文章编号:1674-2974(2025)05-0195-14 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025060

不同风向圆角弧边截面超高层建筑风荷载特性

刘庆宽[1,2,3†],杨硕琛[1],郑云飞[4],杨雄伟[5],王乾森[1]
(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043;
3. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心,河北 石家庄 050043;
4. 石家庄铁路职业技术学院 铁道工程系,河北 石家庄 050041;
5. 河北地质大学 城市地质与工程学院,河北 石家庄 050031)

摘 要:实际工程中建筑平面为圆角处理与圆弧凸边相结合的超高层结构较为常见,针对此类结构进行了风荷载研究.以不同截面弧边凸起率的超高层建筑为研究对象,根据风洞测压试验得到的风压时程数据,对建筑表面风压分布、气动力系数以及气动力功率谱进行分析,得到不同工况下截面弧边凸起率对超高层建筑风荷载特性的影响规律.研究表明,在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大:对于建筑表面风压分布,背风面*CD*与侧风面*AD*的平均风压系数整体上越接近于直边模型,而迎风面*AB*与侧风面*BC*变化比较复杂;对于平均风压、脉动风压以及极值风压,直边模型整体小于弧边模型,且弧边化会导致极值风吸力最大增大42%;对于横风向力系数及其功率谱,脉动升力系数以及脉动基底弯矩系数整体上有增大的趋势,功率谱峰值变化不规律;对于顺风向力系数及其功率谱,平均阻力系数与平均基底弯矩系数逐渐减小,功率谱没有明显谱峰,顺风向力主要受来流影响.对圆角方形建筑截面进行弧边化处理可能会导致局部风压过大,对幕墙抗风设计产生不利影响,但有利于降低结构顺风向风力.通过分析建筑表面风荷载特性,可为此类建筑的气动外形选择以及抗风设计提供参考.

关键词:超高层建筑;风荷载;风洞试验;圆角弧边化方形截面;风向角
中图分类号:TU973 **文献标志码**:A

Wind Load Characteristics of Super High-rise Buildings with Rounded Arc Edge Section under Different Wind Directions

LIU Qingkuan[1,2,3†], YANG Shuochen[1], ZHENG Yunfei[4], YANG Xiongwei[5], WANG Qiansen[1]
(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

* **收稿日期**:2024-04-13
基金项目:河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2022210078),Innovation Research Group Project of Natural Science Foundation of Hebei Province of China(E2022210078);中央引导地方科技发展资金项目(236Z5410G),Central Leading Local Science and Technology Development Fund Project(236Z5410G);河北省高端人才项目([2019]63),High-end Talents Project of Hebei Province of China([2019]63);河北省自然科学基金青年项目(E2023403007),Natural Science Foundation of Hebei Province(E2023403007);河北省教育厅青年拔尖项目(BJK2024130),Science Research Project of Hebei Education Department(BJK2024130)
作者简介:刘庆宽(1971—),男,河北保定人,石家庄铁道大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: lqk@stdu.edu.cn

4. Department of Railway Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China;
5. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In practical engineering, super high-rise buildings with the combination of fillet treatment and arc convex edge of the building plan are quite commom. A study on the wind load of this kind of structure was conducted. Based on the wind pressure time history data obtained from the wind tunnel pressure test, the wind pressure distribution, aerodynamic coefficient, and aerodynamic power spectrum of super high-rise buildings with different arc edge bulge rates were analyzed. The influence of the convex rate of the section arc edge on the wind load characteristics of the super high-rise building under different working conditions was obtained. The research shows that in the range of measured wind direction angle, with the increase of arc edge bulge rate, for the wind pressure distribution on the building surface, the average wind pressure coefficient of the leeward side *CD* and the crosswind side *AD* is closer to the straight edge model as a whole. The changes of windward surface *AB* and crosswind surface *BC* are more complicated. For the mean, fluctuating, and extreme wind pressures, the straight edge model is smaller than the arc edge model, and the arc edge leads to the maximum increase of extreme wind suction by 42%. For the across-wind force coefficient and its power spectrum, the fluctuating lift coefficient and the fluctuating base bending moment coefficient have an increasing trend as a whole, and the peak value of the power spectrum changes irregularly. For the downwind force coefficient and its power spectrum, the average drag coefficient and the average base bending moment coefficient gradually decrease, and the power spectrum has no obvious spectral peak. The downwind force is mainly affected by the incoming flow. The arc edge treatment of the corner square building section may lead to excessive local wind pressure, which has an adverse effect on the wind resistance design of the curtain wall but is beneficial for reducing the downwind wind force of the structure. By analyzing the wind load characteristics of the building surface, a reference can be provided for the aerodynamic shape selection and wind resistance design of such buildings.

Key words: super high-rise building; wind load; wind tunnel test; rounded arc edged square cross section; wind direction angle

现代超高层建筑向着高柔、低阻尼方向发展,对风的作用越来越敏感,对风荷载的控制成为超高层建筑结构设计中需要着重考虑的方面[1-5]. 目前工程实际中常采用气动措施来对超高层建筑风荷载进行控制,即通过建筑外形的优化设计来降低结构的风荷载[6].

根据气动措施对建筑外形进行角部修正可经济有效地减小建筑物所承受的风荷载[7-14]. 对超高层建筑外形采取的平面外形气动措施中,针对圆角化的角部处理方式研究较多. 国内外学者研究圆角化气动措施最常用的载体即方形截面柱体[15],通过风洞试验和数值模拟对圆角化处理的超高层建筑进行研究. 李秋胜等[16]对圆角率为25%的正方形截面高层建筑刚性模型进行了测压试验,发现圆角化处理能明显降低建筑风荷载,并且可以从本质上改变风荷载特性. Carassale 等[17]通过风洞试验研究了角部形状对方形圆柱气动特性的影响,研究了两种不同圆角半径的建筑模型表面风压随风向角的变化. Tamura 等[11,18]通过风洞试验和数值模拟研究了方柱圆角化前后的表面风压特性以及圆角化方柱的整体力,发现圆角化方柱由于尾流宽度的减小而降低了阻力,同时从迎风边缘分离的剪切层会重新附着到侧面,影响模型的风荷载特性. Elshaer 等[19]通过数值模拟,对比分析了对方柱进行圆角化处理、切角化处理和角部缩进对于减小整体力的作用,指出圆角化处理是减小了方柱阻力最有效的气动措施,这是因为圆角化处理使得分离剪切层在侧面再附,减小了尾流宽度,从而减小方柱阻力[20]. Miran 等[21]通过数值模拟,探讨了采用圆角化处理后,方柱整体力和斯托罗哈数随圆角率的变化规律. 结果表明,当圆角

率增大,斯托罗哈数也随之增大,平均阻力和升力均方根减小,并进一步对比了采用圆角化处理后方柱阻力和升力的降幅,发现升力的降幅大于阻力.杜晓庆等[22-24]采用大涡模拟的方法,对不同角(尖角、圆角)、边(直边、凹边和凸边)及其组合的类方柱风荷载和流场特性进行研究,发现角、边形状修正会对结构气动性能产生显著影响,其中凸边和圆角结合的截面修正方式最优,可显著降低结构整体风力、负压区强度和涡脱强度.

综上所述,对于圆角化超高层建筑风荷载的研究主要集中在对建筑平截面角部进行不同程度的圆角化处理,但随着超高层建筑的大量建设,出现了不少角部处理与圆弧凸边相结合的超高层建筑,在实际工程中应用较为广泛,例如天津城市大厦、深圳星河双子塔等,另外也出现了圆形截面的高层建筑,例如深圳的华润大厦、郑州的绿地中心等.该类建筑截面随着弧边凸起程度的增大逐渐向圆形过渡,其风荷载特性值得研究,而目前针对此类建筑风荷载受弧边凸起率影响的研究还较为匮乏.本研究以4种不同截面弧边凸起率的超高层建筑为研究对象,基于刚性模型风洞测压试验,研究建筑表面风压分布规律,并对主体结构气动力系数、风荷载功率谱进行分析,得到了平截面弧边凸起率对超高层建筑风荷载特性的影响规律,可为此类建筑的气动外形选择以及抗风设计提供参考.

1　风洞试验概况

1.1　模型及工况设计

风洞试验模型布置情况如图1所示.试验模型采用ABS材料制成,几何缩尺比为1∶250.超高层建筑试验模型共4个,建筑平面均由边长为100 mm的基础方形截面变形得到.模型的角部均采用圆角化处理,圆角半径为R;模型的四边采用弧度化凸起处理,凸起高度为G;弧边凸起率k为凸起高度G与截面特征长度的比值,为无量纲参数,其中截面特征长度取基础方形截面的边长;模型高度为H.试验模型的具体参数如表1所示.在试验模型外立面沿高度方向布置11层测点,模型2/3高度处测点布置及风向角示意图如图2所示.其中,模型在风洞中的最大阻塞比小于3%,满足风洞试验要求.综合考虑模型及风场的对称性,选取了0°~45°的风向角,以10°为间隔,并添加了45°下的工况,共测试了6个试验风向.试验风速10 m/s,以建筑物顶部高度600 mm处作为参考高度.采样频率为330 Hz,采样时间为60 s.图3给出了研究中风力、力矩和坐标系的定义.



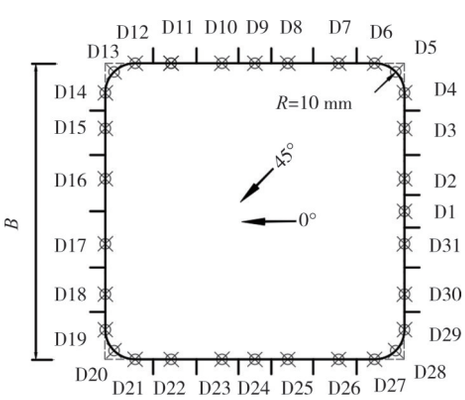
图1　风洞试验模型布置情况

Fig. 1　Layout of wind tunnel test model

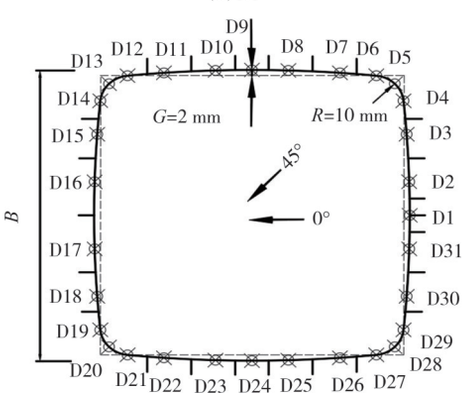
表1　试验模型的具体参数

Tab.1　The specific parameters of the test model

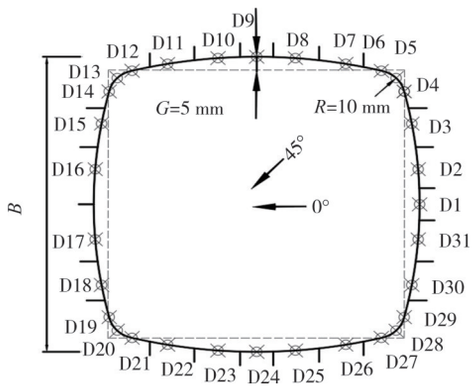
模型编号	B/mm	H/mm	R/mm	G/mm	k/%
R1	100	600	10	0	0
R2	104	600	10	2	2
R3	110	600	10	5	5
R4	122	600	10	11	11



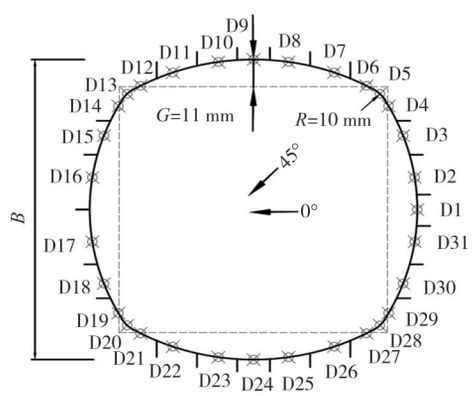
(a)R1



(b)R2



(c)R3



(d)R4

图 2 模型测点及风向角设置

Fig.2 Model measuring point and wind direction angle setting

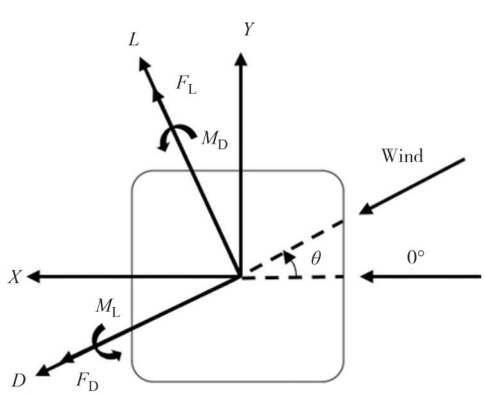


图 3 风力、力矩与坐标系定义

Fig.3 The definitions of wind forces, moments, and the coordinate system

1.2 风场模拟

试验在石家庄铁道大学 STU-1 风洞实验室进行,该风洞为回/直流可变式风洞,试验段长 24 m、宽 4.4 m、高 3 m. 本次试验基于C类风场下进行研究,试验前测量不同高度的风速和湍流度,绘制出平均风速和湍流度剖面图,与《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中的剖面曲线进行比较,试验值与理论值吻合较好,符合试验要求[25],如图 4 所示. 参考高度处的风速谱与 Von Karman 谱吻合良好,如图 5 所示.

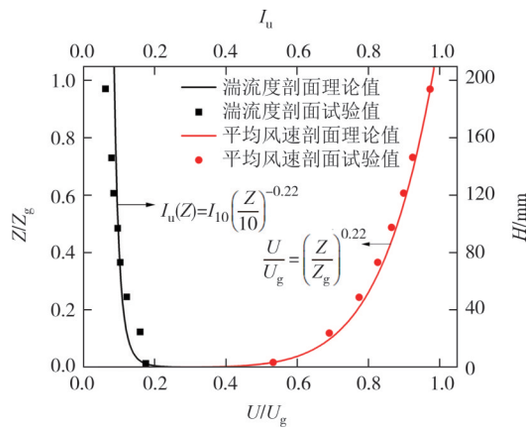


图 4 风场的平均风速剖面和湍流度剖面

Fig.4 Mean wind speed profile and turbulence profile of wind field

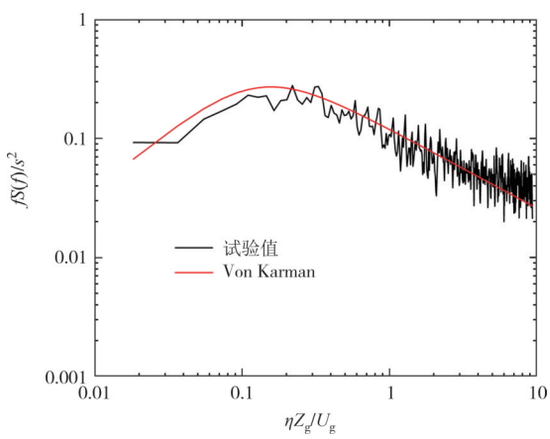


图 5 参考高度处的脉动风速谱

Fig.5 Fluctuating wind speed spectrum at reference height

2 风压分布特性

模型表面的风压一般用无量纲化的风压系数或体型系数来表征,风压系数的定义和计算可通过下式确定:

$$C_{pi}(t)=\frac{P_i(t)-P_s}{P_t-P_s}=\frac{P_i(t)-P_s}{\frac{1}{2}\rho U_g^2} \tag{1}$$

$$C_{pi,\,mean}=\frac{\sum_{i=1}^{N}C_{pi}(t)}{N} \tag{2}$$

$$C_{pi,\,rms}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(C_{pi}(t)-C_{pi,\,mean}\right)^2}{N-1}} \tag{3}$$

式中:$C_{pi}(t)$是建筑物表面某测点i在t时刻的风压系数;$P_i(t)$是测点i在t时刻的风压力;P_t是参考点总压平均值;P_s是参考点静压平均值;ρ为空气密度;U_g为参考点高度处来流的风速平均值;$C_{pi,\,mean}$和$C_{pi,\,rms}$分

别为测点 i 的风压系数 $C_{pi}(t)$ 的均值和均方根;N 是风压时程的数据个数,在此为 19 800.

2.1　平均风压特性

为了更全面地分析建筑平面为类方形的超高层建筑平均风压系数与弧边凸起率及风向角之间的关系,以模型 2/3 高度处的横截面作为研究对象,绘制了模型表面测点的平均风压分布情况. 不同风向角下各模型 2/3 高度处测点平均风压系数随弧边凸起率及风向角发生变化规律如图 6 所示. 并以 0°风向角为例绘制了各模型 2/3 高度处测点平均风压系数变化,如图 7 所示,文献[13]中圆角率为 10% 的矩形截面建筑 0°风向角下迎风面正压区平均风压系数变化范围为 0.20~0.70,背风面平均风压系数变化范围为−0.13~−0.23,与本文结果基本一致.

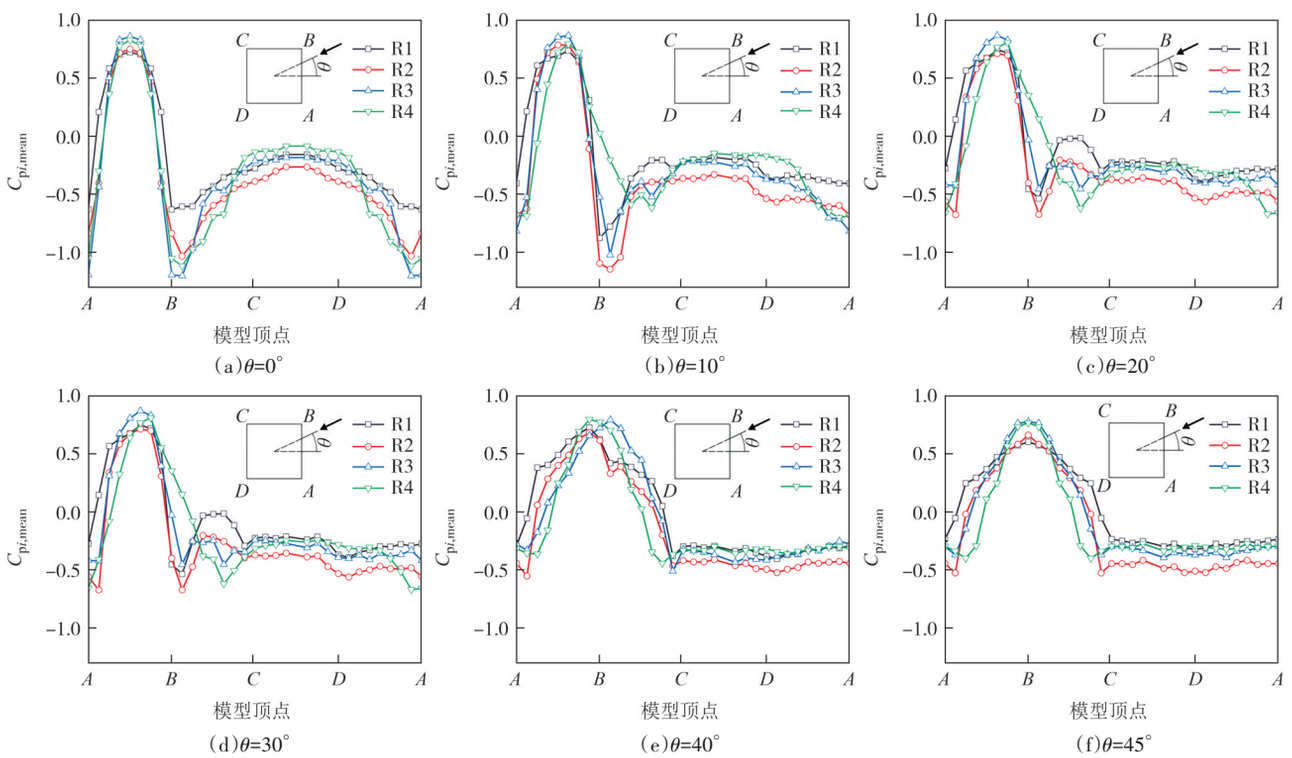


图 6　不同风向角下各模型 2/3 高度处平均风压系数分布图

Fig.6　Distribution of average wind pressure coefficient at 2/3 height of each model under different wind direction angles

结合图 6(a)及图 7 可知,0°风向角下,迎风面(*AB*)上除角点附近,各柱体平均风压系数基本一致. 迎风面角点(*A* 点和 *B* 点)至侧风面(*BC* 和 *AD*)中点部分,R1 风吸力最小,R3 风吸力最大. 侧风面(*BC* 和 *AD*)中点至背风面(*CD*)部分,整体上 R4 的风吸力最小,R2 的风吸力最大. 对于凸边模型背风面中点部分,R2 的平均风压系数绝对值约为 0.26,R3 约为 0.18,R4 约为 0.08,平均风压系数绝对值逐渐减小,这说明随着弧边凸起率的增大,侧风面气流回流区减小,气流的再附使模型的尾流宽度减小,导致模型背风面风吸力减小. 随着弧边凸起率的增大,迎风面角点附近区域的平均风压系数绝对值呈现先增大后减小的趋势,凸起率为 0 时极值最小,凸起率为 5% 时极值最大,相比最小值增大近 1 倍,此时 R3 的角部分离点附近的风吸力较大,R1 风吸力极大值点处于迎风面角点,R2、R3 与 R4 的风吸力极大值点向后移动一个点位. R1 迎风面风压力转化为风吸力的点处在迎风面角点,随着直角边转化为凸边,模型迎风面风压力转化为风吸力的点前移,即凸边会导致流动分离点前移,迎风面的正压区减小,但随着弧边凸起率的继续增大,气流分离点的位置没有明显改变.

在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,弧边模型背风面 *CD* 与侧风面 *AD* 的平均风压系数整体上越接近于直边模型,R2 的 *AD* 与 *CD* 面上的平均风压系数绝对值整体上大于其他模型,说明 R2 该区域所受风吸力更大,而迎风面 *AB* 与侧风面 *BC* 变化比较复杂,并且直边模型的平均风压整体小于弧边模型,说明该圆角率下建筑平截面弧边化对于降低结构表面局部风荷载是不利的. 随着风向角的增大,各柱体平均风压力与平均风吸力极大值整体减小,

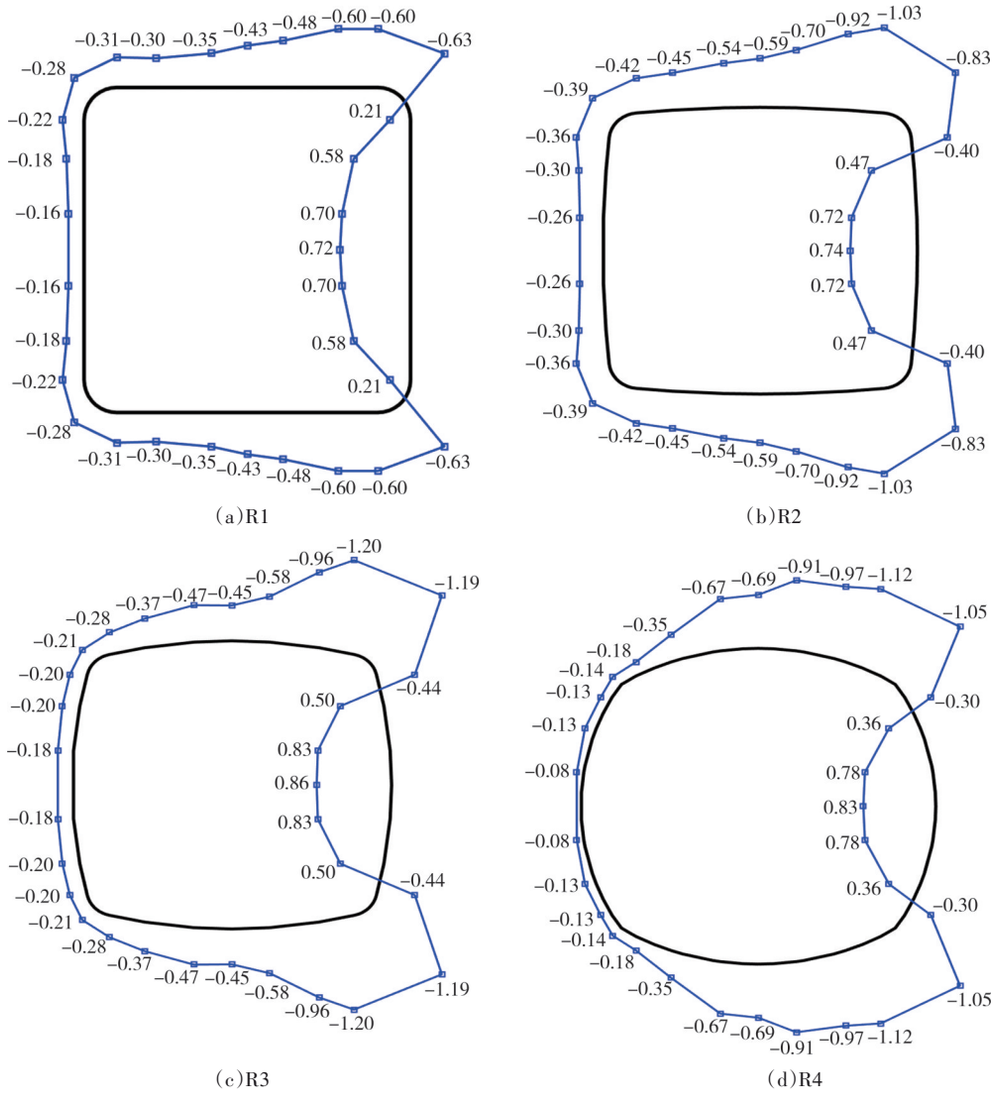


图7 0°风向角下各模型2/3高度处平均风压系数

Fig.7 Average wind pressure coefficient at 2/3 height of each model at 0° wind direction angle

变化趋于稳定.相比0°时,10°风向角下R1与R2风吸力极大值增大,R1风吸力极大值增大40%,增幅最为明显,R2风吸力极大值最大,增大约10%;R3与R4风吸力极大值减小,其中R4降幅达到55%.45°风向角时,风压力极大值点在迎风区域的中间位置角点处取得,弧边凸起率为0的模型平均风压系数最小,随着弧边凸起率的增大,平均风压系数增大.

2.2 脉动风压特性

对于各模型2/3高度处的平均风压系数在各个风向角下的变化规律已做分析,但是对于特殊平截面的超高层建筑,其脉动风压分布也需进行考虑.选取了2/3高度处截面在0°~45°风向角范围内的脉动风压,来分析类方形截面模型表面的脉动风压分布规律,如图8所示.

0°风向角下,随着弧边凸起率的增大,处于迎风区域测点的脉动风压系数表现出先增大后减小的变化趋势.对于迎风中部区域测点,R1的脉动风压系数最小,R2的脉动风压系数最大,相较于最小值增大25%.模型的脉动风压系数曲线在角部分离点处会具有波动性,脉动风压极值多出现在该处.随着弧边凸起率的增大,脉动风压系数极值先减小后增大再减小,在凸起率为5%时取得最大值,相比最小值增大约20%,脉动风压极大值点的位置发生了改变,R1极大值点处于迎风面角点,R2、R3与R4的脉动风压极大值点向后移动一个点位.

在所测风向角范围内,直边模型的脉动风压整体上小于弧边模型,并且各模型的脉动风压系数随着风向角的变化而发生改变.随着风向角的增大,迎

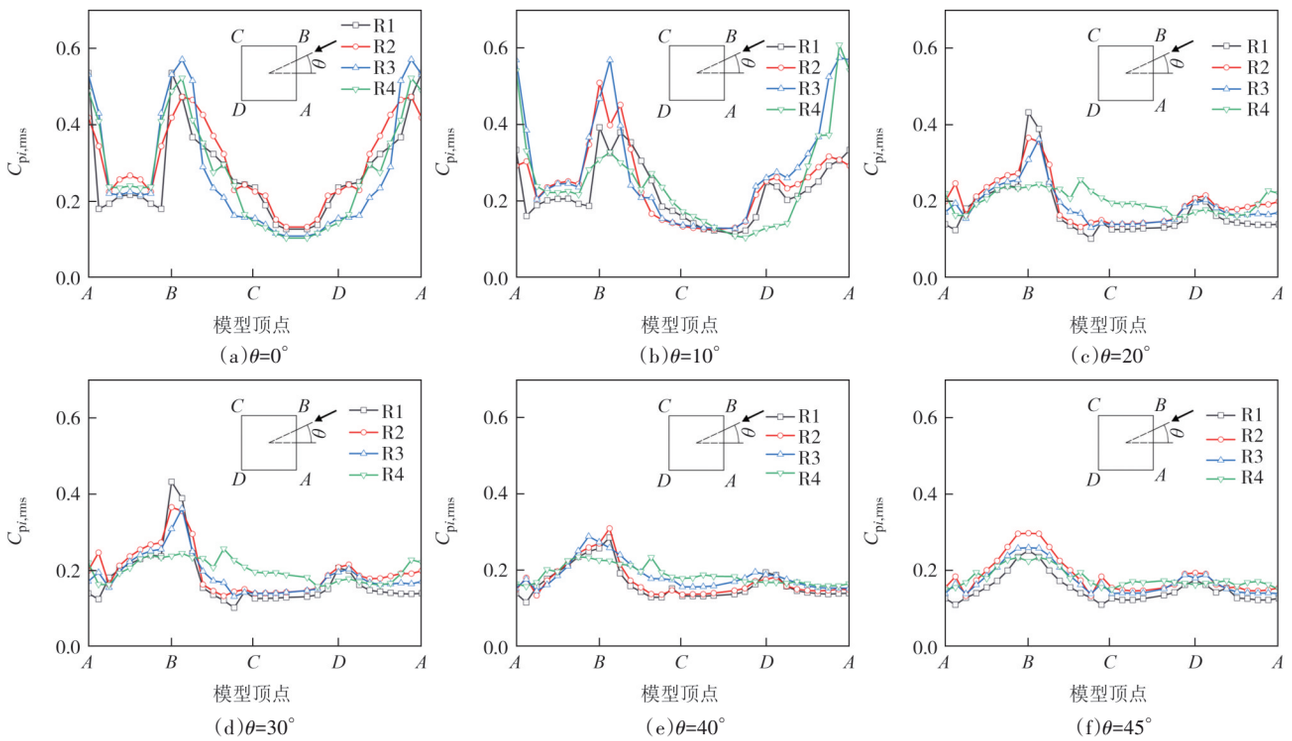


图 8　不同风向角下各模型 2/3 高度处脉动风压系数分布

Fig.8　Distribution of fluctuating wind pressure coefficient at 2/3 height of each model under different wind direction angles

风面中部位置的脉动风压系数,R1 均为最小. 在风向角大于 20°时,背风面(*CD*)位置的脉动风压系数,R4 均为最大,这可能与该弧边凸起率下柱体背风面形成的回流区有关. 在风向角大于 40°时,模型脉动风压趋于稳定,此时 R2 的脉动风压系数极大值较大. 45°风向角下,随着弧边凸起率的增大,脉动风压极大值先增大后减小,其极值点位于正对来流角点附近,该风向角下脉动风压整体偏小,曲线平缓.

2.3　极值风压特性

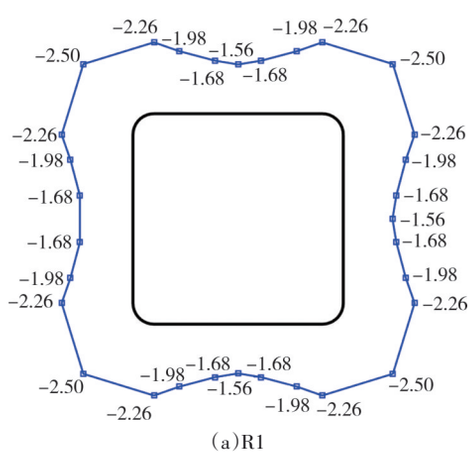
由于建筑表面的极值风荷载对高层建筑围护结构设计有重要影响,而极值风吸力一般起主导作用,故对模型表面的极值风吸力进行分析.

在风工程研究中,将各测点的风压系数作为随机变量,根据概率统计理论可知,借助某一随机变量的一阶矩和二阶矩能够计算得到该随机变量的极值,基于统计意义下的极值风吸力系数计算方法,如式(4)所示:

$$C_{pi}^{p-} = C_{pi,\,mean} - gC_{pi,\,rms} \tag{4}$$

式中:C_{pi}^{p-}表示极值风吸力系数;g 代表峰值因子,一般取 3.5[26].

以 2/3 高度处测点为例研究了不同风向角下各模型风荷载的变化规律,对每个测点所代表的区域进行了极值风吸力系数的计算,将结果进行比较,找出每个测点基于各风向角统计结果下极值风吸力系数的极小值,如图 9 所示. 由图可知,随着弧边凸起率的增大,建筑表面极值风吸力呈现先增大后减小的趋势,凸起率为 0 的 R1 极值风吸力最小,凸起率为 5% 的 R3 极值风吸力最大,相比最小值增大约 42%. 极值风吸力一般在圆角区域取得,这是由于来流在该区域发生流动分离产生的旋涡脱落更加剧烈. 综上所述,对圆角方形建筑截面进行弧边化处理可能会导致局部风压过大,如在工程设计中不考虑弧边化造成的影响,可能会导致围护结构风荷载被低估,进而造成结构的损坏.



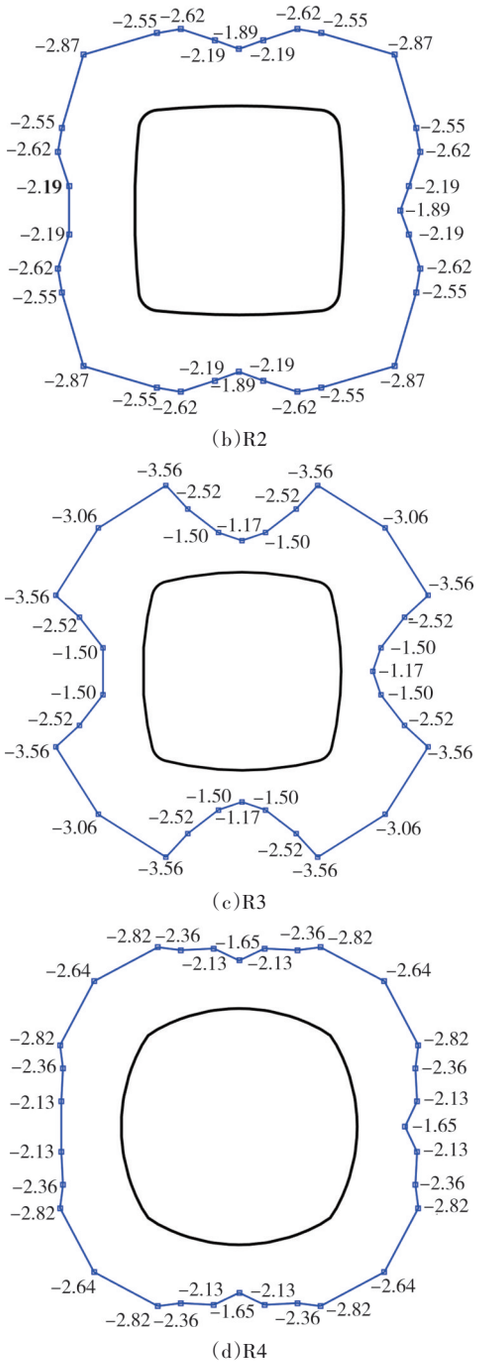


图9 基于风向角统计的各模型2/3高度处极值风吸力系数极小值

Fig.9 The minimum value of extreme wind suction coefficient at 2/3 height of each model based on wind direction angle statistics

3 气动力系数分析

各建筑模型表面的风压分布最终将反映主体结构的气动力特性.本节基于风洞测压试验结果,分别计算各模型顺风向与横风向的气动力系数.模型的平均阻力系数和脉动阻力系数、平均升力系数和脉动升力系数、顺风向平均基底弯矩系数和脉动基底弯矩系数、横风向脉动基底弯矩系数依次定义如下:

$$C_{\mathrm{D}}=\frac{F_{\mathrm{D}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}A} \tag{5}$$

$$\sigma_{\mathrm{D}}=\frac{\sigma_{F_{\mathrm{D}}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}A} \tag{6}$$

$$C_{\mathrm{L}}=\frac{F_{\mathrm{L}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}A} \tag{7}$$

$$\sigma_{\mathrm{L}}=\frac{\sigma_{F_{\mathrm{L}}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}A} \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{MD}}=\frac{M_{\mathrm{D}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}AH} \tag{9}$$

$$\sigma_{\mathrm{CMD}}=\frac{\sigma_{M_{\mathrm{D}}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}AH} \tag{10}$$

$$\sigma_{\mathrm{CML}}=\frac{\sigma_{M_{\mathrm{L}}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\mathrm{g}}^{2}AH} \tag{11}$$

式中:F_{D}、F_{L}分别为顺风向和横风向平均风力;$\sigma_{F_{\mathrm{D}}}$、$\sigma_{F_{\mathrm{L}}}$分别为顺风向和横风向风力均方根;M_{D}为顺风向基底弯矩均值;$\sigma_{M_{\mathrm{D}}}$、$\sigma_{M_{\mathrm{L}}}$分别为顺风向和横风向基底弯矩均方根;A表示结构对应的投影面积.未给出的横风向平均基底弯矩系数试验值接近零,不予讨论.

3.1 升力系数

图10为模型在不同风向角下的平均升力系数变化.由图可知,弧边凸起率的变化对平均升力系数的影响不大.模型的平均升力系数随风向角的变化规律相同,随着风向角的增大,其绝对值表现出先减小后增大的变化趋势,在风向角为20°时平均升力系数绝对值达到最大.

图11为模型在不同风向角下的脉动升力系数变化.由图可知,在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,模型R3与R4的脉动升力系数略大于R1、R2.同时脉动升力系数随风向角的变化不明显,整体上曲线较为稳定.

超高层建筑表面的风荷载分布与建筑主体结构的振动特性密切相关,对超高层建筑模型的升力系数时程进行了时频分析.图12为不同风向角下各模型升力功率谱,横坐标为折算频率,纵坐标为无量纲功率谱密度.由图可知,0°风向角下横风向风荷载功

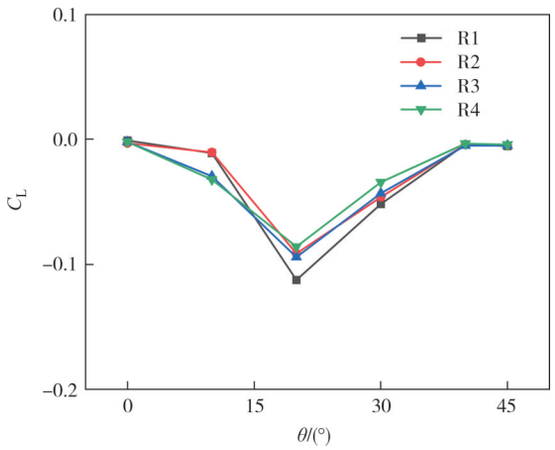


图 10　不同风向角下各模型平均升力系数

Fig.10　Average lift coefficient of each model under different wind direction angles

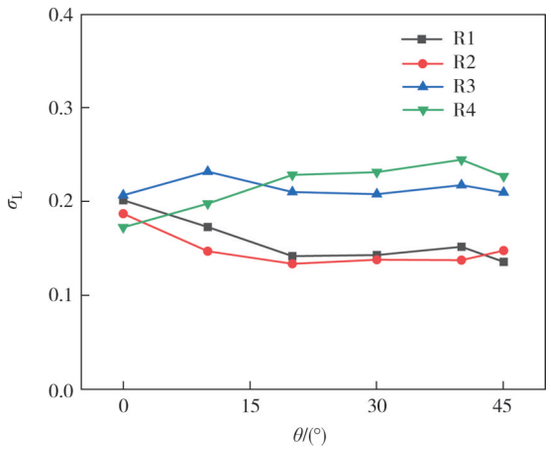


图 11　不同风向角下各模型脉动升力系数

Fig.11　Fluctuating lift coefficient of each model under different wind direction angles

率谱峰值带宽较大,随着弧边凸起率的增大,模型的功率谱峰值有逐渐减小的趋势,即旋涡脱落产生的能量减小. 在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,功率谱峰值变化不规律. 随着风向角的增大,各模型功率谱峰值逐渐增大,峰值带宽减小,逐渐呈窄带尖峰状,此时的旋涡脱落强度较大,文献[16]针对圆角率为25%的方形平截面建筑的研究也得到了类似的结论.

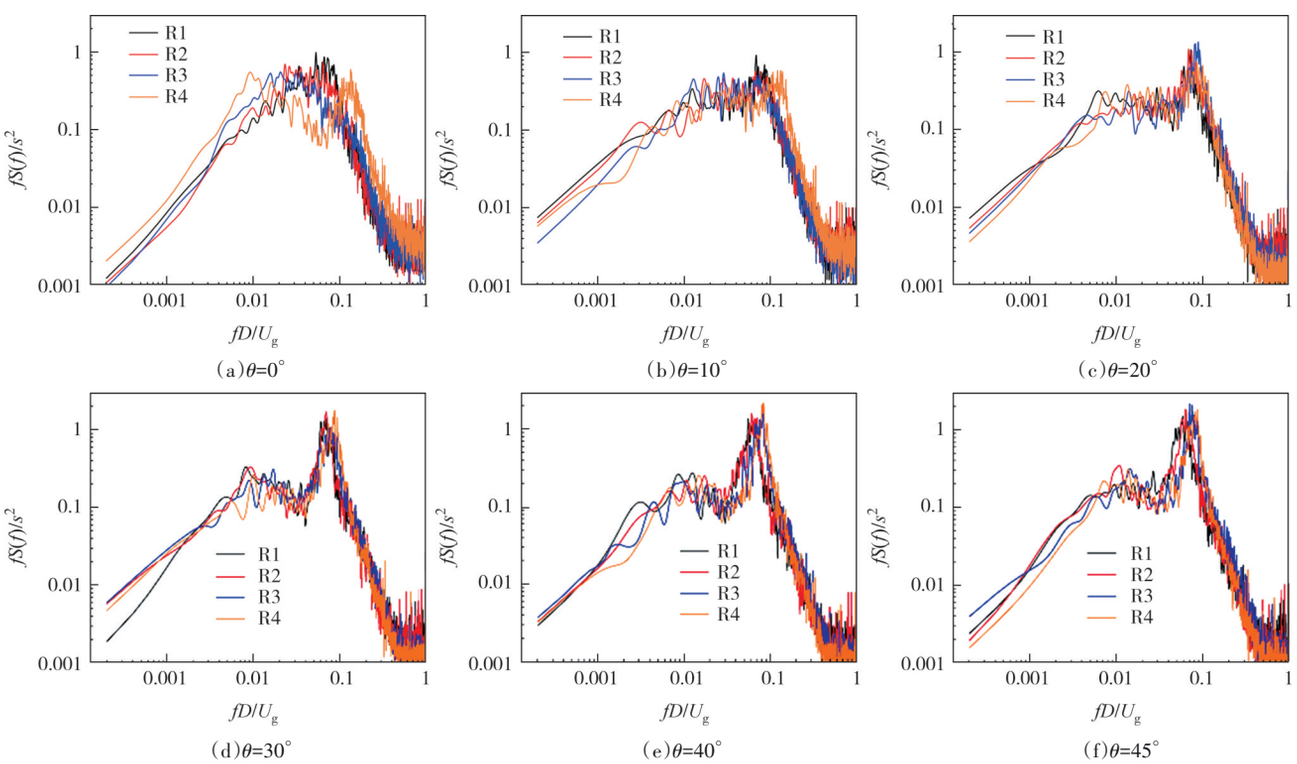


图 12　不同风向角下各模型升力功率谱

Fig.12　Lift power spectrum of each model under different wind direction angles

3.2　阻力系数

图 13 为不同风向角下各模型的平均阻力系数变化. 由图可知,在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,模型平均阻力系数整体逐渐减小,即凸边修正可以有效降低柱体的平均阻力系数. 各模型的平均阻力系数随风向角的增大而整体呈增大的变化趋势,R2模型的平均阻力系数随风向角变化最为剧烈,最大可增大51%;当风向角为40°时,不同模型间平均阻力系数极值的差值最大,最大可使阻力降低约25%.

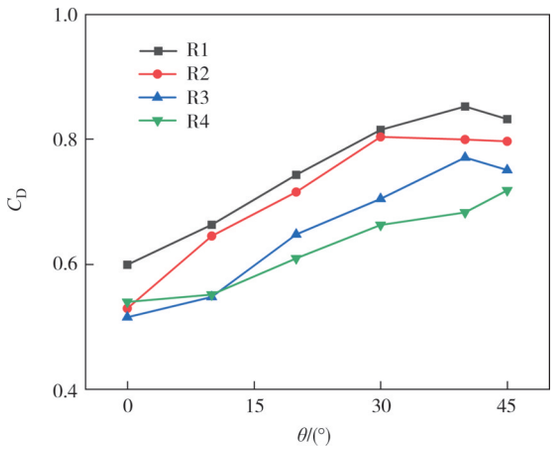


图 13 不同风向角下各模型平均阻力系数

Fig.13 Average resistance coefficient of each model under different wind direction angles

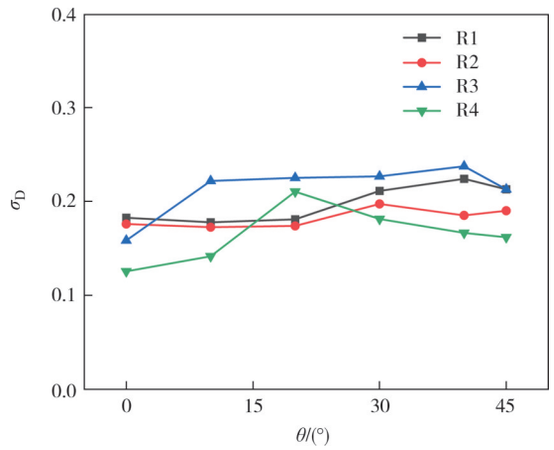


图 14 不同风向角下各模型脉动阻力系数

Fig.14 Fluctuating resistance coefficient of each model under different wind direction angles

图 14 为不同风向角下各模型的脉动阻力系数变化. 由图可知,在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,模型的脉动阻力系数整体相差不大. 风向角对于脉动阻力系数的影响规律并不明显.

图 15 为不同风向角下各模型阻力功率谱. 由图可知,阻力功率谱在频域内变化较平坦,峰值带宽较大. 0°风向角下,不同弧边凸起率模型的阻力功率谱曲线的形状差别不大,随着弧边凸起率的增大,高频段能量增大,说明弧边凸起率较大的建筑顺风向脉动风荷载的高频能量更大. 在所测风向角范围内,曲线没有明显变化,功率谱高频段的能量始终随弧边凸起率的增大而增大,低频段的能量变化不规律.

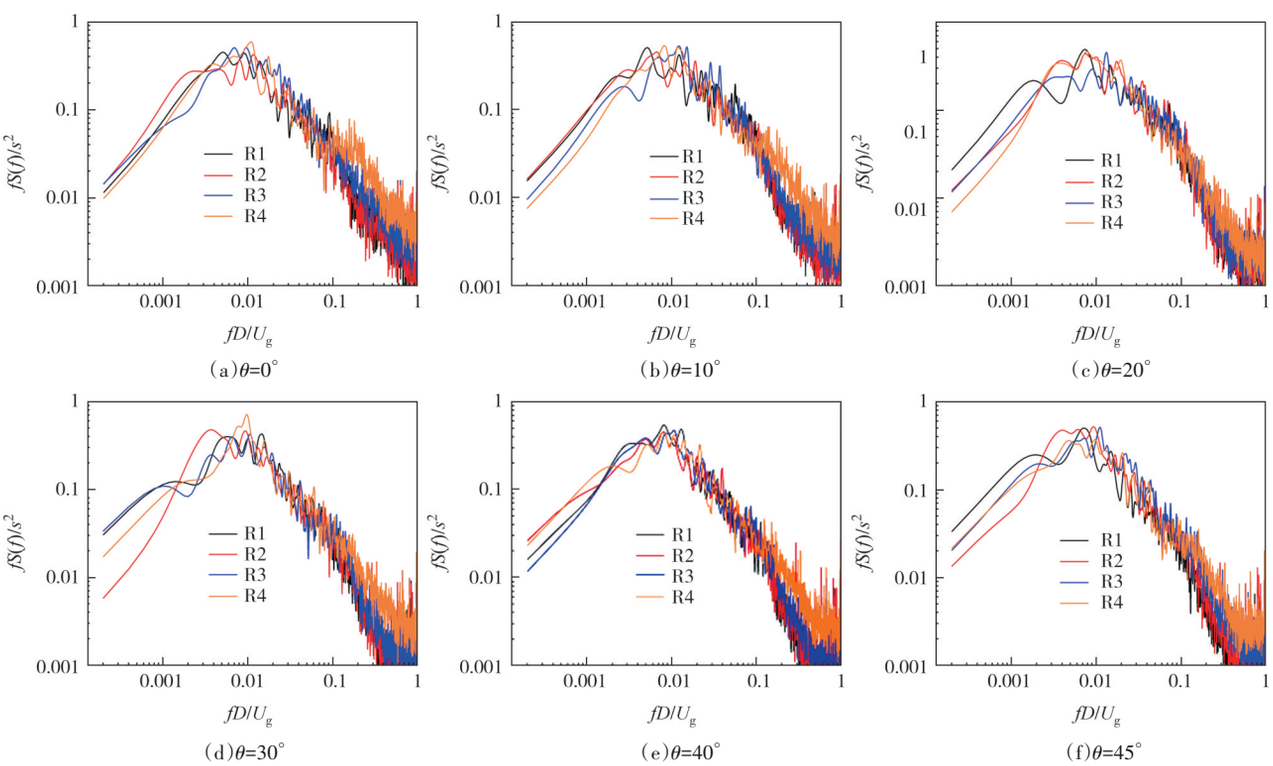


图 15 不同风向角下各模型阻力功率谱

Fig.15 Resistance power spectrum of each model under different wind direction angles

3.3 顺风向基底弯矩系数

文献[27]通过风洞试验对与模型 R1 相似截面尺寸的高层建筑进行了研究,模型高宽比为 8∶1,其基底弯矩系数变化趋势与本文基本一致. 图 16 为不

同风向角下各模型顺风向平均基底弯矩系数.由图可知,在所测风向角范围内,顺风向平均基底弯矩系数变化范围为0.25~0.50,其变化趋势与平均阻力系数相似,且最大可使平均基底弯矩降低28%,即凸边修正也可以有效降低柱体的顺风向平均基底弯矩.各模型的平均阻力系数与顺风向平均基底弯矩系数均随风向角的增大而整体呈增大的变化趋势,40°风向角下整体上取得最大值.

图17为不同风向角下各模型顺风向脉动基底弯矩系数变化.由图可知,各模型顺风向脉动基底弯矩系数整体在0.08~0.12之间,曲线波动并不明显,模型R3与R4在0°风向角时脉动基底弯矩系数较小.

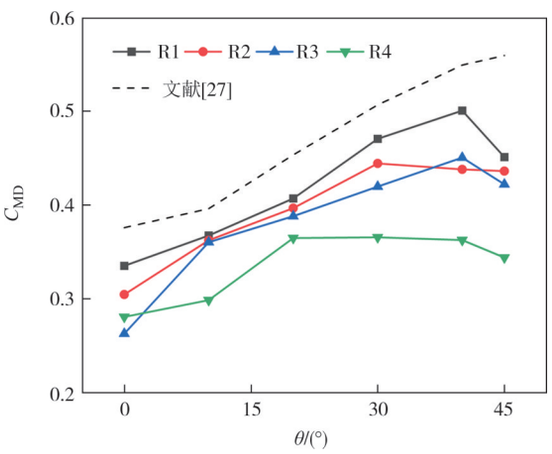


图16　不同风向角下各模型顺风向平均基底弯矩系数

Fig.16　Along-wind average base bending moment coefficient of each model under different wind direction angles

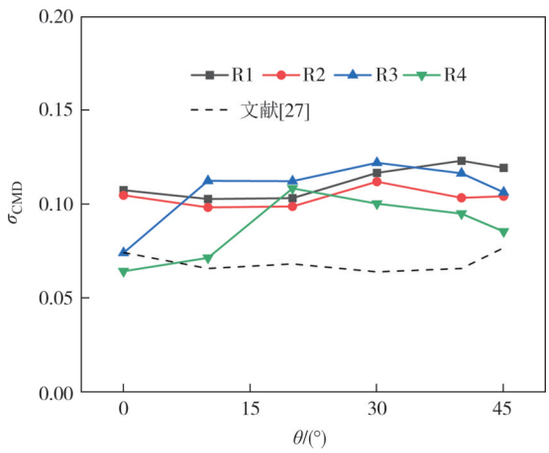


图17　不同风向角下各模型顺风向脉动基底弯矩系数

Fig.17　Along-wind fluctuating base bending moment coefficients of each model under different wind direction angles

图18为不同风向角下各模型顺风向基底弯矩功率谱.如图所示,由于高层建筑的顺风向力主要受来流湍流的影响,四个模型的顺风向基底弯矩的功率谱都较为平缓.在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,频率大于0.1时能量有增大的趋势.

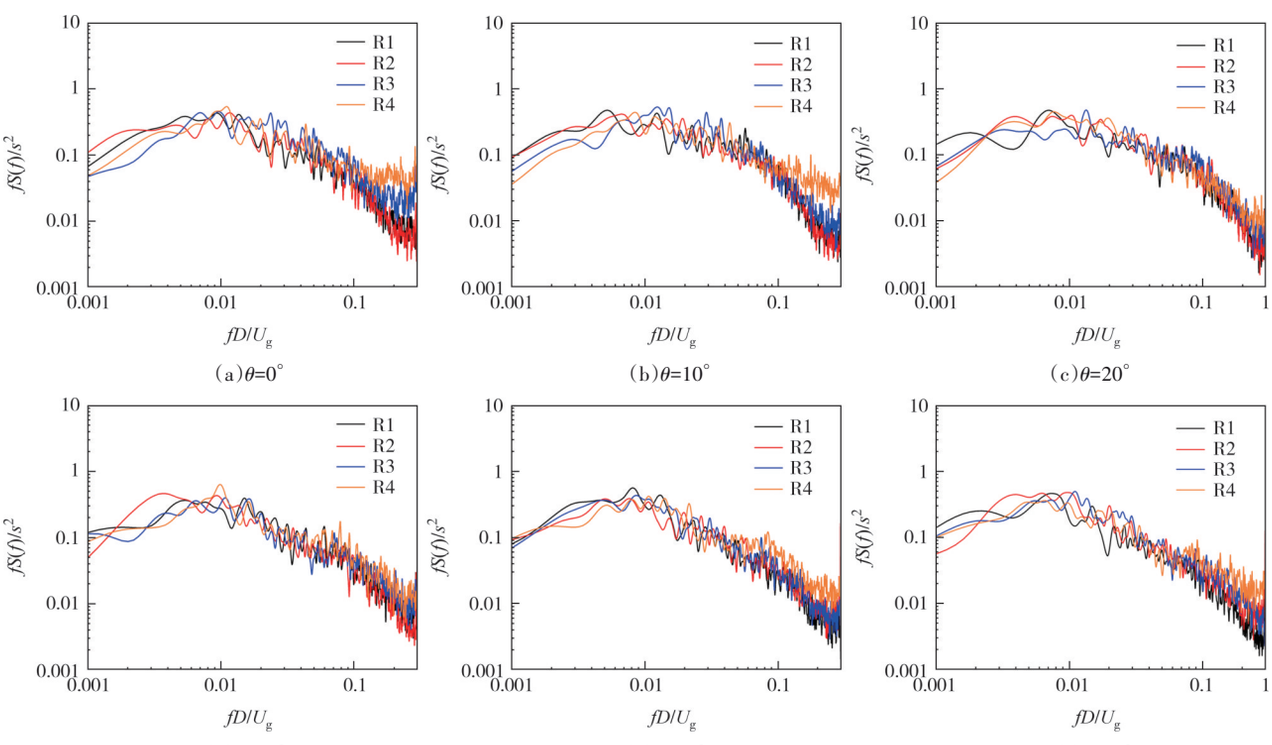


图18　不同风向角下各模型顺风向基底弯矩功率谱

Fig.18　Power spectrum of along-wind base bending moment of each model under different wind direction angles

3.4 横风向基底弯矩系数

图 19 为不同风向角下各模型横风向脉动基底弯矩系数变化. 由图可知,在所测风向角范围内,横风向脉动基底弯矩系数变化范围为 0.06~0.13,模型 R3 与 R4 的脉动基底弯矩整体上大于 R1 与 R2. 随着风向角的增大,R1 与 R2 脉动基底弯矩系数逐渐减小,而 R3 与 R4 会先增大,分别在 10°和 20°时出现峰值后再减小.

图 20 为不同风向角下各模型横风向基底弯矩功率谱. 如图所示,随着风向角的增大,横风向功率谱上会出现一个尖锐的峰值,其频率接近斯托罗哈数 0.1. 在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,0°与 10°风向角时,旋涡脱落的强度得到了抑制,而 20°~45°风向角时,其峰值有增大的趋势,这反映了凸边化的气动处理方式对于横风向的作用力既有有利影响也有不利影响.

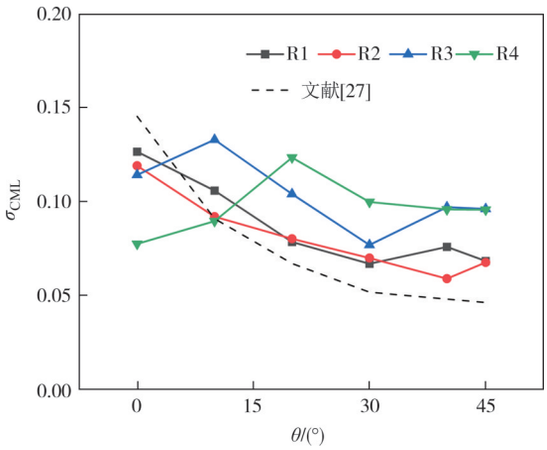


图 19 不同风向角下各模型横风向脉动基底弯矩系数

Fig.19 Across-wind fluctuating base bending moment coefficient of each model under different wind direction angles

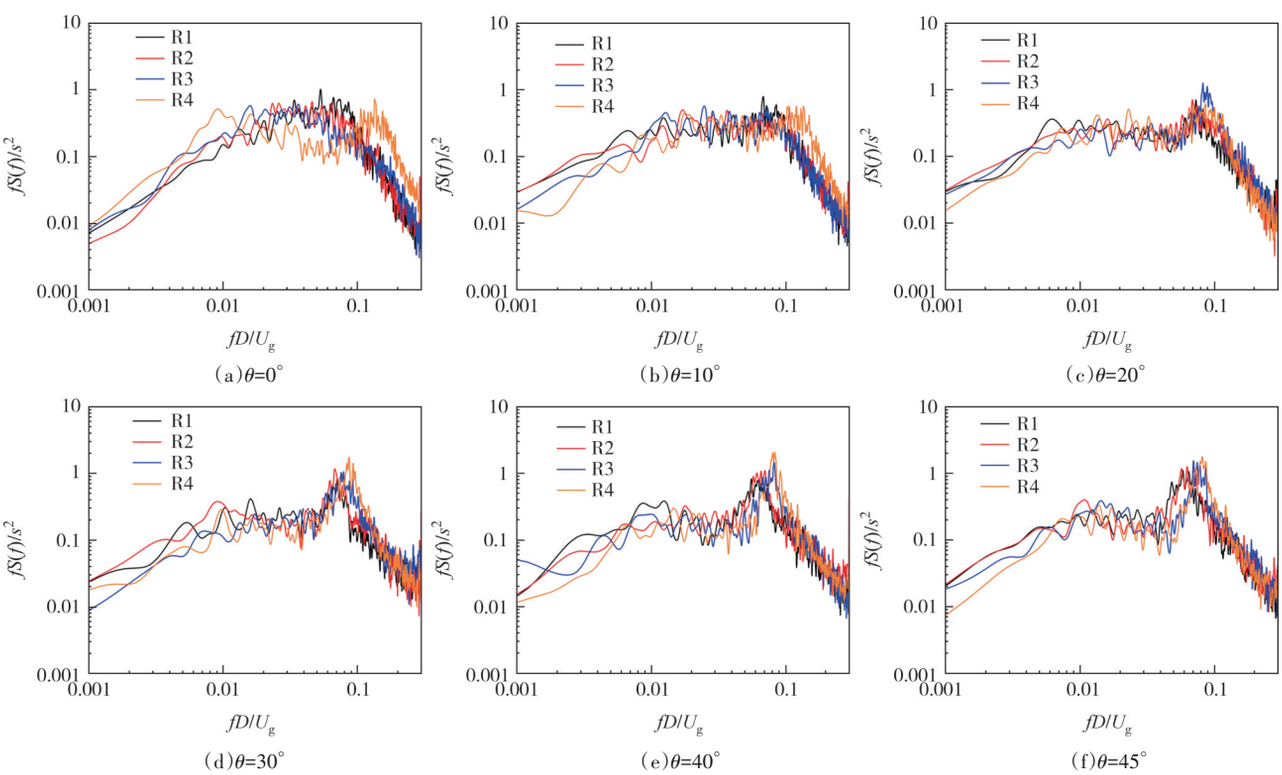


图 20 不同风向角下各模型横风向基底弯矩功率谱

Fig.20 Power spectrum of across-wind base bending moment of each model under different wind direction angles

4 结 论

通过刚性模型风洞测压试验,对比了不同平截面弧边凸起率的超高层建筑表面风压特性、升阻力系数以及基底弯矩系数等,所得主要结论如下:

1) 在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,弧边模型建筑表面风压背风面 *CD* 与侧风面 *AD* 的平均风压系数整体上越接近于直边模型,而迎风面 *AB* 与侧风面 *BC* 变化不规律,综合分析平均风压、脉动风压以及极值风压,直边模型整体小于弧边模型,且极值风吸力相较于直边模型最大增大 42%,说明该圆角率下建筑平截面弧边化对于降低结构局部风荷载是不利的,会导致局部风压过大.

2) 在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,平均升力系数受凸起率的影响不明显,脉动升力系数与横风向脉动基底弯矩整体上有增大的趋势,功率谱峰值变化不规律,凸边修正对于横风向力的影响较为复杂.随着风向角的增大,旋涡脱落强度增大,曲线呈窄带尖峰状,表明涡脱较为规律.

3) 在所测风向角范围内,随着弧边凸起率的增大,脉动阻力系数和顺风向脉动基底弯矩系数变化规律不明显,平均阻力系数以及顺风向平均基底弯矩系数逐渐减小,表明凸边修正可以有效降低柱体的整体阻力以及顺风向基底弯矩,有利于减小顺风向作用力.功率谱曲线没有明显谱峰,随着风向角的增大,曲线没有明显变化,表明高层建筑的顺风向力仍主要受来流影响.

参考文献

[1] IRWIN P A. Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7/8): 328-334.

[2] PREM K. A state of the art in wind engineering: ninth international conference on wind engineering 1995[C]//New Age International Publishers: Wiley Eastern, 1994.

[3] HOLMES J. Wind loading of structures[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

[4] IRWIN P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 701-712.

[5] 张相庭. 结构风工程: 理论·规范·实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
ZHANG X T. Structural wind engineering: theory, specification and practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.(in Chinese)

[6] 黄剑, 顾明. 超高层建筑风荷载和效应控制的研究及应用进展[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 167-174.
HUANG J, GU M. Control of wind loading and effects of super-tall buildings: state of the art[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(10): 167-174.(in Chinese)

[7] SHIRAISHI N, MATSUMOTO M, SHIRATO H, et al. On aerodynamic stability effects for bluff rectangular cylinders by their corner-cut[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 28(1/2/3): 371-380.

[8] GU M, QUAN Y. Across-wind loads of typical tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1147-1165.

[9] LIN N, LETCHFORD C, TAMURA Y, et al. Characteristics of wind forces acting on tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(3): 217-242.

[10] KAREEM A, KIJEWSKI T, TAMURA Y. Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications[J]. Wind and Structures, 1999, 2(3): 201-251.

[11] TAMURA T, MIYAGI T, KITAGISHI T. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 531-542.

[12] KAWAI H. Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 719-729.

[13] 庄翔, 郑毅敏, 郑晓芬, 等. 不同圆角率下矩形高层建筑风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊1): 1-8.
ZHUANG X, ZHENG Y M, ZHENG X F, et al. Wind load characteristics of rectangular high-rise buildings with various rounded corner ratios[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Sup.1): 1-8.(in Chinese)

[14] 顾明, 张正维, 全涌. 降低超高层建筑横风向响应气动措施研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 317-323.
GU M, ZHANG Z W, QUAN Y. Aerodynamic measures for mitigation of across-wind responses of super tall buildings: state of the art[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(3): 317-323.(in Chinese)

[15] 董欣, 丁洁民, 邹云峰, 等. 倒角化处理对于矩形高层建筑风荷载特性的影响机理研究[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 151-162.
DONG X, DING J M, ZOU Y F, et al. Effect of rounded corners on wind load characteristics of rectangular tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 151-162.(in Chinese)

[16] 李秋胜, 周亚萍, 李建成, 等. 圆角化方形截面高层建筑风荷载特性试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(4): 7-16.
LI Q S, ZHOU Y P, LI J C, et al. Experiment on characteristics of wind loads of high-rise building with rounded square section[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 7-16.(in Chinese)

[17] CARASSALE L, FREDA A, MARRÈ-BRUNENGHI M. Experimental investigation on the aerodynamic behavior of square cylinders with rounded corners [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 44: 195-204.

[18] TAMURA T, MIYAGI T. The effect of turbulence on aerodynamic

forces on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 135-145.

[19] ELSHAER A, BITSUAMLAK G, DAMATTY A E. Wind load reductions due to building corner modifications [C]//Annual Conference of the CFD Society of Canada, Toronto, Canada, the CFD Society of Canada, 2014.

[20] AMBREEN T, KIM M H. Flow and heat transfer characteristics over a square cylinder with corner modifications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 50-57.

[21] MIRAN S, SOHN C H. Influence of incidence angle on the aerodynamic characteristics of square cylinders with rounded corners[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2016, 26(1): 269-283.

[22] 杜晓庆, 刘延泰, 董浩天, 等. 类方柱的气动性能和流场特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 88-98.
DU X Q, LIU Y T, DONG H T, et al. Aerodynamic performance and flow feature of square cylinders with cross-section modification[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5): 88-98. (in Chinese)

[23] 杜晓庆, 刘延泰, 施定军, 等. 低雷诺数下类方柱绕流的数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 49-57.
DU X Q, LIU Y T, SHI D J, et al. Numerical simulation on flow around analogous square cylinders at low Reynolds number[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(5): 49-57. (in Chinese)

[24] 杜晓庆, 田新新, 马文勇, 等. 圆角化对方柱气动性能影响的流场机理[J]. 力学学报, 2018, 50(5): 1013-1023.
DU X Q, TIAN X X, MA W Y, et al. Effects of rounded corner on aerodynamics of square cylinders and its flow mechanisms [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(5): 1013-1023. (in Chinese)

[25] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[26] Wind tunnel studies of buildings and structures [M]. Reston: American Society of Civil Engineers, 1999.

[27] LI Y, TIAN X, TEE K F, et al. Aerodynamic treatments for reduction of wind loads on high-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 172: 107-115.