

# 高层建筑间顺风向动力干扰效应研究

刘俏琳, 李永贵, 刘 玥, 刘 鹏

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月25日

## 摘 要

通过对方型截面高层建筑进行一系列单自由度气弹模型测振试验, 分析了在不同间距比下相邻建筑对目标建筑的顺风向动力干扰效应。研究结果表明: 干扰效应与间距比成反比, 随着间距比增加, 干扰效应减弱。在串列布置时, 施扰建筑增大了目标建筑的来流风速和湍流度, 导致干扰效应主要表现为放大效应, 在施扰建筑的高速尾流边界时, 放大效应达到50%; 在并列布置时, 干扰效应随间距比增大, 从抑制效应转变为放大效应。

## 关键词

高层建筑, 动力干扰效应, 单自由度气弹模型试验

# Study on Downwind Dynamic Interference Effect between High-Rise Buildings

Qiaolin Liu, Yonggui Li, Yue Liu, Peng Liu

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 25<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A series of single-degree-of-freedom aeroelastic model vibration measurements were carried out on high-rise buildings with square cross-sections to analyze the downwind dynamic interference effect of adjacent buildings on the target buildings under different spacing ratios. The results show that the interference effect is inversely proportional to the spacing ratio, and weakens with the increase of the spacing ratio. In the series arrangement, the disturbing building increases the incoming wind speed and turbulence of the target building, resulting in the interference effect mainly manifested as an amplification effect, which reaches 50% at the high-speed wake boundary of the disturbing building. When the juxtaposition is arranged, the interference effect changes

from an inhibition effect to an amplification effect with the increase of the spacing ratio.

## Keywords

High-Rise Buildings, Dynamic Interference Effects, Single-Degree-Of-Freedom Airbomb Model Test

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济不断发展,科学技术不断进步,高层建筑层出不穷。高层建筑不仅能够缓解城市用地紧张的形势,而且也是衡量现代城市发达程度的一个重要指标。随着建筑物高度的增加往往伴随着柔性的增大和固有阻尼比的减小,风作用的敏感性也会随之提高。随着我国城市化的快速发展,现代高层建筑有着更高、更柔、分布更为密集的特点,建筑物间的相互干扰问题日益严重[1]。当周围有其他建筑物存在时,建筑的风荷载特性和气动力会与孤立状态存在很大差异。因此对于高层建筑间干扰效应的研究是有必要的。

关于干扰效应的研究最早 Bailey 等[2]提出当施扰建筑在上游时,尾流风速和其产生的湍流是产生干扰效应的机理;高风速的尾流边迹是产生显著干扰效应的重要原因,同时试验模型为两气弹模型之间会增加 10%~15%甚至更高的动力响应。黄鹏等[3] [4] [5]将干扰效应的机理总结为:上游施扰建筑的旋涡脱落作用、上游建筑尾流中风速特性的改变使得受扰建筑旋涡脱落发生变化、上游建筑使得受扰建筑来流风速脉动加强。谢壮宁等[6]提出在较小的折算风速下,小宽度的施扰建筑会出现涡激共振问题。侯方超等[7]提出在斜上游和正下游的某些特殊工况下,忽略目标建筑的气弹效应会使得设计偏于危险。Wang 等[8]将横风向干扰效应分为了三种类型:收敛振动、放大振动和发散振动。石碧青等[9]指出处于施扰物体尾流边界时,降低来流在受扰物体上的分离速度,使最大负压系数降低,并列布置产生的峡管效应使最大负压系数增大。吴倩云等[10]提出在小间距比时,间隙流对内侧平均风压系数影响很大。Lam 等[11]提出交错排列的两建筑的干扰机制可以总结为 5 种周期性的流动现象。

通过大量的阅读资料,关于动力干扰效应的研究,有许多学者通过刚性模型试验和数值模拟技术进行了深入地研究,但也有学者提出,如果忽略结构运动引起的气动阻尼的影响,静态模型测量的结果可能会低估某些干扰条件下结构响应的预测。气弹模型试验通过对建筑结构的动力特性进行模拟,可直接测量位移、加速度等数据,获得附加气动力与外部气流共同作用下的模型振动响应,因此对于有可能发生涡激振动和驰振等气弹失稳振动的建筑物进行气弹试验可获得更为准确的风振特性。所以本文通过单自由度气弹模型试验,对不同间距比下两建筑物间顺风向动力干扰效应进行研究。

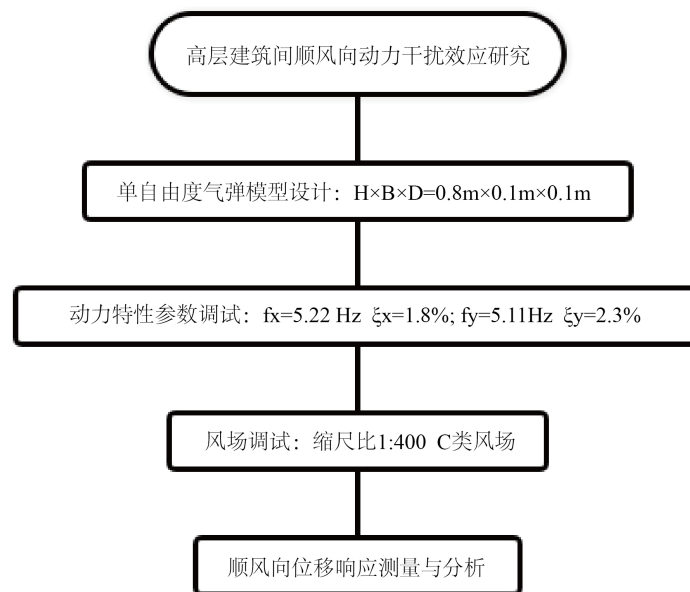
## 2. 试验概况

### 2.1. 设备概况

本次试验在湖南科技大学风工程试验研究中心进行。该试验室为水平直流吸入式风洞,风洞试验段全长 21 m,截面尺寸为 4.0 m × 3.0 m,试验段流场品质良好,风速连续可调范围在 0~30 m/s,风速变化的不均匀性<1%,平均气流偏角为 0.25°,试验段尾部设置转盘可实现 360°旋转。试验技术如图 1。



(a) 湖南科技大学风工程试验研究中心



(b) 试验设计

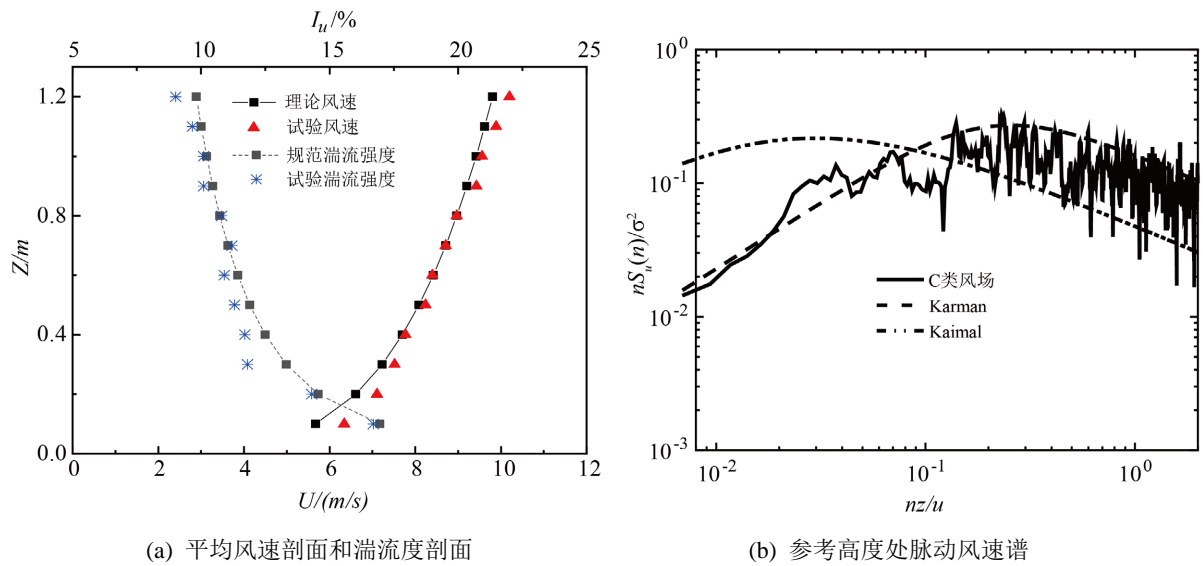
**Figure 1.** Experimental design and site**图 1.** 试验设计及场地

## 2.2. 风场模拟

通过在试验段上游位置合理布置粗糙元、尖劈等装置来模拟目标风场。采用眼镜蛇风速仪来测量参考高度处风速和湍流度等参数剖面。本文中风场按照我国的《建筑荷载规范》[12]采用指数率来描述风剖面，平均风速随高度变化的规律为：

$$\left( \frac{V_{(z)}}{V_b} \right) = \left( \frac{z}{Z_b} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中： $V_b$  为标准参考高度处的平均风速； $z$  为距离地面的高度； $V_{(z)}$  为  $z$  高度处的平均风速； $Z_b$  为标准参考高度，我国规范取 10 m 高度， $\alpha$  为地面粗糙度指数。本次试验选择在 C 类风场条件下进行，风场缩尺比为 1:400，试验中参考高度取模型高度  $H$  为 0.8 m (对应实际高度 320 m)，风场调试时参考高度处来流的平均风速为 10 m/s。风场参数见图 2。



**Figure 2.** Parameters of the simulated wind field  
**图 2.** 模拟风场

### 2.3. 模型制作与试验工况

单自由度气弹模型主要由下部骨架和上部气动外衣组成。骨架主要用铝合金和 Q235 钢制成，上部外衣则采用 abs 板制作而成。底部的万向轴限制模型扭转方向的运动，使得上部结构只能在水平方向发生振动。通过改变弹簧的参数来调节结构的阻尼比和频率。试验所用的单自由度气弹模型选取缩尺比为 1:400，模型尺寸 0.8 m × 0.1 m × 0.1 m，模型实体如图 3 所示，施扰建筑则是等尺寸的刚性模型。本文通过静力张拉法进行动力特性试验，得到 x 方向频率  $f_x = 5.22$  Hz，阻尼比为 1.8%；y 方向频率  $f_y = 5.11$  Hz，阻尼比为 2.3%。



**Figure 3.** The actual model  
**图 3.** 实际模型

为了研究间距比对干扰效应的影响，试验时施扰建筑按图 4 所示的坐标进行移动，移动范围为顺风向( $S_y = 0 \sim 10b$ )，横风向( $S_x = 0 \sim 10b$ )。图中 A 为目标建筑被固定在坐标原点，B 为施扰建筑可自由移动，

此时两建筑物相当于串联布置工况，逆时针旋转  $90^\circ$  即可得到并列布置工况，总共进行 20 个位置工况的试验。

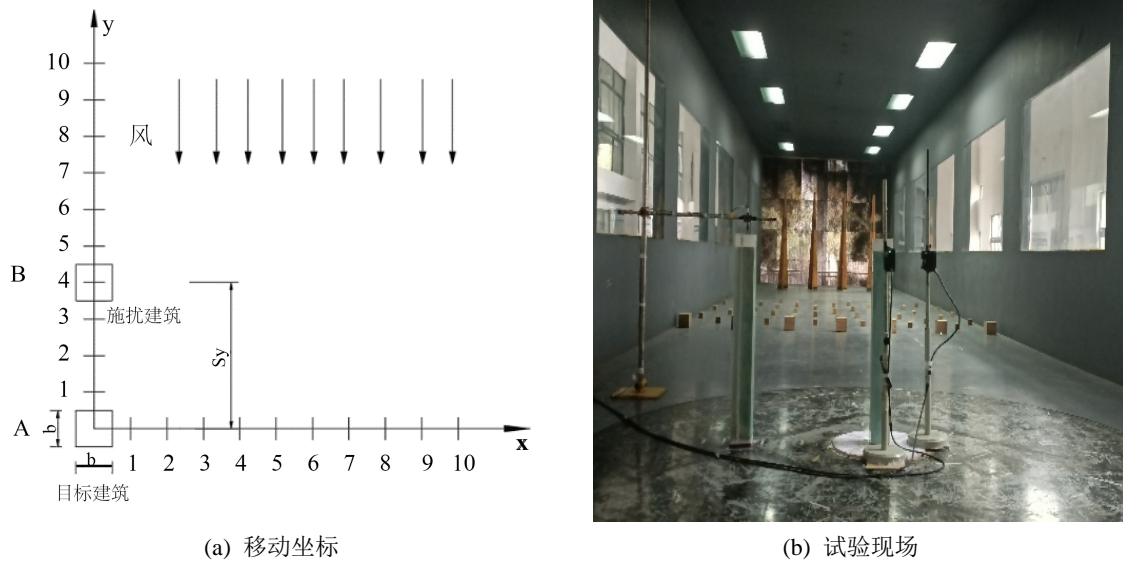


Figure 4. Test conditions

图 4. 试验工况

试验风速段选取  $3 \text{ m/s} \sim 10 \text{ m/s}$ ，对应折减风速段为  $5.7 \text{ m/s} \sim 19.6 \text{ m/s}$ 。折减风速计算见表 1。一般在孤立工况下，来流风速小于涡激共振临界风速时气动阻尼比为正值，抑制横风向振动；当来流风速大于临界风速时气动阻尼比为负值，放大横风向振动[13]。而加入施扰建筑后，气动阻尼比的变化更为复杂，干扰效应情况也更为复杂。折减风速计算公式如下：

$$U_R = \frac{U_H}{f_n b} \quad (2)$$

式中： $U_H$ 代表模型顶部风速， $f_x$ 、 $f_y$ 即  $x$  和  $y$  方向的频率。

Table 1. Comparison table between reduced wind speed and test wind speed

表 1. 折减风速与试验风速对照表

试验风速(m/s)	x 轴折减风速(m/s)	y 轴折减风速(m/s)
3	5.7	5.9
4	7.7	7.8
5	9.6	9.8
6	11.5	11.7
7	13.4	13.7
8	15.3	15.7
9	17.2	17.6
10	19.2	19.6

### 3. 试验结果与讨论

本章中气动弹性模型试验的干扰因子  $IF$  表达式:

$$IF = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  和  $\sigma_0$  分别代表受扰状态和孤立状态模型顺风向顶部位移响应均方根,  $U_H$  代表模型顶部风速。  $f_x$ 、 $f_y$ , 即  $x$  和  $y$  方向的频率。  $IF > 1$  表示施扰建筑的存在会放大目标建筑的响应, 而  $IF < 1$  表示施扰建筑的存在会减小目标建筑的响应。

#### 3.1. 串列布置干扰效应

在串列布置( $S_y = 0 \sim 10b$ )时, 图 5 为顺风向位移干扰因子变化情况。从图上可知, 整体上来看, 干扰效应主要表现出放大响应的效果。当施扰建筑在间距比  $L = 0b \sim 2b$  时, 由于施扰建筑处于目标建筑前端, 提高了目标建筑前端的来流紊流度, 导致所有折减风速下  $IF > 1$ , 放大了目标建筑顺风向响应, 其中最大值达到 1.517; 当施扰建筑在间距比  $L = 3b \sim 6b$  时, 目标建筑处于上游施扰建筑的尾流边界中, 施扰建筑的旋涡脱落增加了尾流中的脉动成分, 使得湍流度增大, 导致施扰建筑在  $L = 5b$  时出现最大值 1.595; 当施扰建筑在间距比  $L = 7b \sim 10b$  时, 随着间距比的增加, 上游建筑的尾流和涡脱作用减弱, 干扰效应也随之减弱, 但仍表现出放大效应。

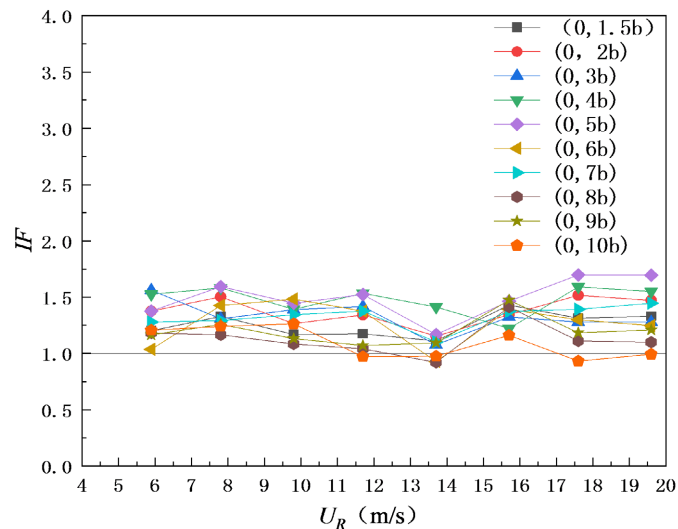


Figure 5. String interference factors

图 5. 串列干扰因子

随着折减风速的增大干扰效应也表现出一定的差异, 在  $U_R < 13$  m/s 时, 任意间距比下  $IF > 1$ , 为放大效应, 放大效应最大可达到 50%; 在  $U_R = 13.7$  m/s 时,  $IF$  值减小, 甚至在  $L = 8b \sim 10b$  区域内出现  $IF < 1$  的情况; 在  $U_R > 15$  m/s 时, 在  $L = 4b \sim 7b$  范围内, 有明显的放大效应, 由于折减风速的不断增大, 上游施扰建筑涡脱频率与目标建筑频率一致, 而发生共振, 产生较大的顺风向响应。

#### 3.2. 并列布置干扰效应

在并列布置( $S_x = 0 \sim 10b$ )时, 图 6 为顺风向位移干扰因子的分布情况。顺风向动力干扰效应主要由风



速和来流湍流决定, 并列布置时对来流的影响较小, 因此并列布置产生的放大效应远小于串联布置。从整体上看, 当施扰建筑在间距比  $L = 0b \sim 2b$  时, 目标建筑涡脱减弱, 湍流度减小,  $IF < 1$ , 干扰效应表现出抑制效应抑制效果在 20% 以内; 随着间距比的增加, 干扰效应也从抑制效应转变为放大效应, 当施扰建筑在间距比  $L = 3b \sim 6b$  时, 出现较为明显的放大效应, 其最大  $IF$  达到 1.378, 放大效应达到 30%; 当施扰建筑在间距比  $L = 7b \sim 10b$  时, 随着间距比增加, 放大效应减弱,  $IF$  值在 1.1 附近波动, 产生较小的放大效应。

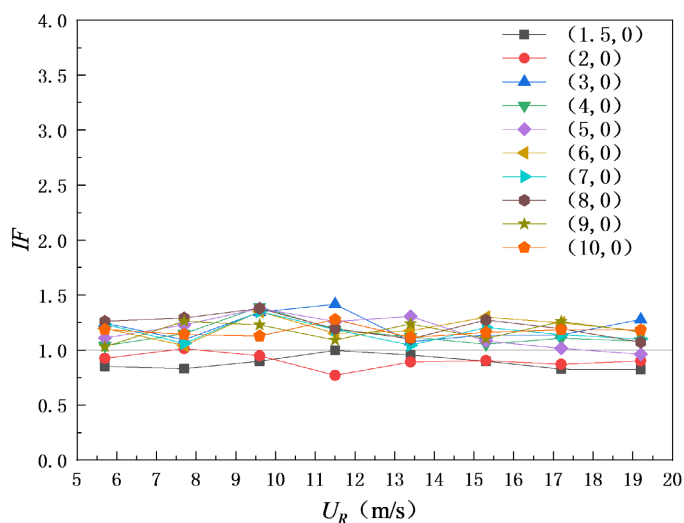


Figure 6. Parallel interference factors  
图 6. 并列干扰因子

#### 4. 结论

本文通过单自由度气弹模型试验, 研究了折减风速和间距比对两方型建筑间顺风向动力干扰效应的影响, 发现干扰效应与间距比成反比, 随间距的增大, 干扰效应反而会减弱。得出以下结论:

1) 串联布置时, 顺风向动力干扰效应主要表现为放大效应, 由于施扰建筑的存在, 增加了目标建筑的来流湍流和紊流, 使得放大效应比较明显, 且当目标建筑处于施扰建筑高速尾流边界, 放大效应可达到 50%。

2) 并列布置时, 在小间距比下湍流度的减小, 顺风向响应减弱, 顺风向动力干扰效应为抑制效应, 随着间距比增加, 干扰效应转变为放大效应, 但干扰因子数值远小于串联布置工况, 放大效应最大达到 30%。

#### 致 谢

在本研究的完成过程中, 我要由衷感谢提供支持和指导的各位。

首先, 我要向我的导师表示深深的谢意。导师在整个研究过程中给予我无微不至的关怀和专业的建议, 他的悉心指导让我受益匪浅。同时, 感谢实验室的所有成员, 他们为我提供了一个富有活力和学术氛围的环境。与他们的密切合作让我更深入地了解了研究领域的诸多方面。我还要向我的亲人和朋友表达由衷的感激之情, 他们一直是我坚实的支持者。在整个研究过程中, 他们的理解和鼓励给予了我莫大的鼓舞!

## 参考文献

- [1] Wu, T. and Wei, S. (2019) Real-Time Aerodynamics Hybrid Simulation: Wind-Induced Effects on a Reduced-Scale Building Equipped with Full-Scale Dampers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **190**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.005>
- [2] Bailey, P.A. and Kwok, K.C.S. (1985) Interference Excitation of Twin Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **21**, 323-338. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(85\)90043-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(85)90043-1)
- [3] 黄鹏. 高层建筑风致干扰效应研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2001.
- [4] 黄鹏, 顾明. 高层建筑风致动力干扰效应机理的试验研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 103-108.
- [5] 黄鹏, 顾明. 高层建筑横风向动力干扰效应的试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 53-58+81.
- [6] 谢壮宁, 顾明. 任意排列双柱体的风致干扰效应[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 32-38.
- [7] 侯方超, 全涌, 顾明. 气动弹性效应对超高层建筑横风向动力干扰效应的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 132-137.
- [8] Wang, T.H., Kwok, K.C.S., *et al.* (2022) Experimental Study on Proximity Interference Induced Vibration of Two Staggered Square Prisms in Turbulent Boundary Layer Flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **220**, Article 104865. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104865>
- [9] 谢壮宁, 倪振华. 尾流受扰下复杂体形高层建筑的风压分布特性[J]. 建筑结构学报, 2002(4): 27-31.
- [10] 吴倩云, 孙亚松, 刘小兵. 并列双方柱气动特性的干扰效应研究[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 265-269.
- [11] Lam, K.M. and Zu, G.B. (2018) Across-Wind Excitation Mechanism for Interference of Twin Tall Buildings in Staggered Arrangement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **177**, 167-185. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.019>
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准建筑结构荷载规范: GB 50009-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 曹会兰, 全涌, 顾明. 方形截面超高层建筑的横风向气动阻尼风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 18-25.