories and non-Gaussian peak factor formulae[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(3): 395-402.
- [26] 杨雄伟, 周强, 李明水, 等. 复杂曲面屋盖脉动风压的非高斯特性及峰值因子研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 315-322.
Yang Xiongwei, Zhou Qiang, Li Mingshui, et al. Non-Gaussian features and peak factors of fluctuating wind pressures on a complex curved roof[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 315-322.
- [27] Ye T, Zhu L, Tan Z. Numerical statistic approach for peak factor of non-Gaussian wind pressure on building claddings [J]. Advances in Civil Engineering, 2021(13): 2918656.