

CAARC模型间距对缝隙流流场特性的影响

莫玉凡^{1,2}

¹西南交通大学, 风工程试验研究中心, 四川 成都

²西南交通大学, 风工程四川省重点实验室, 四川 成都

Email: moyufan2020@163.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月8日; 发布日期: 2020年12月15日

摘要

为了研究建筑物间距对流场特性的影响, 本次试验采用两个缩尺比同为1:100的CAARC模型, 通过改变两个CAARC模型的间距比, 运用三维脉动风速仪测得了风速时程, 进而得到了不同间距比和高度比下并列CAARC模型周围流场的湍流积分尺度和湍流强度。并对各个测点处的湍流强度和湍流积分尺度进行了分析。结果表明: 测点4处的积分尺度随模型距比增大而减小, 湍流强度随模型间距比增大而增大; 测点1、测点2、测点3的积分尺度随模型间距比增大而增大, 湍流强度随模型间距比增大而减小。

关键词

CAARC模型, 风洞试验, 湍流积分尺度, 湍流强度

The Effect of CAARC Model Spacing on the Characteristics of Slit Flow

Yufan Mo^{1,2}

¹Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²Wind Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: moyufan2020@163.com

Received: Nov. 23rd, 2020; accepted: Dec. 8th, 2020; published: Dec. 15th, 2020

Abstract

In order to study the influence of building spacing on the flow field characteristics, two CAARC models with the same scale ratio of 1:100 were adopted in this experiment. By changing the spacing ratio of the two CAARC models, the wind speed time history can be obtained by utilizing the three-dimensional pulsating anemometer. Then, the turbulence integral scale and turbulence intensity of the flow field around the parallel CAARC model can be presented under different spacing

文章引用: 莫玉凡. CAARC 模型间距对缝隙流流场特性的影响[J]. 流体力学, 2020, 8(4): 71-79.

DOI: 10.12677/ijfd.2020.84008

ratio and height ratio. The turbulence intensity and turbulence integral scale at each measuring point were analyzed. Based on the experimental data, the following conclusion can be drawn: with the increase of model spacing ratio, the turbulence integral scale at measuring point 4 decreased and the turbulence intensity increased. Conversely, the turbulence integral scales at measuring point 1, measuring point 2 and measuring point 3 increased with the increase of model spacing ratio, and the turbulence intensity decreased with the increase of model spacing ratio.

Keywords

CAARC Model, Wind Tunnel Test, Turbulence Integral Scale, Turbulence Intensity

Copyright © 2020 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

并列双柱在实际工程中应用较多, 比如并列的烟囱和高层建筑。由于两栋相邻建筑之间存在流场干扰, 因此相对于单栋建筑的绕流流场, 其流场特性会复杂许多。而流场特性的不同对于建筑物的表面风压和风振响应有着重要影响, 因此研究双柱绕流对实际工程应用有重大意义。鉴于此, 国内外众多学者对此进行了相关研究, 其研究方法主要通过风洞试验和数值模拟展开。

陈素琴等[1]通过数值模拟的方法, 研究了并列双方柱间距比不同时流场的变化情况, 结果表明并列双方柱在间距比小于临界间距比时两柱之间的缝隙流会出现双稳态偏流现象, 并且当发生偏流时偏流边的柱体相比于非偏流边的柱体具有更大的升力和阻力。盛奇伟[2]、饶勇等[3]和马金英[4]也通过数值模拟方法发现了双稳态偏流现象的存在。吴倩云等[5]通过风洞试验方法分析了并列双柱间距比对风压系数和升阻力系数的影响, 结果表明当间距比 $1.2 \leq L/D \leq 2.5$ 时, 其对并列方柱的平均风压系数的影响明显; 当 $L/D \geq 2.5$ 时, 其对平均风压系数、平均阻力系数和脉动升力系数的影响均不明显。韩宁等[6]通过风洞试验研究了间距比对两并列高层建筑局部风压干扰特性的影响, 结果表明随着间距比的增大, 平均风压系数和脉动风压系数的干扰因子的最大值在狭缝面和外侧面均呈现出减小的趋势, 在迎风侧和背风侧呈现出增大的趋势。Karthik 等[7]等通过数值模拟的方法研究了间距比对并列双柱横风下风振的影响, 结果表明, 与较小的间距比相比, 间距比($L/D = 4.5$)的柱体产生的响应最小。Yen 等[8]通过改变双方柱的间距比, 对双方柱后的尾流结构进行了划分。王小华等[9]通过大涡模拟的方法发现在边界条件完全对称的情况下, 对称点的压应力频谱并不相同。魏英杰等[10]通过大涡模拟的方法发现在对称边界条件下, 双方柱绕流运动参量的时域过程虽然是不对称的, 但频域过程却是对称的。赵小军等[11]通过大涡模拟方法, 研究了方柱绕流的速度场和涡量场。谢壮宁等[12]通过风洞试验方法, 比较了三并列方柱与双并列方柱在不同间距比下的干扰效应, 结果表明并列三方柱间的干扰响应明显高于双方柱并列。

前人的研究多为并列双柱间距比对流场形态、双柱风压系数与升阻力系数以及对风振响应的影响, 很少研究间距比对两柱之间缝隙流脉动风参数的影响。因此, 本文通过风洞试验, 对并列双柱缝隙流的脉动风参数进行了研究, 得到了不同高度比下脉动风参数随间距比变化的规律。

2. 试验概况

2.1. 风场模拟

试验在西南交通大学 XNJD-3 大气边界层风洞中完成, 该风洞建成于 2008 年, 是一座回流式低速风

洞, 其各项技术指标均达到世界先进水平, 也是目前世界上最大的边界层风洞。风洞试验段长 36 米, 宽 22.5 米, 高 4.5 米, 风速范围从 1.0 m/s 至 16.5 m/s 连续可调。采用尖劈、挡板与粗糙元技术模拟地表风场, 利用三维脉动风速仪测量风速时程, 风速仪采样频率为 1024 Hz, 采样时长为 120 s。根据《建筑工程风洞试验方法标准》(JGJ/T338-2014) [13], B 类风场平均风速剖面指数 α 取 0.15, 对应来流的风速剖面和湍流度剖面的模拟结果如图 1。由图 1 可知, 在试验高度范围内除在局部试验值偏离标准值外, 总体上与标准值相吻合, 可视为满足规范要求。其中 U 为 Z 高度处的平均风速, $U_{2H/3}$ 为参考高度处的平均风速, 参考高度为 $2H/3$, H 为模型高度。

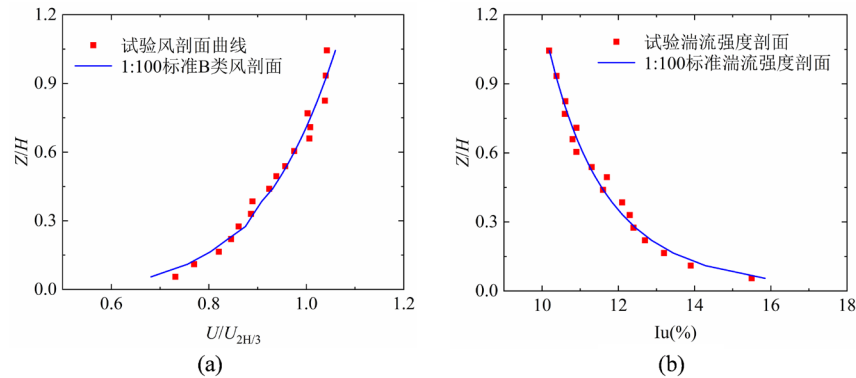


Figure 1. Average wind speed profile and turbulence intensity profile. (a) Average wind speed profile; (b) Turbulence intensity profile

图 1. 平均风速剖面与湍流度剖面。(a) 平均风速剖面; (b) 湍流度剖面

2.2. 模型设计与工况布置

本次试验采用两个 CAARC 标准模型, 制作材料为普通木材, 通过在内部设置加劲肋以保证其刚度, 试验模型几何缩尺比为 1:100, 模型尺寸为 45.72 cm (D) \times 30.48 cm (B) \times 182.88 cm (H)。图 2 为试验模型。本次试验均在 0° 风向角下进行, 并且两个模型均选择长边为迎风面, 采用五个不同的模型间距, 分别为 0.3 m、0.5 m、0.8 m、1.0 m 和 1.2 m, 则每个间距对应的间距比 L/D 为 0.66、1.09、1.75、2.19 和 2.62。本次试验共布置了六个测点, 其测点布置如图 3 所示。其中 0 号测点为来流方向未受到模型干扰的位置, 测点 1、测点 2、测点 3、测点 4 和测点 5 的两两间距均为 $B/2$, B 为模型宽度, 测点 4 为模型间距的正中心位置, 测点 3 为模型间距前缘的中点, 测点 5 为模型间距后缘的中点。分别测得了每个测点在各个间距下 4 个不同高度处的风速时程, 高度 h 分别为 $1/4H$ 、 $1/2H$ 、 $2/3H$ 和 H 。

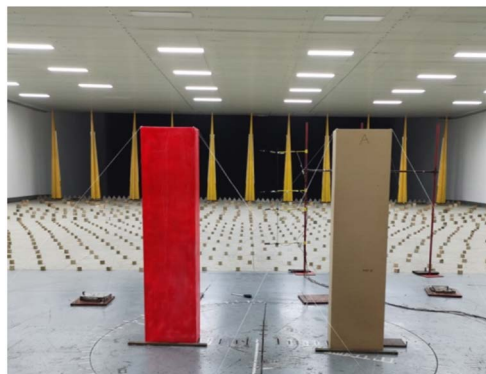


Figure 2. Wind tunnel test model

图 2. 风洞试验模型

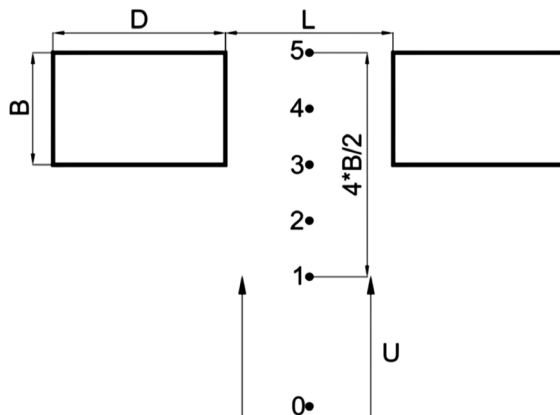


Figure 3. Layout of measuring points
图 3. 测点布置图

3. 试验参数定义

3.1. 湍流积分尺度

湍流涡旋在大气边界层中可以被视为频率为 n 的周期脉动，与波相似，定义涡旋的波长 $\lambda = U/n$ ，其中 U 为平均风速，那么涡旋大小的尺度就是波长。脉动风中湍流涡旋平均尺寸的量度是湍流积分尺度，对应于与纵向、横向和垂直方向脉动速度分量 u 、 v 和 w 有关的三个方向，一共有 9 个湍流积分尺度，例如 L_u^x 、 L_u^y 和 L_u^z 分别量度与纵向脉动速度有关的涡旋在纵向、横向和垂直方向的平均尺寸。在数学上可以定义 L_u^x 为

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_{12}(x) dx \tag{1}$$

式中： $R_{12}(x)$ 为两个不同空间位置上纵向脉动速度 $u_1 = u(x_1, y_1, z_1, t)$ 和 $u_2 = u(x_1 + x, y_1, z_1, t)$ 的互协方差函数， t 为时间； σ_u^2 为脉动速度 u 的方差； $R_{12}(0) = \sigma_u^2$ 。同样的定义也适用于其它方向的湍流积分尺度。

湍流积分尺度是关于湍流空间相关性的参数，最好的方法是通过对空间多点进行同步测量，然后利用湍流积分尺度的定义计算，然而这种方法通常难以实现。因此在实际计算中，我们通常采用 Taylor 假设将多点测量转换为单点测量，将空间不同点的互相关函数转换成单点测量的自相关函数。Taylor 假设的定义如下：

如果湍流涡旋以平均风速 U 迁移，则脉动速度 $u(x_1, t + \tau)$ 可以定义为 $u(x_1 - x, \tau)$ ， $x = Ut$ ，这就是 Taylor 假设。根据 Taylor 假设，式(1)可改写为

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \tag{2}$$

式中： $R_u(\tau)$ 为脉动风速 $u(x_1, t + \tau)$ 的自相关函数， $R_u(0) = \sigma_u^2$ 。同理可求 L_v^x 和 L_w^x 。Flay 等[14]认为式(2)的积分上限取到自相关系数降到 0.05 的点最佳。并且庞加斌等[15]通过风洞试验证明了 Taylor 假设在大气边界层中是合理的，采用自相关函数直接积分的方法计算湍流积分尺度渐变可靠。因此本文也采用基于 Taylor 假设的自相关函数算法计算湍流积分尺度。

3.2. 湍流强度

湍流强度反映了脉动风的强度，湍流强度可以分别在 3 个正交方向上定义，但是一般认为顺风向湍流强度在大气边界层中比其他两个分量。因此本文主要考虑顺风向湍流强度，风速仪记录的统计表明，

脉动风速均方根与平均风速成比例, 因此, 定义顺风向湍流强度为

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (3)$$

4. 实验结果与讨论

为了方便比较模型影响范围内的脉动风参数和未受模型影响的脉动风参数(测点 0 处的脉动风参数)的差异, 在这里给出不同间距对于脉动风参数的干扰因子 IF , 定义如下:

$$IF = \frac{\text{受模型影响的脉动风参数}}{\text{未受模型影响的脉动风参数}}$$

干扰因子 IF 大于 1 表示模型的存在导致脉动风参数在增大, 干扰因子 IF 小于 1 表示模型的存在导致脉动风参数在减小。

4.1. 各测点积分尺度变化

4.1.1. 沿顺风向积分尺度的变化

由于模型的存在, 沿顺风向的湍流积分尺度会发生改变。图 4 给出了在高度比 $h/H = 0.5$ 时不同测点位置处的湍流积分尺度干扰因子 IF 。图 4 表明, 当高度比 $h/H = 0.5$ 时在各个模型间距比下积分尺度均沿顺风向呈现出先增大后减小的趋势, 并且均在测点 4 处取得最大值, 在其他高度比时也有相似的规律。

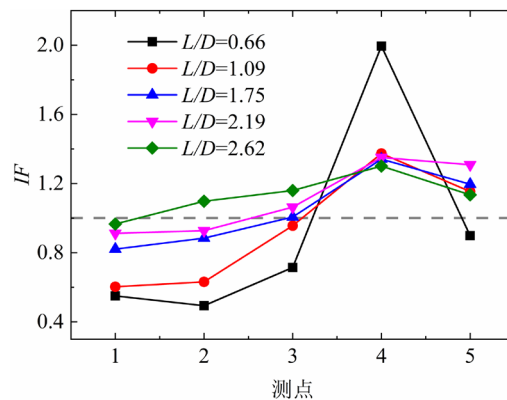


Figure 4. The integral scale of each point along the downwind direction
图 4. 沿顺风向各点积分尺度

4.1.2. 间距对各个测点积分尺度的影响

图 5 给出了各个测点在 4 个高度比下积分尺度干扰因子 IF 随模型间距比的变化情况。测点 1、测点 2 和测点 3 处的 IF 在各个高度比下均随模型间距比增大而增大; 在 $0.66 \leq L/D \leq 1.75$ 范围内变化较为明显, 而在 $1.75 \leq L/D \leq 2.62$ 范围内变化较为平缓; 在高度比 $h/H=1$ 时, IF 最大, 在高度比 $h/H = 0.5$ 时, IF 最小; 且 IF 逐渐从小于 1 增大到略微大于 1。测点 4 处的 IF 在各个高度比下均随模型间距比增大而减小; 在 $0.66 \leq L/D \leq 1.75$ 范围内变化较为明显, 而在 $1.75 \leq L/D \leq 2.62$ 范围内变化较为平缓; 且 IF 在各个高度比下均大于 1。当 $h/H = 0.25$ 时, 测点 5 处的 IF 随模型间距比增大而增大, 且在 $0.66 \leq L/D \leq 1.09$ 范围内变化明显, 在 $1.09 \leq L/D \leq 2.62$ 范围内变化较为平缓; 当 $h/H > 0.25$ 时, IF 随模型间距比的增大呈现出先增大后减小的趋势。

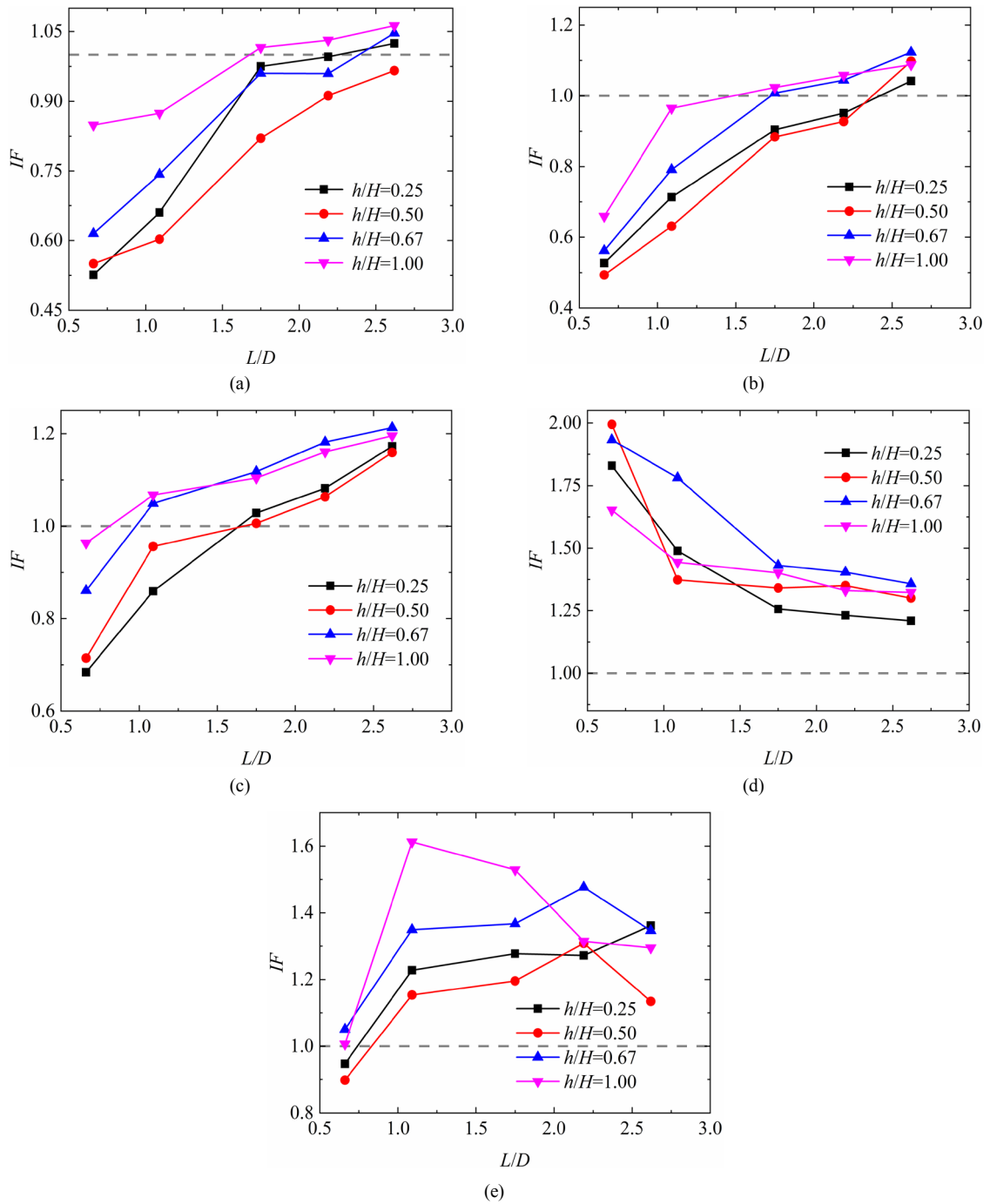


Figure 5. Downwind integral scale of each measuring point. (a) Measuring point 1; (b) Measuring point 2; (c) Measuring point 3; (d) Measuring point 4; (e) Measuring point 5

图 5. 各测点顺风向积分尺度。(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4; (e) 测点 5

4.2. 各测点湍流度变化

4.2.1. 沿顺风向湍流强度的变化

由于建筑物的干扰，沿顺风向的湍流强度会发生改变。图 6 给出了在高度比 $h/H = 0.5$ 时各个模型间距比对各个测点湍流强度干扰因子 IF 的影响。图 6 表明，当高度比 $h/H = 0.5$ 时在各个模型间距比下积

分尺度均沿顺风方向呈现出先减小后增大的趋势，并且在均在测点 4 处取得最小值，其他高度比情况下结果与此类似。

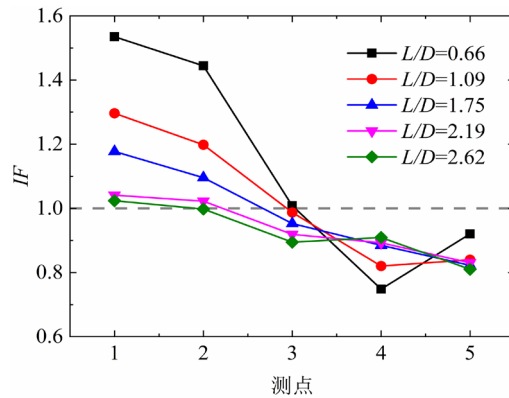
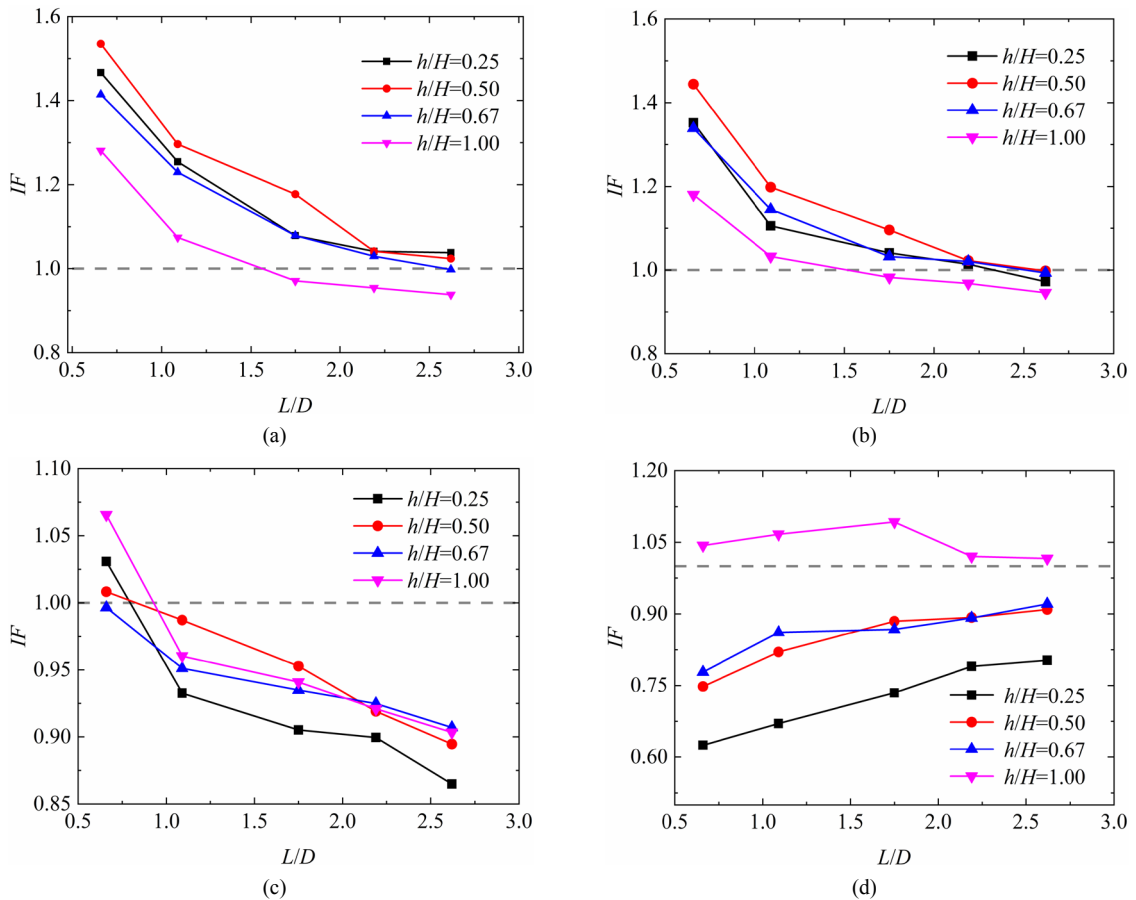


Figure 6. Turbulence intensity at each point along the downwind direction
图 6. 沿顺风向各点湍流度

4.2.2. 间距对各个测点湍流强度的影响

图 7 给出了各个测点在 4 个高度比下湍流强度干扰因子 IF 随模型间距比的变化情况。测点 1 和测点 2 处的 IF 在各个高度比下均随模型间距比增大而减小，且在 $0.66 \leq L/D \leq 1.09$ 范围内变化较为明显，而在 $1.09 \leq L/D \leq 2.62$ 范围内变化较为平缓； IF 从大于 1 逐渐减小到略小于 1；在高度比 $h/H = 0.5$ 时，



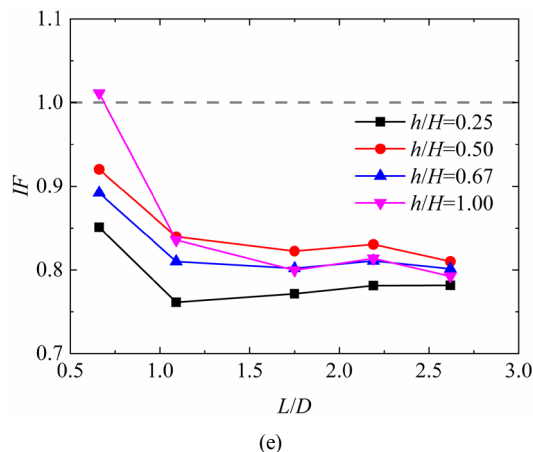


Figure 7. Downwind turbulence intensity of each measuring point. (a) Measuring point 1; (b) Measuring point 2; (c) Measuring point 3; (d) Measuring point 4; (e) Measuring point 5

图 7. 各测点顺风向湍流强度。(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4; (e) 测点 5

IF 最大, 在高度比 $h/H=1$ 时, IF 最小。测点 3 和测点 5 处的 IF 在各个高度比下均随模型间距比增大而减小, 且在 $0.66 \leq L/D \leq 1.09$ 范围内变化较为明显, 而在 $1.09 \leq L/D \leq 2.62$ 范围内变化较为平缓; 测点 3 在各个高度比下 IF 均从略大于 1 减小到小于 1, 测点 5 在除高度比 $h/H=1$ 时 IF 均小于 1。当 $h/H \leq 0.67$ 时, 测点 4 处的 IF 随模型间距比增大而增大, IF 均小于 1, 且在 $0.66 \leq L/D \leq 1.09$ 范围内变化明显; 当 $h/H=1$ 时, 测点 4 处的 IF 随模型间距比增大呈现出先增大后减小的趋势, 且 IF 均略大于 1。

5. 结论

本文通过风洞试验的方法, 对 5 种不同间距比的并列双柱进行了试验, 通过对各个测点在不同工况下的湍流积分尺度与湍流强度的对比, 可得出如下结论:

1) 测点 1、测点 2 和测点 3 在各个高度比下的积分尺度均随模型间距比增大而增大, 测点 4 处积分尺度随模型间距比增大而减小; 当 $L/D \leq 1.75$ 时, 各个测点积分尺度受模型间距比影响较大。

2) 测点 1、测点 2、测点 3 和测点 5 在各个高度比下的湍流强度均随模型间距比增大而减小; 当 $h/H \leq 0.67$ 时, 测点 4 处积分尺度随模型间距比增大而增大。当 $L/D \leq 1.09$ 时, 各个测点湍流强度受模型间距比影响较大。

3) 从测点 1 到测点 5, 湍流积分尺度先增大后减小, 且测点 4 处湍流积分尺度最大; 湍流强度先减小后增大, 且测点 4 处湍流强度最小。

上述研究结果为进一步研究发生钝体绕流时钝体周围的流场特性提供了一定的参考作用。

参考文献

- [1] 陈素琴, 顾明, 黄自萍. 两并列方柱绕流相互干扰的数值研究[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(2): 24-39.
- [2] 盛奇伟. 并列放置双方柱扰流问题的大涡模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [3] 饶勇, 倪玉山, 刘超峰. 并列双方柱绕流的 Lattice Boltzmann 模拟分析[J]. 应用力学学报, 2008(2): 192-197+352.
- [4] 马金英. 用格子 Boltzmann 方法模拟棱柱绕流问题[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [5] 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.
- [6] 韩宁, 顾明. 两并列方形高层建筑局部风压干扰特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1441-1446.
- [7] Karthik, S.K.K. and Kumaraswamidhas, L.A. (2016) Investigation on Cross Flow Characteristics over Side-by-Side Square Cylinders at Different Spacing Conditions. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 1053-1062.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.009>

- [8] Yen, S.C. and Liu, J.H. (2011) Wake Flow behind Two Side-by-Side Square Cylinders. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, **32**, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.09.005>
- [9] 王小华, 何钟怡. 二并列方柱绕流的大涡模拟[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(2): 49-53.
- [10] 魏英杰, 朱蒙生, 何钟怡. 并列双方柱绕流的大涡模拟及频谱分析[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(8): 824-830.
- [11] 赵小军, 魏文礼. 并排方柱绕流的大涡数值模拟及显示[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 469-473.
- [12] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 三并列方柱风荷载特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 290-293.
- [13] JGJ/T338-2014. 建筑工程风洞试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] Flay, R.G.J. and Stevenson, D.C. (1988) Integral Length Scales in Strong Winds below 20 m. *Advances in Wind Engineering*, **28**, 21-30. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90098-0](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90098-0)
- [15] 庞加斌, 葛耀君, 陆焯. 大气边界层湍流积分尺度的分析方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(5): 622-626.