

# 串列圆角弧边三角形双塔建筑气动干扰效应\*

丁 通, 陈水福

(浙江大学建筑工程学院 杭州, 310058)

**摘要** 对圆角弧边三角形双塔建筑在串列布置时的气动力进行了风洞试验研究,分析了不同排布方式和相对间距对受扰建筑层阻力系数、层升力系数以及基底弯矩系数功率谱密度的影响。试验结果表明:平均层阻力和升力系数的干扰效应主要表现为遮挡效应,当施扰建筑弧面迎风时相对更强;平均层阻力系数随间距比减小而减小,当双塔均关于来流方向对称时,平均层升力系数接近 0,此时间距影响很小;顶部绕流会减弱遮挡作用,使得顶部附近的平均和脉动层风力系数相对增大;施扰建筑弧面迎风时脱落在尾流的漩涡将显著影响受扰建筑,大幅增强小间距比时受扰建筑的脉动风荷载,并使其横风向基底弯矩系数功率谱的峰值频率受控于尾流漩涡脱落频率。

**关键词** 高层建筑;干扰效应;风洞试验;串列;三角形截面  
**中图分类号** TU312<sup>+</sup>.1;TU971;TH113

## 引 言

城市化进程的加速与土地资源的稀缺促使高层建筑常以多塔或集群的方式出现,其中双塔布置是一种较常见的排布形式。研究表明,双塔干扰效应会导致受扰建筑的风荷载分布特性相较于单塔情况产生显著改变。文献[1-2]对群体高层建筑风致干扰效应研究成果进行了综述,列举了多个因素对干扰效应的影响规律。文献[3-4]研究了受扰建筑层风力沿高度的变化情况,并给出并列和串列时的顺风向平均层风力干扰因子以及横风向脉动层风力系数沿高度分布的拟合公式。马文勇等<sup>[5]</sup>揭示了两方形高层建筑风致干扰效应的干扰机理。杨群等<sup>[6]</sup>对串列三圆柱绕流的时均压力分布与气动力进行了研究,发现该绕流存在 2 种完全不同的流态。文献[7-8]研究了不同施扰建筑高度对受扰建筑层风力的影响,发现当两建筑串列时,其高度比越大,对层平均阻力系数的遮挡效应越显著,而对层平均升力系数影响甚微,高度比对层脉动三分力系数的影响规律则较为复杂。文献[9-13]研究了 6 种宽度比和 4 种高度比对不同排布的双塔受扰方形建筑风压分布、扭矩响应和顺风向加速度的影响,结果显示:平均风压一般由于遮挡效应而减小,而靠近施扰建筑的侧风面峰值风压通常会增大,且随着宽度比和高度比增大这一规律更为显著;不同情况下建筑顶部

加速度和基底荷载响应的涡激共振干扰机理一致;宽度比较小时,扭转干扰因子包络值和顺风向峰值加速度干扰因子包络值会因为涡激共振而明显增大。Yan 等<sup>[14]</sup>研究了外形优化后的复杂截面双塔干扰效应,发现串列时受扰建筑顺风向和横风向脉动风荷载在部分间距比时大幅增大,迎风面角部峰值正风压也会由于尾流激振而显著增大。Hui 等<sup>[15]</sup>研究了高度相同但截面宽度不同的两个建筑之间的扭矩干扰效应,结果表明,当横截面宽度比为 3 时,干扰作用下的平均扭矩是单体建筑的 3 倍,而峰值扭矩是单体建筑的 1.8 倍。Kim 等<sup>[16]</sup>研究了不同高宽比对受扰建筑层风力的影响,发现较高和较宽的邻近建筑会使受扰建筑产生更高的平均和脉动层风力,但不同高宽比的邻近建筑的临界位置有所不同。文献[17-19]研究了同为圆角弧边三角形截面的广州东塔对西塔的干扰效应,结果显示,该效应主要体现为西塔顶部峰值加速度大幅增大。陈强等<sup>[20]</sup>基于实际工程项目,研究了圆角弧边三角形截面高层建筑双塔干扰效应,发现双塔串列时,施扰建筑脱落的漩涡增强了来流脉动性,导致受扰建筑顺风向和横风向的峰值加速度明显增大。

上述研究均基于特定工程案例,所涉及的干扰效应仅为给定双塔间距和排布方式的情况。鉴于此,笔者采用刚性模型同步测压风洞试验方法,针对圆角弧边三角形高层建筑,系统研究 6 种排布方式

\* 国家自然科学基金资助项目(51878607)

收稿日期:2020-10-13;修回日期:2021-02-22

和 6 种双塔间距对串联布置受扰建筑层阻力系数、层升力系数分布规律以及基底弯矩系数频谱特性的影响,得出了一些有普遍意义的干扰规律,为同类高层建筑的抗风设计提供理论依据。

### 1 风洞试验简介

试验在浙江大学 ZD-1 大气边界层风洞中进行,阻塞比约为 1.7%,满足试验要求。鉴于双塔超高层建筑多处于有密集高层建筑群的城市核心区,试验模拟了我国现行规范规定的 D 类地貌的风剖面,如图 1 所示,其中: $U$  为平均风速; $I_u$  为湍流度; $z$  为测试点高度。此次试验参考风速  $U_{ref} = 10.8 \text{ m/s}$ ,测点采样频率  $f = 312.5 \text{ Hz}$ ,采样长度为 10 000 次。

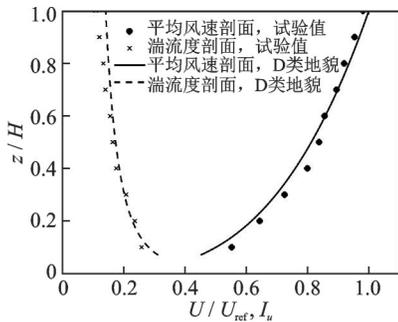


图 1 风剖面模拟

Fig.1 Simulation of wind-field profiles

试验模型为外形相同的施扰和受扰建筑模型,模型几何缩尺比为 1:300;原型建筑横截面边长  $B = 60 \text{ m}$ ,高度  $H = 300 \text{ m}$ 。为研究建筑布局对串联布置双塔干扰效应的影响,同时考虑到其在工程实际中的应用,设置了 6 种典型排布工况,如图 2 所示。其中:阴影三角形为受扰建筑;白色三角形为施扰建筑。每个建筑的 3 个角中有 2 个角的连线是竖直或者水平的,这里用 L(左),R(右)和 U(上)表示第 3 个角的朝向,例如 L-R 排布表示受扰和施扰建筑的第 3 个圆角分别是朝左和朝右。

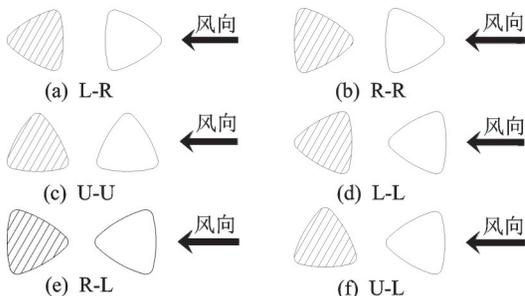


图 2 双塔排布工况

Fig.2 Twin tower arrangement

每种排布方式各考虑了 6 种相对间距,间距比  $X/B$  分别为 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 和 6.0。其中: $X$  为施扰建筑和受扰建筑的中点距离; $B$  为横截面的边长。

受扰模型沿高度设置了 11 个测点层,并在原型建筑高度 100, 200 和 300 m 附近对测点层加密,以便获得更准确的风荷载分布特性,每个测点层布置 27 个测点。测点层及测点布置如图 3 所示。

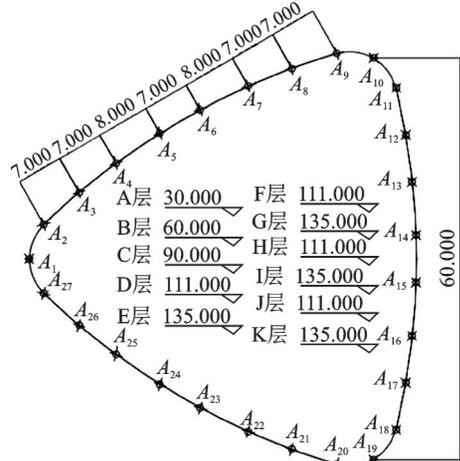


图 3 测点层及测点布置(单位:m)

Fig.3 Measuring point layers and layout of measuring points (unit:m)

### 2 试验结果分析

为掌握不同排布方式受扰建筑气动力沿高度分布规律及其整体作用效果,通过处理试验数据获得了受扰建筑顺风向和横风向的层阻力系数、层升力系数以及基底弯矩系数功率谱密度。

风力正方向定义如图 4 所示,其中: $C_D$  和  $C_L$  分别为阻力系数和升力系数; $C_{MD}$  和  $C_{ML}$  分别为顺风向和横风向基底弯矩系数。

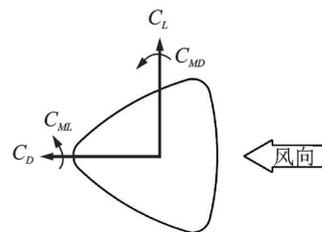


图 4 风力正方向定义

Fig.4 Direction of wind force

对建筑测点层的测点风压根据其控制面积进行积分,再沿不同方向分解,可得到各测点层的顺风向和横风向层风力;对层风力沿高度积分可进一步求得顺风向和横风向基底弯矩。平均和脉动层阻力系数、平均和脉动层升力系数以及顺风向和横风向基

底弯矩系数分别定义为

$$\begin{cases} C_D(z_i) = F_D(z_i)/A(z_i)P_{ref} \\ C'_D(z_i) = \sigma_D(z_i)/A(z_i)P_{ref} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_L(z_i) = F_L(z_i)/A(z_i)P_{ref} \\ C'_L(z_i) = \sigma_L(z_i)/A(z_i)P_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_{MD} = M_D/AHP_{ref} \\ C_{ML} = M_L/AHP_{ref} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $z_i$ 为第*i*个测点层的高度; $F_D(z_i), F_L(z_i)$ 分别为顺风向和横风向层平均风力; $\sigma_D(z_i), \sigma_L(z_i)$ 分别为顺风向和横风向层风力均方根; $A(z_i), A$ 分别为各层和整体迎风面面积; $P_{ref}$ 为建筑顶部处的参考风压。

### 2.1 阻力系数

图 5,6 分别为 6 种排布方式下平均层阻力系数和脉动层阻力系数沿高度的变化曲线,纵坐标  $z/H$  表示相对高度。单体建筑表示每种双塔排布方式对应的无干扰情况。

由图 5 可以看出,顺风向静力干扰效应主要表现为遮挡效应。6 种排布方式下,平均层阻力系数均随着间距比减小而减小,表明遮挡效应随间距比减小而增强。当  $X/B \geq 4.0$  时,在受扰建筑  $0.7H$  以下平均层阻力系数沿高度变化较小,顺风向风荷载较为均匀。间距比减小时,平均层阻力系数沿高度变化幅度增大。例如:当  $X/B=2.0$  时,除 U-U 排布外,受扰建筑中部开始受到吸力;当  $X/B=1.5$  时,层阻力系数在受扰建筑中部均减小为负值,个别排布

方式下甚至达到  $-0.3$ 。在受扰建筑  $0.7H$  以上,由于顶部绕流,6 种排布方式下施扰建筑的遮挡作用减小,受扰建筑平均层阻力系数均逐渐增大直至顶部。根据文献[3],正方形截面双塔超高层建筑遮挡效应同样随间距比减小而增强,但当  $X/B=2.0$  时,正方形截面受扰建筑在  $0.8H$  以下部分均承受吸力。

为分析施扰建筑迎风方式对干扰效应的影响,分别比较图 5(a)和 5(d)、图 5(b)和 5(e),即施扰建筑分别处于圆角迎风和弧面迎风的情况。结果显示:当  $X/B \geq 3.0$  时,受扰建筑平均层阻力系数在  $0.7H$  以下较为接近,而在  $0.7H$  以上差异较大;施扰建筑弧面迎风时的平均层阻力系数相对较小,表明施扰建筑弧面迎风相比圆角迎风对顶部绕流的阻挡效果更强。图 5(c)和 5(f)中受扰建筑处于不对称迎风状态,而施扰建筑分别处于不对称迎风和弧面迎风状态。对比发现,施扰建筑不对称迎风情况下,受扰建筑平均层阻力系数当  $X/B \geq 3.0$  时从底部起更接近于单体无干扰情况,当  $X/B=2.0$  时未出现负值,当  $X/B=1.5$  时建筑中部负值相对较小,说明施扰建筑弧面迎风时的遮挡效应相比不对称迎风时更强。总体而言,施扰建筑弧面迎风时对平均层阻力系数的遮挡效应相比非弧面迎风时更强。

根据图 6(a)~(c),对于脉动层阻力系数,L-R 排布时在中下部明显小于单体无干扰情况,在建筑底部随着间距比减小而减小,在顶部当间距比较大时则超过单体情况;R-R 排布时在建筑下部也相对

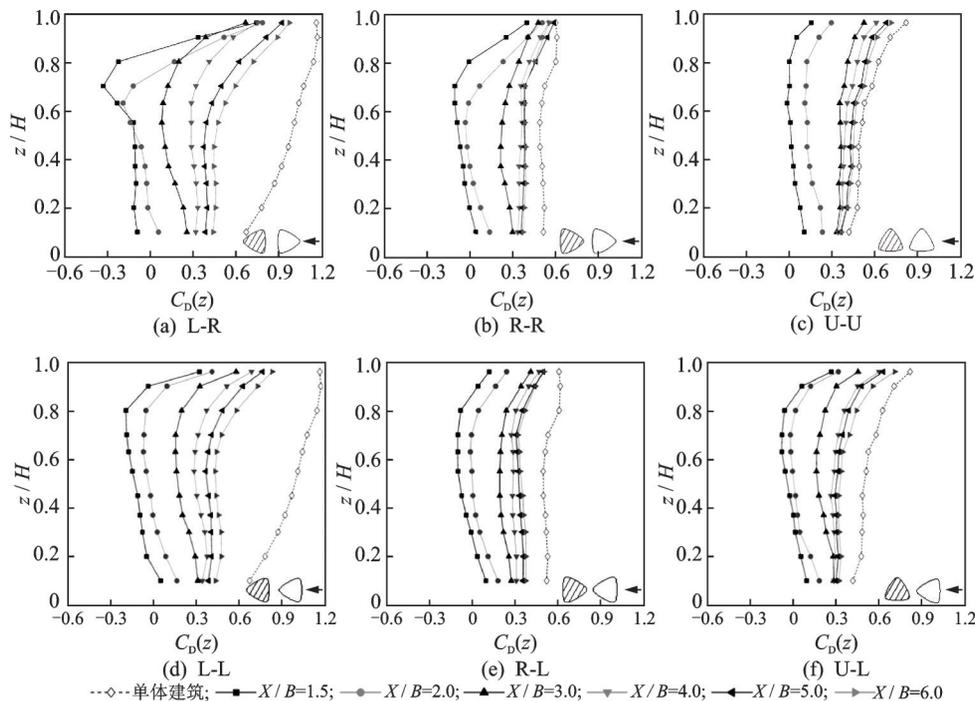


图 5 平均层阻力系数

Fig.5 Mean layer drag coefficients

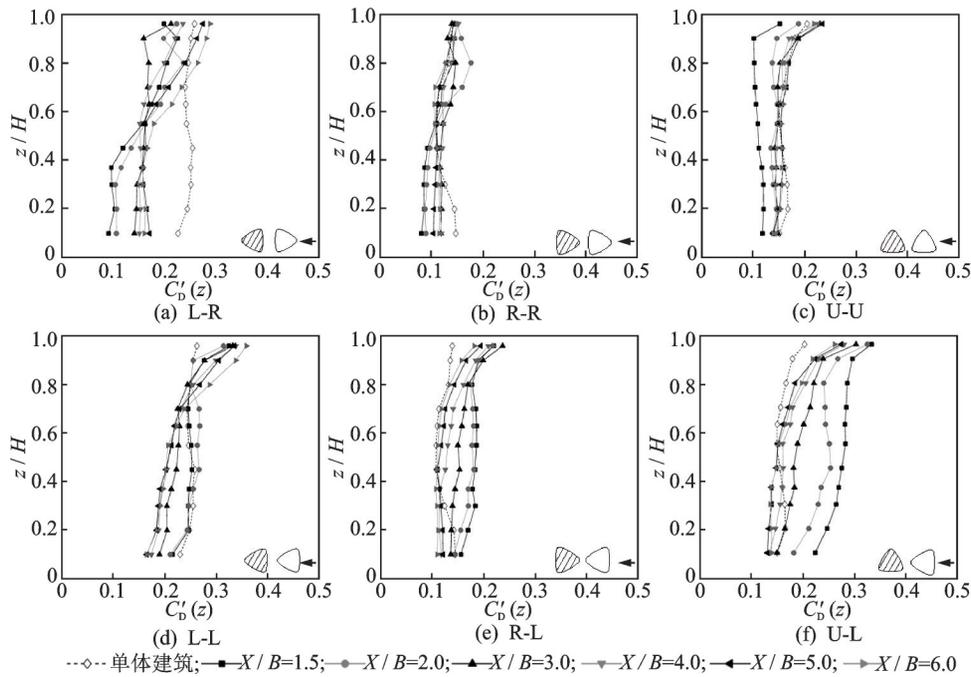


图6 脉动层阻力系数

Fig.6 Fluctuating layer drag coefficients

较小,且小间距比情况下明显更小,在中上部多种间距比情况下和单体情况接近;U-U排布下当 $X/B=1.5$ 时最小,当 $X/B=2.0$ 时在建筑顶部和下部较小,其余情况则接近于单体情况。这是因为:对于这3种排布方式,受扰建筑脉动层阻力系数在遮挡效应以及前方建筑对来流湍流度的增强效应的共同影响下,在建筑中下部小于或接近于单体情况;而在建筑顶部由于绕流导致遮挡作用明显减弱,间距比较大时甚至超过单体情况。

当施扰建筑弧面迎风时,如图6(d)~(f)所示,受扰建筑脉动层阻力系数明显大于施扰建筑非弧面迎风时的情况,R-L排布和U-L排布下超过单体情况。同时,受扰建筑脉动层阻力系数在 $0.7H$ 以下呈现出随间距比减小而增大的规律。这是因为:前方施扰建筑弧面迎风时脱落在尾流的漩涡击打于受扰建筑表面,在间距比较小时漩涡能量较为集中,随着间距增加,漩涡能量逐渐耗散;在受扰建筑顶部,由于顶部绕流导致遮挡作用减小,间距比较大时的受扰建筑脉动层阻力系数迅速增大。

## 2.2 升力系数

图7,8分别为平均和脉动层升力系数沿高度的变化曲线。由图7(a)~(e)可见,当双塔均关于来流方向对称时,各种间距比下受扰建筑平均层升力系数基本在0附近,双塔建筑间距的干扰影响较小,少数间距比受扰建筑顶部附近的平均层升力系数略微

偏离0。根据文献[4],串列正方形截面双塔超高层建筑不同间距比时的平均层升力系数仍基本为0,干扰规律相似。根据图7(c,f),单体建筑不对称迎风时,平均层升力系数非0,且随高度增加先增大后减小。双塔串列时受扰建筑平均层升力系数在遮挡作用影响下,随间距比减小而减小。当 $X/B \leq 2.0$ 时接近0;当 $X/B \geq 3.0$ 时,受扰建筑中部的系数在施扰建筑弧面迎风时明显较小。在 $0.7H$ 以上,各间距比系数曲线沿高度产生增大的趋势,虽然在顶层位置当间距比较大时略微减小,但考虑到单体建筑顶层位置系数大幅减小,可知受扰建筑在 $0.7H$ 以上的平均层升力系数分布规律与平均层阻力系数类似。由于顶部绕流,施扰建筑对平均层升力系数的遮挡作用在顶部有所减小。

由图8(a,d)可知:单体建筑弧面迎风时出现最强的漩涡脱落,导致脉动层升力系数相对较大;而在双塔L-R和L-L排布中,当 $X/B=1.5$ 时,受扰建筑脉动层升力系数在底部最小,并沿高度变化幅度较大;当 $X/B \geq 2.0$ 时,施扰建筑遮挡作用占主导,受扰建筑脉动层升力系数均随间距比减小而减小;在建筑顶部,由于顶部绕流导致遮挡作用减弱,脉动层升力系数与单体系数的比值逐渐增大。相比之下,由于施扰建筑弧面迎风时产生的漩涡脱落增强了来流脉动性,L-L排布受扰建筑脉动层升力系数明显增大。其余排布方式下具有类似的规律:R-R排布和U-U排布中,脉动层升力系数当 $X/B \leq$

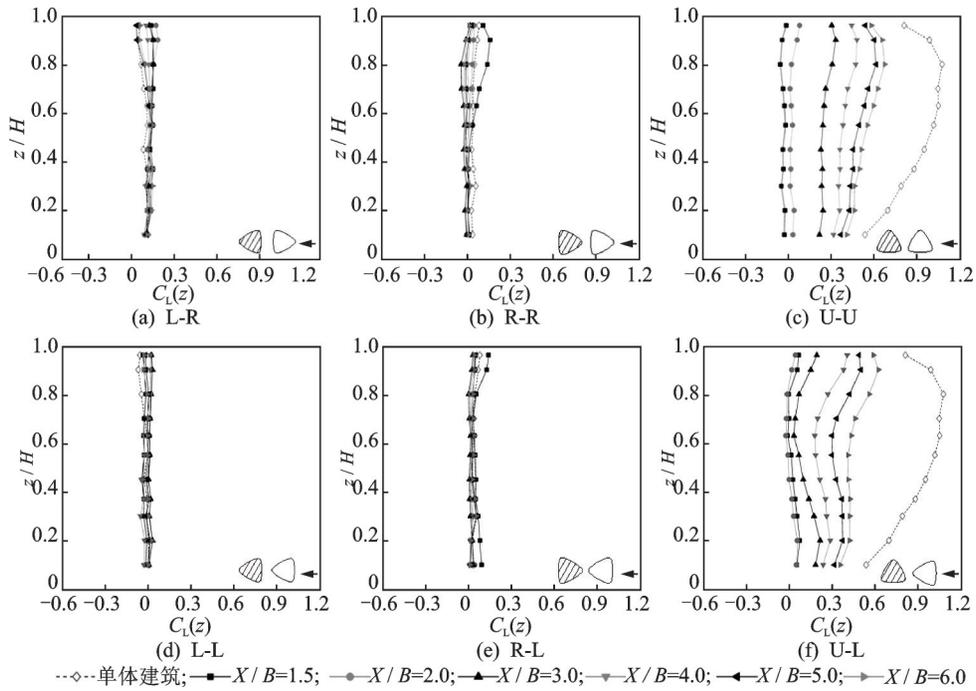


图 7 平均层升力系数

Fig.7 Mean layer lift coefficients

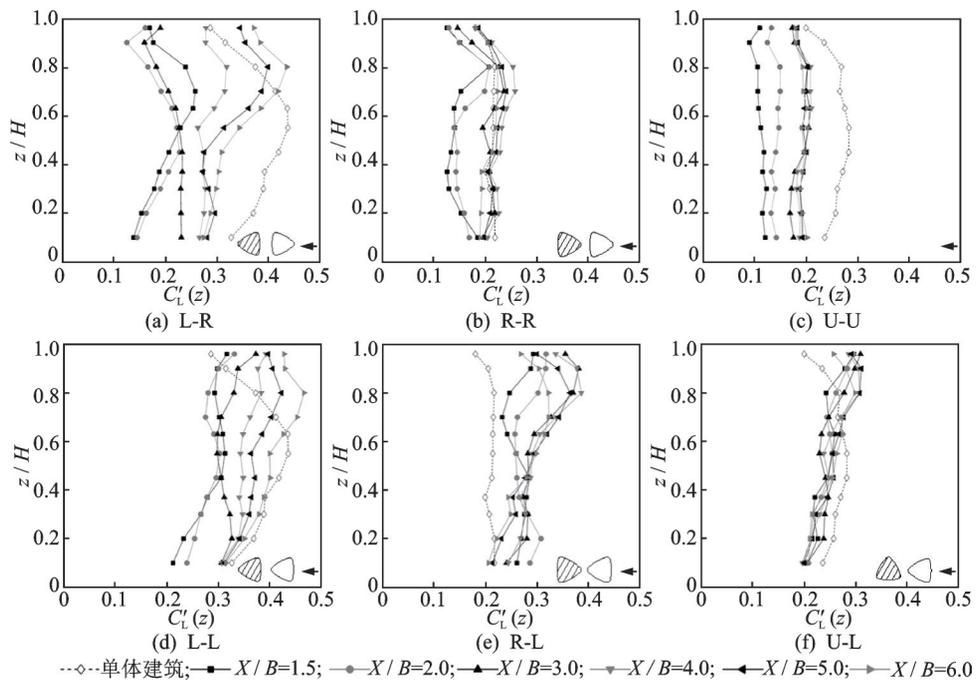


图 8 脉动层升力系数

Fig.8 Fluctuating layer lift coefficients

2.0时明显较小,间距比增大时在弱遮挡作用以及前方建筑增大来流湍流度的共同影响下有所增大;当施扰建筑变为弧面迎风时,所产生的漩涡脱落极大地增强了来流脉动性,导致脉动层升力系数明显增大。

### 2.3 基底弯矩系数功率谱密度

图 9 为 6 种排布方式下不同间距比受扰建筑顺

风向基底弯矩系数功率谱密度变化曲线,横坐标  $f_B/U_H$  为折算频率,纵坐标  $fS_{CMD}$  为无量纲的顺风向基底弯矩系数功率谱密度。L-R 排布下,不同间距比情况下的顺风向基底弯矩系数功率谱密度均小于单体建筑。在低频范围内,随着间距比减小,在遮挡作用下受扰建筑功率谱谱值逐渐减小;在高频范围内,受扰建筑功率谱谱值相对单体建筑略小。在 L-L 排布下,因施扰建筑弧面迎风,受扰建

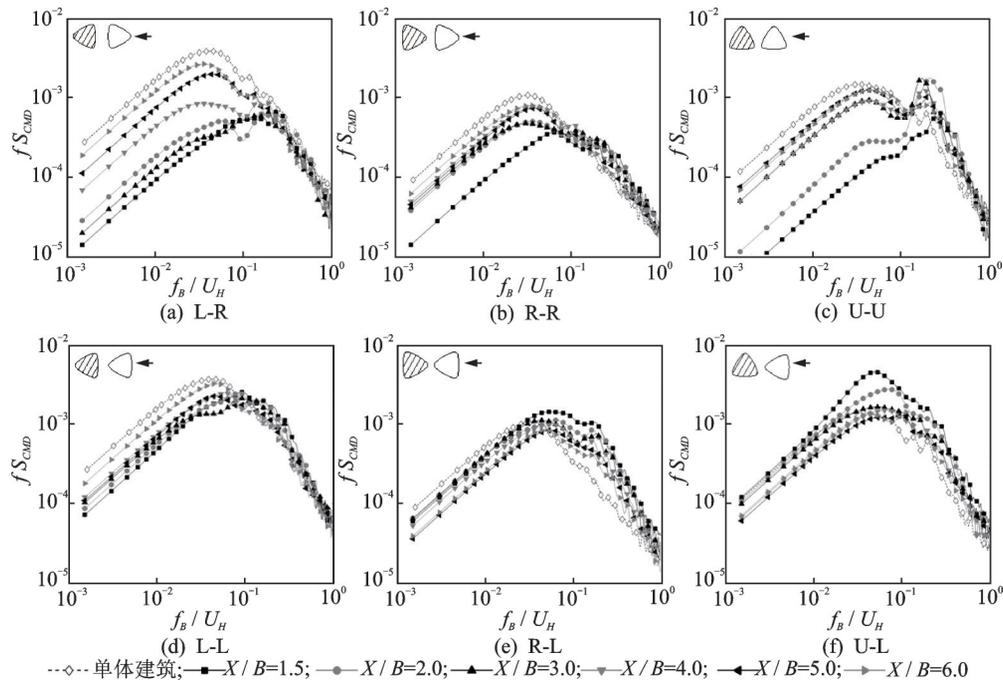


图9 顺风向基底弯矩系数功率谱密度

Fig.9 Power spectral densities of along-wind overturning moment coefficients

筑低频范围内的功率谱低频部分能量明显增大,且间距比较小时尤为明显;高频范围内的功率谱能量也超过单体情况,且间距比越小,功率谱谱值越大。可见,前方施扰建筑弧面迎风时脱落在尾流的漩涡击打在受扰建筑表面,导致小间距比时受扰建筑顺风向基底弯矩系数功率谱密度明显增大,随着间距增加,漩涡能量逐渐耗散,增强效果减弱。R-R排布和R-L排布下的功率谱密度干扰规律与此类似,当施扰建筑由圆角迎风转为弧面迎风时,受扰建筑弯矩功率谱谱值在高频范围内明显增大并超过单体情况;随着间距比减小,谱值逐渐增大至谱峰附近。

U-U排布下,受扰建筑顺风向基底弯矩系数功率谱密度在低频范围内谱值同样随间距比减小而减小,但在0.2折算频率附近出现能量集中现象,这是由于气流经过上游建筑后脱落的漩涡所导致。除了 $X/B=1.5$ ,其余间距比下功率谱峰值随间距比减小而增大,甚至超过低频范围内的峰值。U-L排布下,受扰建筑功率谱密度在全频率范围中呈现出谱值随间距比减小而增大的趋势, $X/B \leq 2.0$ 时受扰建筑功率谱谱峰甚至超过其余情况,这进一步说明施扰建筑弧面迎风时脱落在尾流的漩涡在间距比较小时能量更为集中。

图10为6种排布方式下不同间距比受扰建筑顺风向基底弯矩系数功率谱密度曲线,其中纵坐标

$fS_{CML}$ 表示无量纲的横风向基底弯矩系数功率谱密度。L-R排布和L-L排布中,相比于单体建筑所呈现的明显漩涡脱落现象,当 $X/B \geq 2.0$ 时,随着间距比减小,在遮挡作用下受扰建筑自身漩涡脱落减弱,功率谱密度峰值逐渐减小;当 $X/B=1.5$ 时,与脉动层升力系数情况类似,受扰建筑功率谱密度峰值介于各间距比情况之间。由于施扰建筑弧面迎风时产生的漩涡脱落对尾流脉动的增强效应更明显,导致同种间距比情况下L-L排布时受扰建筑功率谱密度谱值更大。

R-R排布和U-U排布下,其对应的单体建筑功率谱密度主要分布在低频部分,而在双塔干扰条件下,受扰建筑功率谱密度在0.18折算频率附近出现能量集中情况,这是由于气流经过上游建筑后脱落的漩涡所导致。R-R排布下 $X/B \leq 3.0$ 和U-U排布下 $X/B \leq 2.0$ 时,受扰建筑功率谱谱值在强遮挡作用下较小,且随间距比的减小而减小;R-R排布下 $X/B=4.0$ 和U-U排布下 $X/B=3.0$ 时,受扰建筑顺风向基底弯矩系数功率谱谱值在尾流激励下达到最大,且随着间距增大,尾流激励效果逐渐减弱。R-L排布和U-L排布下,受扰建筑功率谱在施扰建筑漩涡脱落频率即0.11折算频率附近出现更强的能量集中现象,谱值明显大于施扰建筑非弧面迎风时的情况,进一步说明了上游建筑尾流夹杂的漩涡可以增强受扰建筑脉动风荷载。

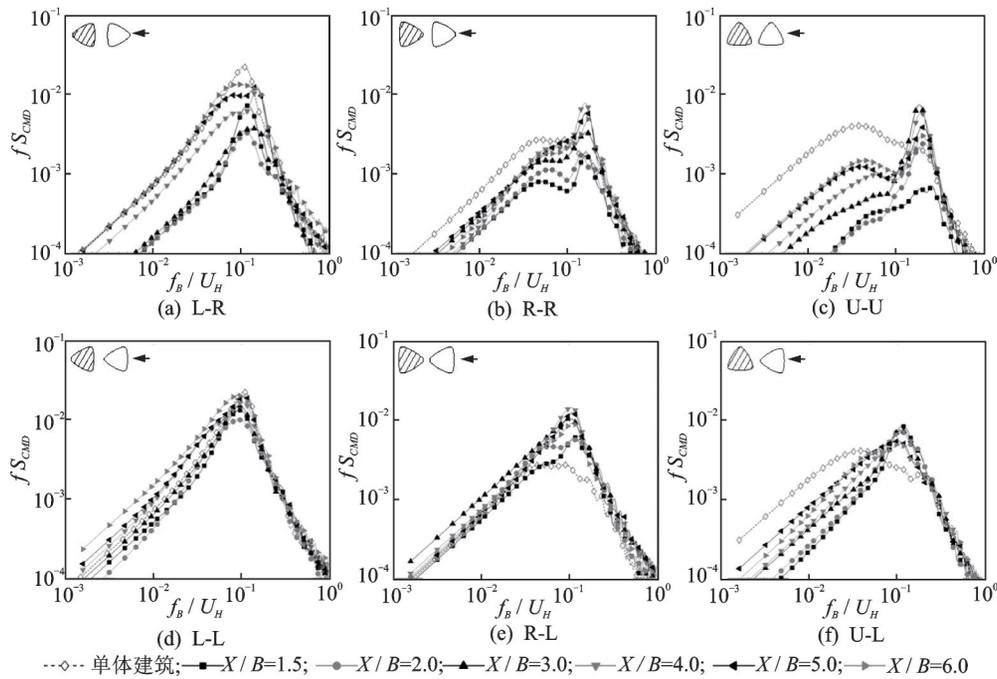


图10 横风向基底弯矩系数功率谱密度

Fig.10 Power spectral densities of across-wind overturning moment coefficients

### 3 结论

1) 双塔串联时,顺风向和横风向静力干扰效应均表现为遮挡效应,当施扰模型弧面迎风时相对更强。受扰建筑平均层阻力系数随间距比减小而减小,多数排布方式下在间距比等于2.0时其值在建筑中部转为负值。受扰建筑平均层升力系数在双塔均关于来流方向对称时接近于0,此时间距的影响较小,其余排布方式下在间距比小于等于2.0时减小至0附近。

2) 由于顶部扰流现象,施扰建筑顶部分离的尾流使得受扰建筑在 $0.7H$ 以上来流风速和湍流度相对增大,遮挡效应减弱,受扰建筑平均及脉动层风力系数均相对增大,并随着高度增大而更加明显。

3) 施扰建筑弧面迎风时脱落在尾流的漩涡击打在受扰建筑表面,间距比较小时漩涡能量更为集中,使得小间距比下受扰建筑脉动层阻力系数在 $0.7H$ 以下增至最大,顺风向基底弯矩系数功率谱也明显增大,高频范围内甚至超过单体情况。随着间距比增大,漩涡能量逐渐耗散,增强效果减弱。

4) 对于横风向气动力,当施扰建筑迎风方式变为弧面迎风时,尾流夹杂的漩涡极大地增强了来流脉动性,导致脉动层升力系数以及横风向基底弯矩系数功率谱显著增大。受扰模型弧面迎风时,自身漩涡脱落受遮挡作用影响,功率谱谱峰在间距比大于等于2.0时呈现出随间距比减小而减小的趋势,其余排布方式下,受扰建筑功率谱在尾流激振下出

现能量集中现象。施扰建筑迎风方式变为弧面迎风时,会使受扰建筑功率谱高频谱峰对应的折算频率由0.18转变为尾流漩涡脱落频率控制的0.11。

### 参 考 文 献

- [1] 顾明,黄鹏.群体高层建筑风荷载干扰的研究现状及展望[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(7):762-766.  
GU Ming, HUANG Peng. Research history and state-of-art of interference effects of wind loads of a cluster of tall buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2003, 31(7):762-766. (in Chinese)
- [2] 余先锋,谢壮宁,顾明.群体高层建筑风致干扰效应研究进展[J].建筑结构学报,2015(3):1-11.  
YU Xianfeng, XIE Zhuangning, GU Ming. Research progress of wind-induced interference effects on tall buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015(3):1-11. (in Chinese)
- [3] 顾明,葛福,韩宁.方形高层建筑顺风向层风力干扰特性[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(5):665-671.  
GU Ming, GE Fu, HAN Ning. Characteristics of along-wind layer wind force interference effect of two square tall buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(5):665-671. (in Chinese)
- [4] 顾明,葛福,韩宁.方形高层建筑横风向层风力干扰特性[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(8):1147-1152.  
GU Ming, GE Fu, HAN Ning. Characteristics of

- across-wind layer wind force interference effect of two square tall buildings[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(8):1147-1152. (in Chinese)
- [5] 马文勇, 袁欣欣, 刘庆宽, 等. 任意排列两方形断面高层建筑风致干扰机理研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12):149-154.  
MA Wenyong, YUAN Xinxin, LIU Qingkuan, et al. Mechanism of wind-induced interference effects between two arbitrarily arranged square-section high-rise buildings [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12):149-154. (in Chinese)
- [6] 杨群, 刘庆宽, 刘小兵. 串列三圆柱绕流的时均压力分布与气动力[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(5):1011-1016.  
YANG Qun, LIU Qingkuan, LIU Xiaobing. Time averaged pressure distribution and aerodynamic force of flow around three circular cylinders in tandem arrangement[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5):1011-1016. (in Chinese)
- [7] 葛福, 顾明. 施扰建筑高度对主建筑层阻力影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(9):101-109.  
GE Fu, GU Ming. Tests for effects of relative height of interfering building on main building layer's drag force [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(9):101-109. (in Chinese)
- [8] 顾明, 葛福. 施扰建筑高度对主建筑层升力影响的试验研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(2):181-188.  
GU Ming, GE Fu. Experimental study of impact of changes in relative height of interfering building on main building[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43(2):181-188. (in Chinese)
- [9] YU X F, XIE Z N, ZHU J B, et al. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142:188-197.
- [10] 余先锋, 谢壮宁, 于怀懿. 高层建筑间风致扭转干扰效应的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11):78-83.  
YU Xianfeng, XIE Zhuangning, YU Huaiyi. Experimental study on interference effects of wind-induced torsional responses between two high-rise[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11):78-83. (in Chinese)
- [11] YU X F, XIE Z N, WANG X, et al. Interference effects between two high-rise buildings on wind-induced torsion[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 159:123-133.
- [12] 余先锋, 谢壮宁, 刘慕广, 等. 超高层建筑顺风向加速度的干扰效应研究[J]. 工程力学, 2017, 34(12):143-149,170.  
YU Xianfeng, XIE Zhuangning, LIU Muguang, et al. Interference effects on along-wind acceleration between two high-rise buildings[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12):143-149,170. (in Chinese)
- [13] YU X F, XIE Z N, GU M. Interference effects between two tall buildings with different section sizes on wind-induced acceleration[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182:16-26.
- [14] YAN B, LI Q S. Wind tunnel study of interference effects between twin super-tall buildings with aerodynamic modifications[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 156:129-145.
- [15] HUI Y, TAMURA Y, YANG Q. Analysis of interference effects on torsional moment between two high-rise buildings based on pressure and flow field measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 164:54-68.
- [16] KIM W, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Interference effects of an adjacent tall building with various sizes on local wind forces acting on a tall building[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(10):1469-1481.
- [17] 谢壮宁, 方小丹, 倪振华, 等. 广州西塔风效应研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1):107-114.  
XIE Zhuangning, FANG Xiaodan, NI Zhenhua, et al. Study on wind effects of the Guangzhou West Tower[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1):107-114. (in Chinese)
- [18] 石碧青, 谢壮宁, 倪振华. 用高频底座力天平研究广州西塔的风效应[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2):42-48.  
SHI Biqing, XIE Zhuangning, NI Zhenhua. Study on wind effects of guangzhou west tower using high-frequency-force-balance method[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2):42-48. (in Chinese)
- [19] 李小康, 谢壮宁. 广州西塔气动荷载特性及风致响应研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16):104-110.  
LI Xiaokang, XIE Zhuangning. Aerodynamic wind loads on guangzhou west tower and its wind-induced response[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16):104-110. (in Chinese)
- [20] 陈强, 陈水福. 复杂塔冠对双塔高层建筑风压特性影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8):26-35.  
CHEN Qiang, CHEN Shuifu. Test investigation on effect of complicated tower top on wind pressure characteristics of a twin-tower high-rise building[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8):26-35. (in Chinese)



**第一作者简介:**丁通,男,1994年11月生,硕士。主要研究方向为结构风工程。  
E-mail:dingtong@zju.edu.cn

**通信作者简介:**陈水福,男,1967年7月生,博士、教授。主要研究方向为结构风工程、结构计算机分析。  
E-mail:csf@zju.edu.cn