

# 施扰建筑高度对主建筑层升力影响的试验研究

顾 明, 葛 福

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 利用刚性模型测压试验, 研究了施扰建筑相对高度变化对主建筑层升力系数和层脉动升力功率谱的影响规律. 试验包含了 3 个并列位置、5 个串列位置和 3 个斜列位置. 结果表明: 建筑物并列时, 高度比越大则层平均升力系数大, 层脉动升力功率谱受影响的范围大; 建筑物串列时, 高度比对层平均升力系数的影响很小, 对层脉动升力系数的大小及沿高分布形式有显著影响, 施扰建筑高度超过受扰建筑时层脉动升力功率谱受到的影响很大, 尤其是顶部区域; 斜列工况时, 并列间距比对影响规律起主导作用.

**关键词:** 高层建筑; 风洞试验; 干扰效应; 升力; 高度比

**中图分类号:** TU312.1; TU971

**文献标志码:** A

## Experimental Study of Impact of Changes in Relative Height of Interfering Building on Main Building Layer Lift Force

GU Ming, GE Fu

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The impact of changes in the relative height of a interfering building on main building layer-lift-force coefficients and lift-force power spectrum was studied by rigid model pressure tests. Three side by side positions, five tandem positions and three oblique positions were considered. The results show that in the side by side cases the greater the relative height, the bigger the mean layer-lift-force coefficients, so as the affected height of lift-force power spectrum. In the tandem cases, the relative height of the interfering building has little effect on the mean layer-lift-force coefficients, but it has great impact on the root mean square(RMS) of layer-lift-force coefficients. When the height of the interfering building exceeds that of the main building, the impact on lift-force power spectrum is great, especially in the top area. In the oblique cases, the across-wind spacing ratio plays a leading role in the interference law.

**Key words:** high-rise buildings; wind tunnel test; interference effect; lift force; relative height

高层建筑的干扰效应, 一直以来都是风工程界的重要课题. 自 1965 年英格兰渡桥(Ferrybridge)热电厂的 8 座冷却塔群后排三塔发生倒塌事故后, 风干扰问题研究逐渐火热. 文献[1]综述了 2003 年以前的干扰效应研究成果, 系统罗列了各个因素对干扰效应的影响. 以往所做的研究, 一般是研究基底力或基底力响应的干扰效应<sup>[2-3]</sup>, 或者研究局部测点风压的干扰效应<sup>[4-5]</sup>, 只有少数学者利用气弹模型来研究干扰效应. 随着数值方法的进步, 也有学者利用计算流体动力学(CFD)等数值模拟软件来研究干扰效应<sup>[6-7]</sup>, 但是数值模拟方法结果的可靠性有待商榷, 而且常常要与风洞试验结果对比, 处于探索阶段.

以层风力为对象来研究干扰效应, 可以清晰地认识高层建筑风力干扰效应沿高分布情况. 文献[8-9]已经对施扰建筑与受扰建筑等高以及施扰建筑位置变化下的层风力干扰效应进行了详细研究, 得到了一些干扰规律. 本文进一步研究施扰建筑相对高度变化对受扰建筑层升力系数和层脉动升力功率谱的影响.

## 1 试验安排

本试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 大气边界层风洞中进行的. 根据国家规范在风洞中模拟了 C 类风场, 试验风速为  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 试验模型为一栋尺寸  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  的方柱(受扰建筑), 模拟一栋几何缩尺比为  $1:400$  的高层建筑. 试验考虑了 3 种高度的施扰建筑, 这 3 个施扰建筑模型的横断面与受扰模型相同, 高度分别为  $0.7H$ ,  $1.0H$  和  $1.3H$  ( $H$  为受扰模型高度). 定

义施扰模型与受扰模型的高度比为  $\eta$ . 施扰建筑和受扰建筑的位置见图 1, 图中坐标原点处为受扰模型, 圆圈表示试验过程中施扰模型的位置,  $B$  为受扰模型的宽度,  $X$  为施扰模型与受扰模型顺风向距离,  $Y$  为施扰模型与受扰模型横风向距离. 试验模型及风洞试验的详细介绍见文献[9].

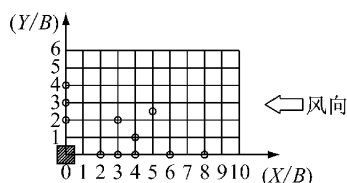


图 1 施扰模型位置布置图

Fig.1 Arrangement of buildings and coordinate system

## 2 施扰建筑高度比变化对层升力系数的影响

横风向的层平均风力系数和层脉动风力系数分别记作  $C_L(Z)$  和  $C'_L(Z)$ ,  $Z$  为测点层高度. 第  $i$  层风力系数定义为

$$C_L(Z_i) = \frac{F_L(Z_i)}{A(Z_i)P_H}, \quad C'_L(Z_i) = \frac{\sigma_L(Z_i)}{A(Z_i)P_H} \quad (1)$$

式中:  $F_L(Z_i)$  为各层的横风向层平均风力,  $\sigma_L(Z_i)$  为各层的横风向层风力均方根,  $P_H$  为模型顶部的参考风压,  $A(Z_i)$  为第  $i$  层的迎风面投影面积.

### 2.1 建筑物并列时的升力系数

试验包含了间距比为 2.0, 3.0, 4.0 的 3 种并列施扰位置. 图 2 和 3 为间距比 2.0 和 4.0 的试验结果.

比较图 2a 和 3a 可知, 建筑物并列时高度比对层平均升力系数的影响很大. 当间距比小于 3.0 时,  $\eta=1.0$  的层平均升力系数大于单工况;  $\eta=0.7$  的层平均升力系数比  $\eta=1.0$  时小, 间距比为 2.0 时小 10%~50%, 间距比为 3.0 时小 40%~60%;  $\eta=1.3$  的中间和下部层平均升力系数大于  $\eta=1.0$ , 最多增大 20% 左右, 顶部层平均升力系数会随层高增大而减小, 小于  $\eta=1.0$  时的值. 当间距比为 4.0 时, 各层影响规律一致, 施扰建筑高度比越大, 层平均升力系数越大,  $\eta=0.7$  的层平均升力系数比  $\eta=1.0$  时小 30%~50%,  $\eta=1.3$  时某些层平均升力系数比  $\eta=1.0$  大 30% 以上. 还可以发现, 间距比较小时, 层平均升力系数沿高度先增大后减小, 随着间距比增大, 层平均升力系数沿高度变化趋于平缓, 表明中间层受到的影响较大.

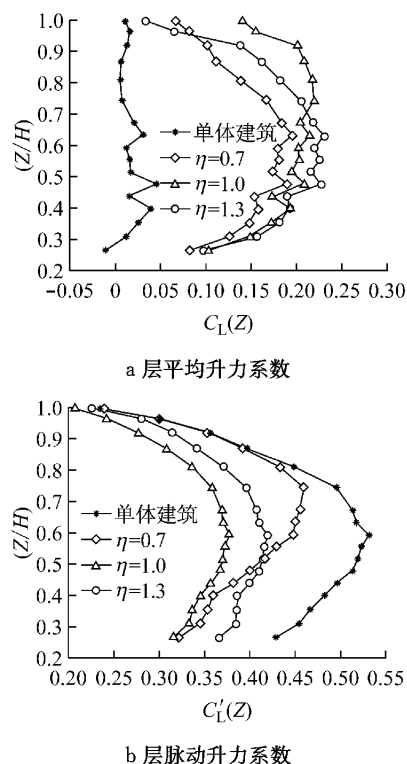


图 2 并列间距比为 2.0 时层升力系数随高度比变化图

Fig.2 Variation of layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 2.0 in side by side case

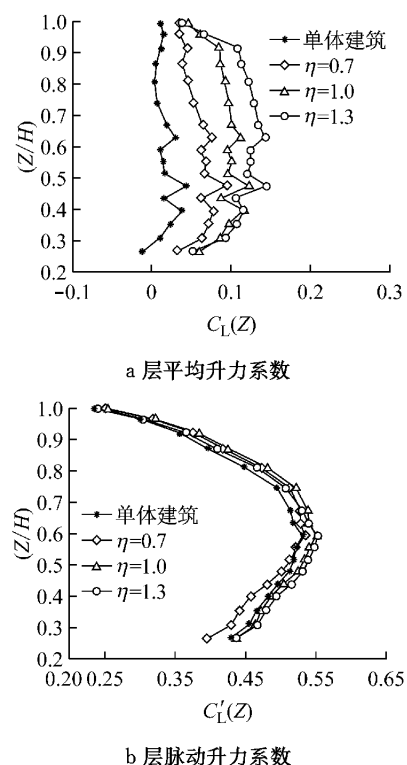


图 3 并列间距比为 4.0 时层升力系数随高度比变化图

Fig.3 Variation of layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 4.0 in side by side case

施扰建筑高度比较大时层平均升力系数大,这是因为并列施扰建筑与受扰建筑形成峡谷效应,施扰建筑高度比越大,峡谷效应越严重,受扰建筑两侧面的分离流越不对称,内侧面的吸力会明显增大,使受扰建筑的平均升力更大。

图2b和3b表明,并列间距比4.0时,高度比对层脉动升力系数沿高分布规律基本没有影响,各高度比的层脉动升力系数与单体建筑相比变化很小;间距比较小时,高度比对层脉动升力系数的沿高分布有一定影响, $\eta=1.0$ 时的各层脉动升力系数最小, $\eta=1.3$ 和 $\eta=0.7$ 的层脉动升力系数都大于 $\eta=1.0$ 。对同一层内外侧面研究单点脉动值及点-点之间相关性,结果表明:间距比较小时,高度比为1.0的侧风面单点脉动值不是最小,但同层测点相关性最弱。

## 2.2 建筑物串联时的升力系数

试验包含了间距比为2.0,3.0,4.0,6.0,8.0的5种串联施扰位置。建筑物串联时,由于仍然保持了对称性,各层平均升力系数基本上还是在零附近,随施扰建筑高度比的变化也不明显,串联间距比越大,施扰建筑对受扰建筑的影响越小,层平均升力系数越接近零。图4给出了串联间距比为6.0时的层平均升力系数。

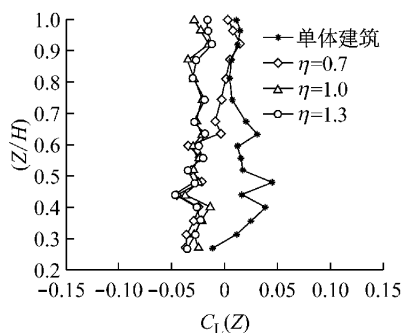


图4 串联间距比为6.0时层平均升力系数

Fig. 4 Variation of mean layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 6.0 in tandem case

图5表明,间距比2.0时, $\eta=1.0$ 时层脉动升力系数呈现S形分布,除了顶部的层脉动升力系数大于单体建筑外,其余各层脉动升力系数小于单体建筑。 $\eta=0.7$ 时,层脉动升力系数沿高度先增大后减小,除了 $0.40H \sim 0.65H$ 区域外,其余部分层脉动升力系数小于 $\eta=1.0$ 时的值。 $\eta=1.3$ 时的层脉动升力系数在 $0.8H$ 以下基本相等,在 $0.8H$ 以上随层高增大而减小,顶部的值也超过单体建筑。 $\eta=1.0$ 和 $\eta=1.3$ 的顶部层脉动升力系数大于单体建筑,主要

是因为上游施扰建筑顶部尾流撞击到下游受扰建筑迎风面,加速了顶部侧风面前缘的剪切层分离速度,形成了较大的脉动。

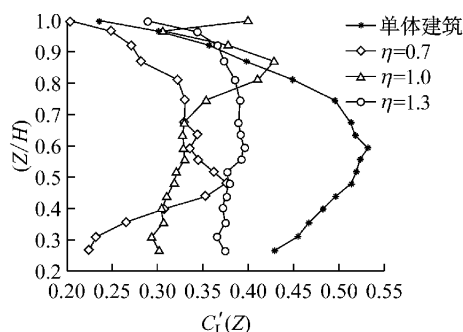


图5 串联间距比为2.0时层脉动升力系数

Fig. 5 Variation of RMS layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 2.0 in tandem case

图6表明,间距比为4.0时的各个高度比下的层脉动升力系数沿高分布形式与间距比2.0时基本相似,在数值上有所增大。这是因为串联间距比小于4.0时,两建筑的流场形态不发生变化,仅下游建筑产生涡脱<sup>[7]</sup>,随着间距比增大,一方面遮挡效应减弱,另一方面附着到受扰建筑侧面的尾流增多。 $\eta=1.0$ 和 $\eta=1.3$ 时,顶部各层的脉动升力系数大于单体建筑,原因与前面相同。

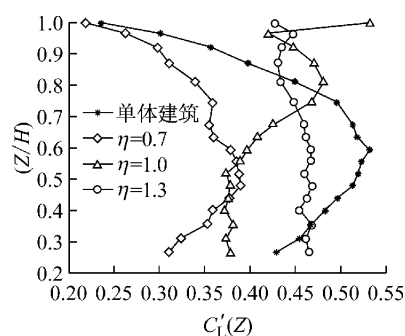


图6 串联间距比为4.0时层脉动升力系数

Fig. 6 Variation of RMS layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 4.0 in tandem case

当间距比超过4.0后,流场形态与之前有所变化,此时下游建筑和上游建筑都会产生涡脱<sup>[7]</sup>。图7表明,间距比增大到6.0时,高度比越大,层脉动升力系数越大。 $\eta=1.0$ 时层脉动升力系数沿高度整体呈S形分布,转折点高度分别在 $0.75H$ 附近和 $0.95H$ 附近。 $\eta=0.7$ 时,层脉动升力系数沿高分布先增大后减小,在 $0.75H$ 附近取最大值。 $\eta=1.3$ 时, $0.75H$ 以下沿高度变化不大, $0.75H$ 以上先减小后

增大,但是比  $\eta=1.0$  时要平缓。

图8表明,间距比为8.0时,0.75H以下,各高度比的层脉动升力系数都随层高增大而增大,基本上是高度比越大层脉动升力系数越大,大小差异没有间距比小的时候明显。在0.75H以上, $\eta=0.7$ 时各层脉动升力系数随层高增大而减小,在顶部与单体建筑基本相等,这是因为高度比为0.7的施扰建筑不能影响到整个高度; $\eta=1.0$ 时,各层脉动升力系数随高度增加而减小,顶层略微增大; $\eta=1.3$ 时,各层脉动升力系数随层高仍然先减小后增大,各层脉动升力系数大于 $\eta=1.0$ 时的情况。

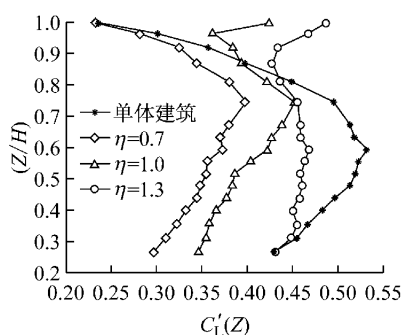


图7 串联间距比为6.0时层脉动升力系数

Fig. 7 Variation of RMS layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 6.0 in tandem case

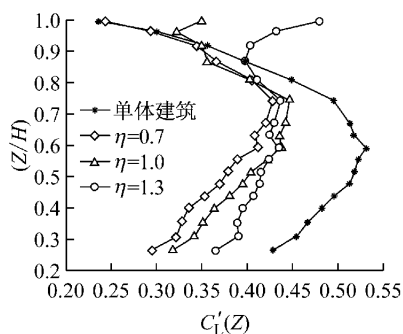


图8 串联间距比为8.0时层脉动升力系数

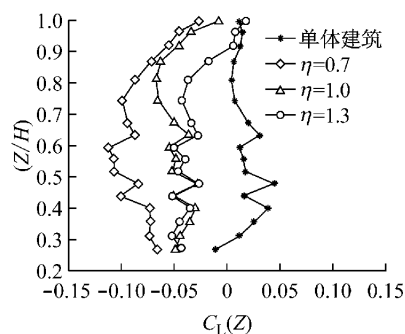
Fig. 8 Variation of RMS layer-lift-force coefficients with different relative heights when spacing ratio is 8.0 in tandem case

综合比较图4~8可知,施扰建筑相对高度对层脉动升力系数沿高分布影响严重,尤其是顶部。 $\eta=0.7$ 时,层脉动升力系数沿高度先增大后减小,间距比较小时,最大值在0.5H~0.6H附近,间距比较大时,最大值在0.7H附近。 $\eta=1.0$ 时,层脉动升力系数沿高呈S形分布,顶部大于单体建筑。 $\eta=1.3$ 且间距比较小时,层脉动升力系数下部随高度变化不大,顶部随高度而减小,间距比较大时,层脉动升力

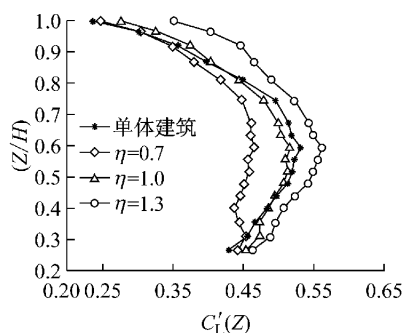
系数也呈S形分布,沿高变化比 $\eta=1.0$ 时平缓。 $\eta=1.0$ 与 $\eta=1.3$ 时顶部的层脉动升力系数大于单体建筑,这是因为施扰建筑顶部尾流增加了受扰建筑顶部区域来流湍流和来流流速。

### 2.3 若干斜列位置的升力系数

试验包含了(3.0,2.0),(4.0,1.0),(5.0,2.5)3个斜列施扰位置,坐标含义见图1。每个位置的升力系数随施扰建筑高度比的变化见图9~11。



a 层平均升力系数



b 层脉动升力系数

图9 位置(3.0,2.0)下层升力系数随高度比变化图

Fig. 9 Variation of layer-lift-force coefficients with different relative heights in position (3.0,2.0)

施扰建筑位于(3.0,2.0)时,受扰建筑位于施扰建筑尾流中。由图9a可知,层平均升力系数偏离零,但是偏离量不大。图9b表明,层脉动升力系数随高度比的变化规律很明显,高度比越大,层脉动升力系数越大, $\eta=1.0$ 时的各层脉动升力系数与单体建筑相近。

施扰建筑位于(4.0,1.0)时,由于并列间距比小,干扰效应明显。图10a表明,干扰后层平均升力系数绝对值随层高都是先增大后减小,不同高度比转折点高度不同,表明了高度比越大,主建筑受影响的高度越大。图10b表明,层脉动升力系数沿高度分布形式类似于串联工况。

图11表明,施扰建筑位于(5.0,2.5)时,由于并列和串联间距比都比较大,层平均升力系数在零附

近,基本无偏离.各高度比下层脉动升力系数沿高分布规律与单体建筑相似,数值都比单体建筑大,且高

度比越大,层脉动升力系数越大.

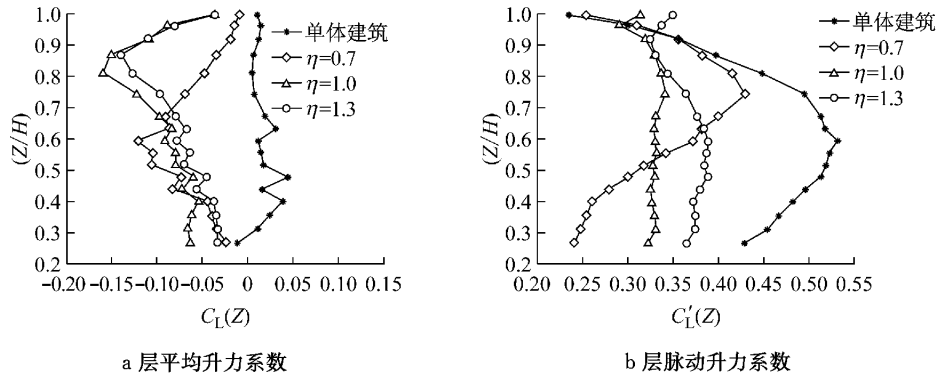


图10 位置(4.0,1.0)下层升力系数随高度比变化图

Fig.10 Variation of layer-lift-force coefficients with different relative heights in position (4.0,1.0)

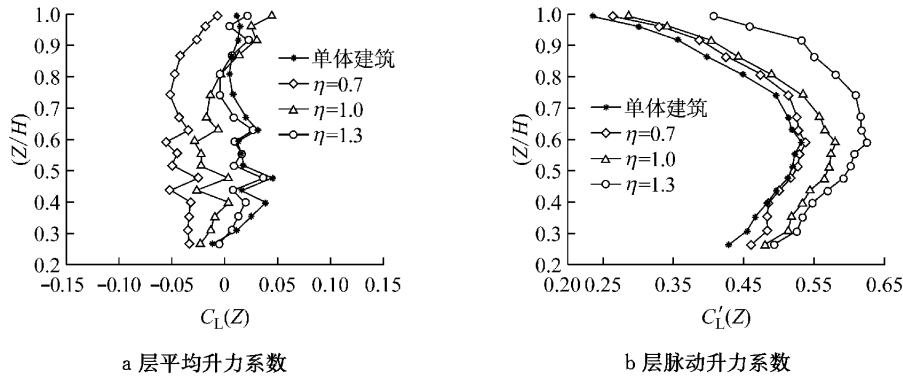


图11 位置(5.0,2.5)下层升力系数随高度比变化图

Fig.11 Variation of layer-lift-force coefficients with different relative heights in position (5.0,2.5)

### 3 施扰建筑高度比变化对层脉动升力功率谱的影响

模型沿高共有17层,选其中的第1,4,7,9,11,13,15,17层进行分析,各层对应的高度分别为最底层(0.265H),0.4H,0.5H,0.6H,0.7H,0.8H,0.9H和最顶层(0.996H).

#### 3.1 建筑物并列时的层脉动升力功率谱

建筑物并列时,并列间距比越小,层脉动升力功率谱峰值频率增大越多;\$\eta < 1.0\$时,对受扰建筑层脉动升力功率谱的影响范围可能达不到整个建筑高度.图12给出了并列间距比为3.0时的层脉动升力功率谱,图中纵坐标为归一化的谱值,横坐标为折算频率.

#### 3.2 建筑物串列时的层脉动升力功率谱

建筑物串列时,受扰建筑脉动升力功率谱的能量主要有两个来源,一部分是自身侧面的分离流,另

一部分为前方施扰建筑尾流的附着.

图13给出了串列间距比为2.0时的层脉动升力功率谱.间距比小于4.0时,受扰建筑侧面不产生涡脱,且由于间距比小,附着尾流较少,除顶部外,各高度比的层脉动升力功率谱峰值频率小于单体建筑,高度比越小,脉动升力功率谱峰值频率越小.在顶部,当\$\eta=0.7\$时施扰建筑不能完全遮挡受扰建筑,施扰建筑顶部三维流效应增大了受扰建筑来流流速,从而使受扰建筑横风向涡脱频率增大,导致顶层的峰值频率比单体建筑大;\$\eta=1.3\$时,层脉动升力功率谱峰值频率比\$\eta=1.0\$时大,并且在顶层峰值频率比单体建筑大,这可能是因为单体建筑顶部有三维流效应,在顶部的涡脱频率会减小,而\$\eta=1.3\$时的施扰建筑尾流在到达施扰建筑顶部时频率较高,能量较大.

图14给出了串列间距比为8.0时的层脉动升力功率谱.间距比大于6.0时,\$\eta=1.0\$的层脉动升力功率谱与单体建筑基本相似,这是因为遮挡作

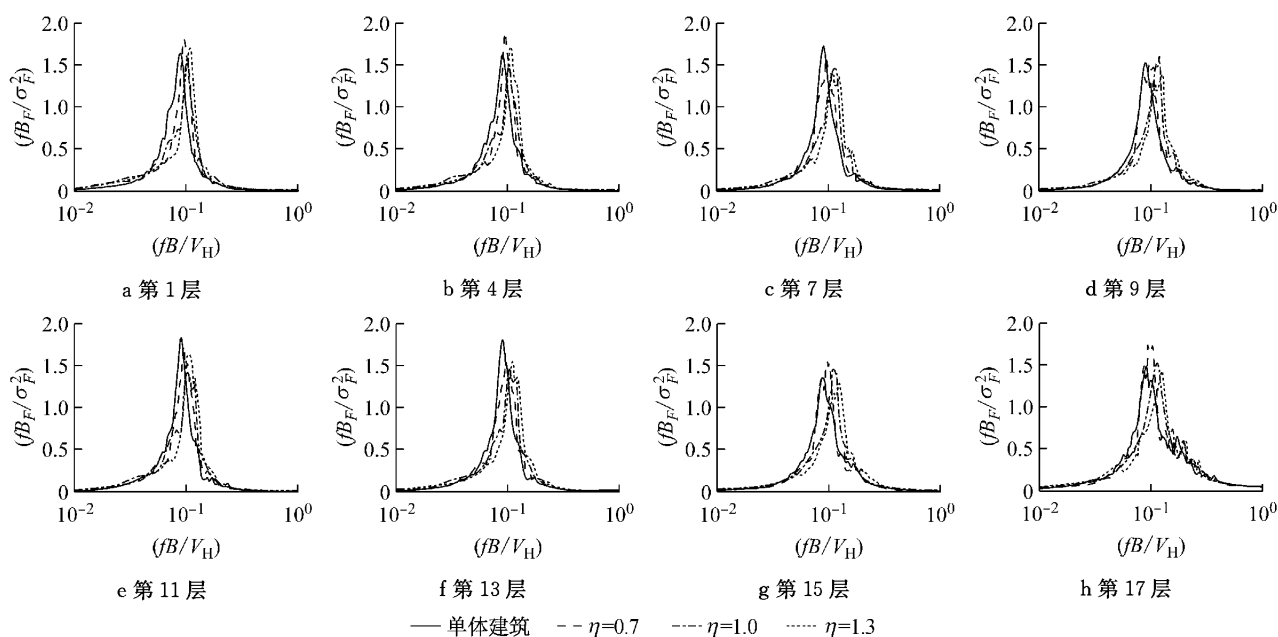


图 12 并列间距比为 3.0 时层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig.12 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative heights when spacing ratio is 3.0 in side by side case

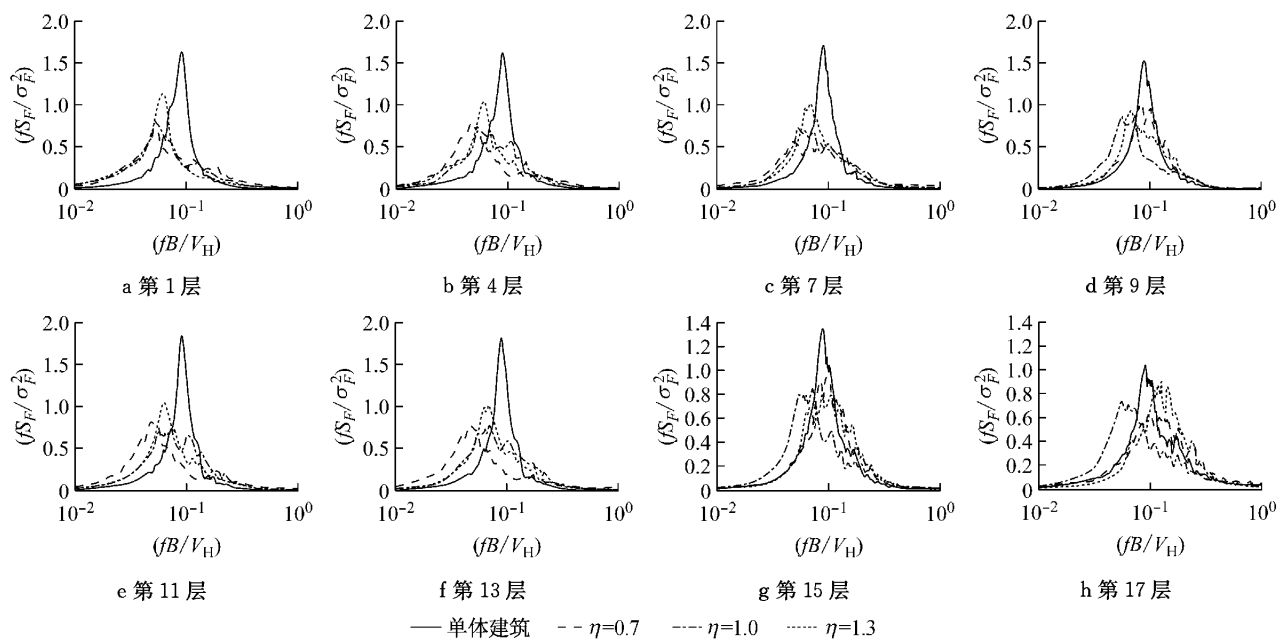


图 13 串联间距比为 2.0 时层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig.13 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative heights when spacing ratio is 2.0 in tandem case

用减弱导致受扰建筑自身涡脱,但施扰建筑尾涡增加了来流的高频部分,综合作用使  $\eta=1.0$  时的脉动升力功率谱峰值频率与单体建筑相近。 $\eta=1.3$  时的各层脉动升力功率谱峰值频率比  $\eta=1.0$  时要大并且谱峰值也大,这是因为施扰建筑高度越高,脱落的漩涡整体性越好,尾涡发展到受扰建筑处含有较大的能量,对脉动升力功率谱的能量贡献大。 $\eta=0.7$  时,层脉动升力功率谱峰值比  $\eta=1.0$  时低,且带宽

较大。

### 3.3 若干斜列位置的层脉动升力功率谱

若干斜列位置的脉动升力功率谱见图 15~17。在位置(3.0,2.0)时,各个高度比的层脉动升力功率谱峰值频率差别不明显,较低层的层脉动升力功率谱峰值与单体建筑相当,峰值频率略小于单体建筑,顶部的层脉动升力功率谱峰值频率略大于单体建筑。

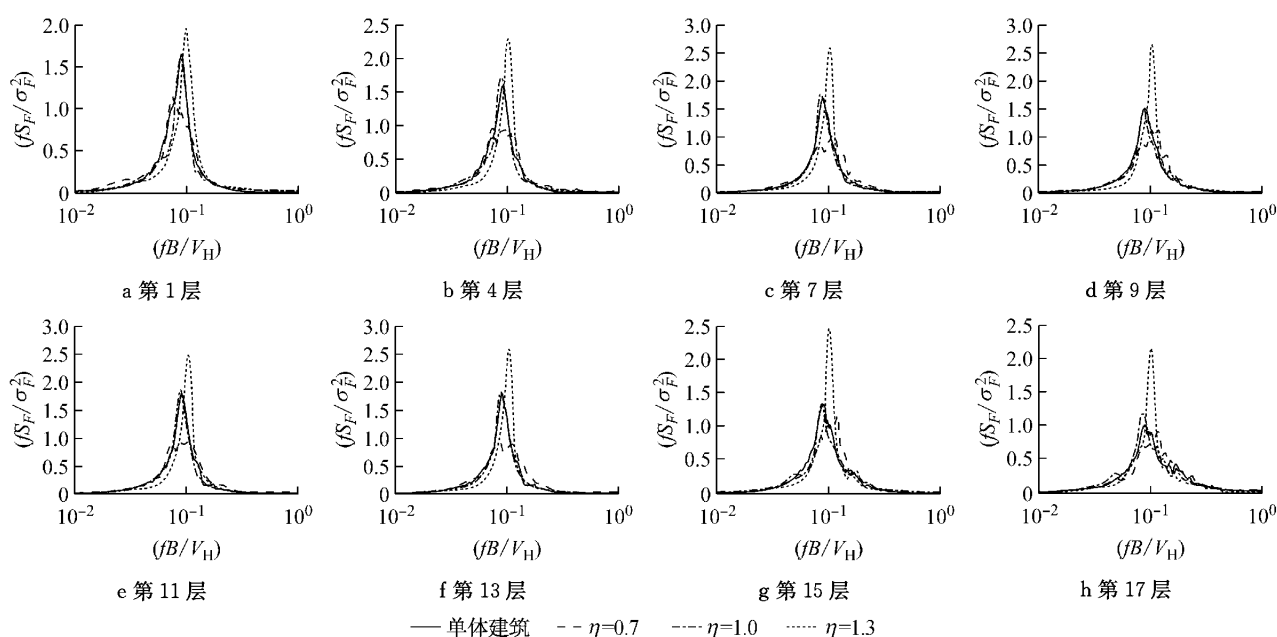


图14 串联间距比为8.0时层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig.14 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative heights when spacing ratio is 8.0 in tandem case

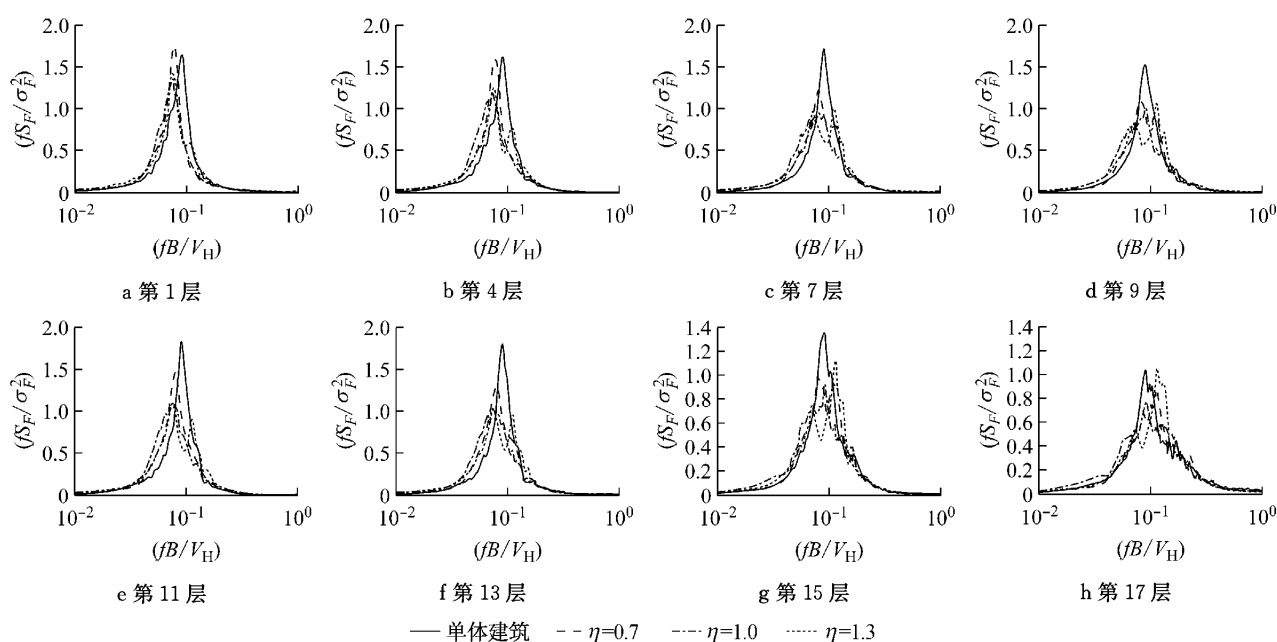


图15 位置(3.0,2.0)下层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig.15 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative heights in position (3.0,2.0)

在位置(4.0,1.0)时,由于并列方向间距比很小,高度比对层脉动升力功率谱的影响类似于串联工况, $\eta=1.0$ 时的层脉动升力功率谱峰值大小与单体建筑相当,峰值频率略小于单体建筑; $\eta=0.7$ 时的谱峰值最低,带宽大; $\eta=1.3$ 时的脉动升力功率谱峰值较 $\eta=1.0$ 时大。

位置(5.0,2.5)时,由于并列方向间距比和串联方向间距比都比较大, $\eta=0.7$ 和 $\eta=1.0$ 时施扰建筑对层脉动升力功率谱几乎无影响, $\eta=1.3$ 时的层脉

动升力功率谱峰值频率和峰值大小都略大于 $\eta=1.0$ 时的值。

## 4 结论

(1)建筑物并列时,高度比较大,则层平均升力系数大.高度比0.7时某些层平均升力系数比高度比1.0时最多减小达60%;高度比1.3时某些层平均升力系数比高度比1.0时最多增大达36%.间距

比小于 3.0 且高度比为 0.7 和 1.3 时,层脉动升力系数都大于高度比 1.0 时的层脉动升力系数;间距

比为 4.0 时,高度比对层升力系数的影响很小.

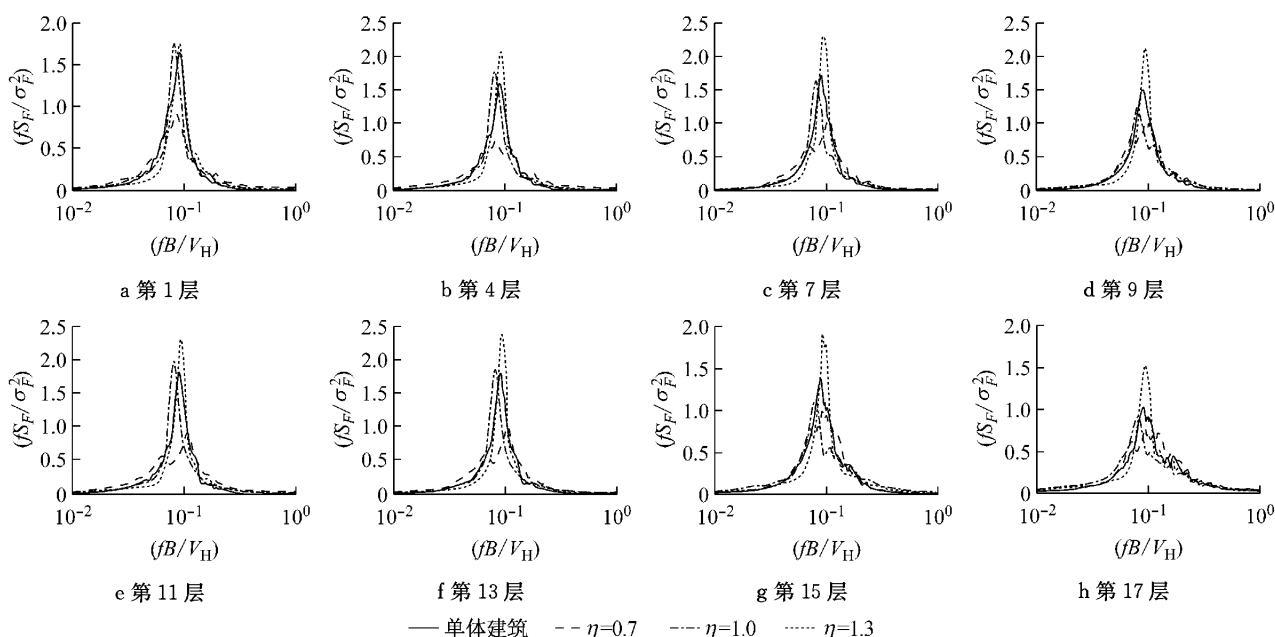


图 16 位置(4.0,1.0)下层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig. 16 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative height in position (4.0,1.0)

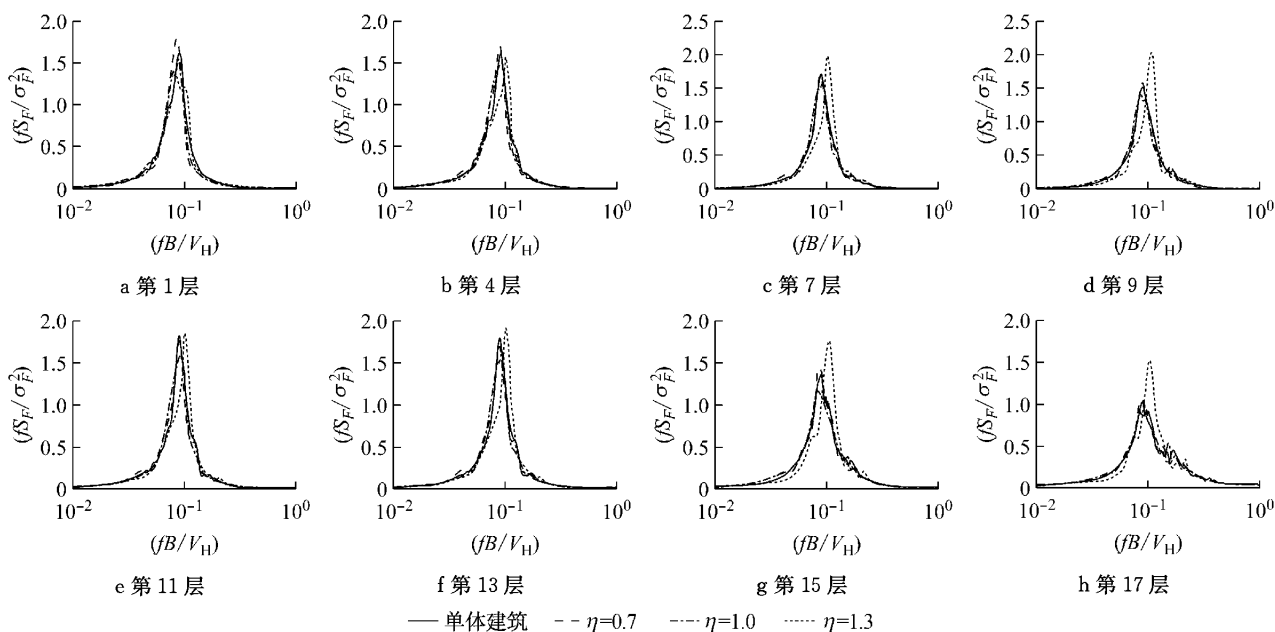


图 17 位置(5.0,2.5)下层脉动升力功率谱随高度比变化图

Fig. 17 Variation of layer-lift-force spectrum with different relative heights in position (5.0,2.5)

(2)建筑物并列时,间距比越小层脉动升力功率谱峰值频率与单体建筑相比增大越多.施扰建筑高度比为 0.7 时,对受扰建筑的层脉动升力功率谱影响范围可能达不到整个建筑高度;施扰建筑高度比为 1.0 和 1.3 时差别不大,对受扰建筑层脉动升力功率谱的影响范围都能达到整个建筑高度.

(3)建筑物串联时,层平均升力系数基本上还是在零附近,高度比的影响不明显.高度比对层脉动升力系数的影响规律随间距比变化.间距比小于 4.0 且高度比 0.7 时,在  $0.5H$  附近层脉动升力系数大于高度比 1.0 时的值,其余各层小于高度比 1.0 时的值;高度比 1.3 时中部和下部层脉动升力系数大

(下转第 279 页)