

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:颜卫亨,王西凤,代鹏. 交错布局轻型四坡房屋群风致干扰效应研究[J]. 西安理工大学学报,2023,39(2):291-300.
YAN Weiheng, WANG Xifeng, DAI Peng. Research on wind-induced interference effect of staggered layout lightweight four-slope buildings[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2): 291-300.

交错布局轻型四坡房屋群风致干扰效应研究

颜卫亨, 王西凤, 代鹏

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 为研究交错布局轻型四坡房屋群风致干扰效应,利用计算流体动力学软件 Fluent,结合 TTU 低矮建筑实测结果,分析与探讨网格数量、湍流模型、离散格式等技术参数。根据轻型四坡房屋使用情况,设计 8 个四坡房屋交错布局的布置方式,以反映群体布置疏密程度的房屋间距与房屋平面对应尺寸之比的 5 种纵、横向疏密系数,3 种风向角为参数,进行共 75 种工况的目标房屋表面风压分布规律数值模拟计算。在此基础上,引入干扰因子量化交错布局目标房屋相对于单体房屋的受扰程度,得到适用于交错布局轻型四坡房屋群抗风设计的风荷载体型系数,为轻型四坡房屋群规划布局和结构设计提供理论依据。分析表明交错布局轻型四坡房屋群间距小于临界间距时,群体风致干扰效应不可忽略,实际设计布局时应引起重视。

关键词: 四坡房屋群; 交错布局; 数值模拟; 干扰效应; 干扰因子; 体型系数

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)02-0291-10

Research on wind-induced interference effect of staggered layout lightweight four-slope buildings

YAN Weiheng, WANG Xifeng, DAI Peng

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the wind-induced interference effect of lightweight four-slope roof buildings under staggered layout, the reasonable setting of technical parameters such as mesh number, turbulence model, and discretization format are analyzed and discussed using the CFD software Fluent based on the field measurement results from the TTU low-rise building. According to the practical use of four-slope roof building, a group layout pattern is designed with 8 four-slope buildings under staggered layout and defined density coefficient reflecting the degree of building group layout density which is the ratio of building interval to the corresponding dimension of building. Thus, 3 wind direction angles, 5 vertical and 5 horizontal density coefficients are taken as parameters, with a numerical simulation calculation conducted to study the distribution law of wind pressure on the surface of target building under a total of 75 working conditions. On this basis, the interference factor is introduced to quantify the degree of wind-induced interference of target building under staggered layout compared with single layout, with the wind load shape coefficient suitable for wind-resistant design of lightweight four-slope roof buildings under staggered layout obtained that can provide theoretical basis for planning layout and structural design. The analysis result shows that the wind-induced interference effect of lightweight four-slope roof buildings under staggered layout cannot be ignored when building interval is less than critical

收稿日期: 2020-07-23; **网络首发日期:** 2021-09-03

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210903.0847.002.html>

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2004E204);中央高校科研专项资金资助项目(创新团队项目 2013G328401)

第一作者: 颜卫亨,男,教授,研究方向为结构工程及低矮建筑抗风雪。E-mail: yanwh@chd.edu.cn

通信作者: 王西凤,男,硕士生,研究方向为低矮建筑抗风。E-mail: 2018128029@chd.edu.cn

interval, for which sufficient attention should be paid to the actual layout design.

Key words: four-slope roof buildings; staggered layout; numerical simulation; wind-induced interference effect; interference factor; shape coefficient

轻型四坡房屋布置方便快捷、机动性强,广泛应用于野营房屋、灾后安置和大型工程项目临时用房中,同时也属于风敏感低矮房屋,风荷载往往是其控制荷载。而此类房屋使用时常以群体布置出现,交错布局也是群体布置的常见形式。群体布置当房屋间距小于临界间距时,房屋之间存在风致干扰效应。而我国《建筑结构荷载规范》^[1]仅规定了平面矩形高层建筑相互干扰的群体效应,对低矮建筑的群体风致干扰效尚未明确规定。国外荷载规范对低矮建筑群风致干扰效应也未见取值方法^[2-3]。国内外关于群体干扰效应的研究大多针对大型冷却塔、高层建筑和其他形体低矮房屋^[4-9],对于轻型四坡房屋在交错布局下的群体干扰效应尚未有相关研究。实际应用中若仅参考单体房屋体型系数进行交错布局抗风设计,则存在安全隐患。

本文通过与 TTU 实测结果对比验证数值模拟可行性,确定数值风洞主要技术参数,利用数值模拟方法进行交错布局四坡房屋群风致干扰效应研究,以期有效应对干扰效应的不利影响,为轻型四坡房屋群体规划布局和结构设计提供参考依据。

1 数值模拟基础性研究

1.1 边界条件的设定

数值模拟时计算域入口设置为速度入口,出口采用完全出流,侧壁和顶面设置为对称边界,流场地面和模型表面设置为无滑移壁面^[6, 10-11]。选取非平衡壁面函数能更好地模拟气流在钝体周围的碰撞、分离、再附、回流和旋涡等复杂流动现象。

大气边界层平均风剖面按文献^[1]采用指数率描述如下式:

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \tag{1}$$

数值模拟时与 TTU 实测对应,A 类地貌取 $\alpha = 0.12$, U_0 取离地 10 m 高度处平均风速 10 m/s。

流域入口湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 取值如下:

$$k = 1.5 (U_{10})^2 \tag{2}$$

$$\epsilon = 0.09^{0.75} k^{1.5} / l \tag{3}$$

式中: $l=0.07 L$ 代表湍流积分尺度,其中 L 为建筑物特征尺寸;湍流强度 I_u 参照文献^[3]给出的取值范围。

利用 UDF 编程将以上公式与 Fluent 作接口导入。

1.2 计算域大小

数值模拟精度与计算域大小密切相关,计算域太大会增加网格数量,影响计算效率,太小则无法准确模拟建筑物风压分布特性。对于低矮建筑,若其高度为 H (群体布置为最高建筑物高度 H_{max}),计算域入口距建筑迎风面应大于 $4\sim 5 H$,顶壁和侧壁与建筑顶面和侧面的距离应大于 $4 H$ 。建筑模型背风面后的气流流动应能够充分发展,通常情况下模型背风面与出口的距离应大于 $9\sim 10 H$ 。同时,数值模拟时模型的阻塞比不宜大于 5% ^[6, 11-12]。

基于计算流体动力学软件 Fluent,控制阻塞比小于 3% ,建立三种不同尺寸的计算域对图 1 中 90° 风向角下 TTU 低矮建筑模型横向中轴线 1~11 监测点进行数值模拟,结果见图 2。图 2 中,为提高计算效率,在首先保证计算精度的基础上,计算域尺寸选用 $150\text{ m}\times 100\text{ m}\times 60\text{ m}$ 精度较高。

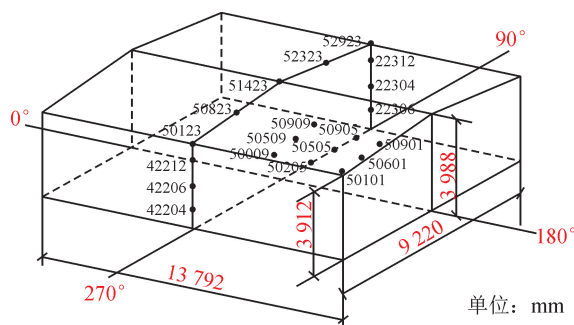


图 1 TTU 低矮建筑尺寸及典型测点分布
Fig. 1 Actual size of TTU low-rise building and position of typical measuring point

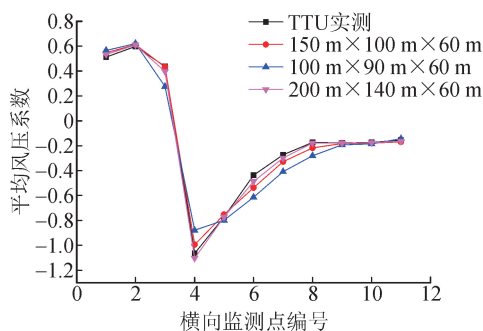


图 2 不同计算域大小下 TTU 模型 1~11 测点平均风压系数
Fig. 2 Average wind pressure coefficient of TTU model 1~11 under different calculation domain sizes

1.3 网格划分方式及数量

网格是 CFD 数值模拟和分析的载体,也是分析模型的几何表达方式。网格分为结构化网格和非结

构化网格,结构化网格节点排列有序、相邻点之间的关系明确,网格适应了几何体的规则形状。非结构化网格无法用固定法则对节点位置加以命名,网格生成复杂,但其对复杂边界有极强适应性和有效性。本文为提高计算效率,采取在模型所在的核心区采用灵活的非结构化网格,在外围区域采用计算效率高的结构化网格的分区混合网格划分形式^[11-12]。

选择计算域大小为 150 m×100 m×60 m,对三种网格数量下 TTU 模型进行数值模拟计算,所得结果见图 3。由图 3,网格数量越大,数值模拟与实测结果越接近,但网格过密则计算耗时过长,考虑计算精度同时兼顾计算效率,取网格数量为 224.6 万,数值模拟时控制网格数量在 2.5 个/m³左右。

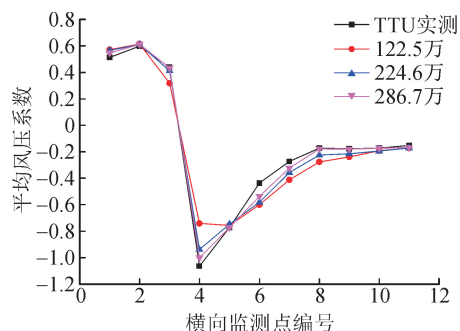
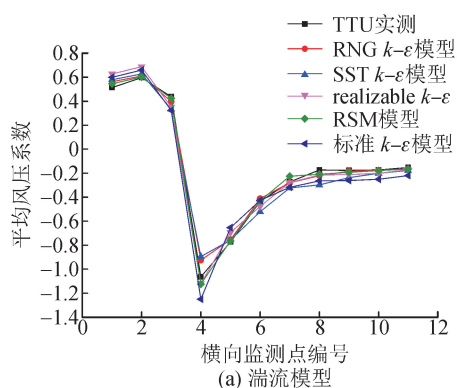


图 3 不同网格数量下 TTU 模型 1~11 测点平均风压系数
Fig. 3 Average wind pressure coefficient of TTU model 1 ~ 11 under different numbers of grid

1.4 湍流模型和离散格式

控制单参数变化,对不同湍流模型和离散格式下 TTU 模型进行数值模拟,结果见图 4。

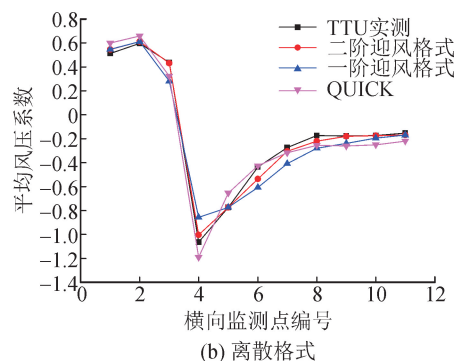


图 4 不同湍流模型及离散格式下 TTU 模型 1~11 测点平均风压系数

Fig. 4 Average wind pressure coefficient of TTU model 1 ~ 11 under different turbulence models and discrete schemes

由图 4(a),除标准 $k-\epsilon$ 模型在背风向误差偏大外,其他 4 种湍流模型均能较好的预测各监测点的风压系数,对比知 RNG $k-\epsilon$ 模型精度较高,本文湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型。由图 4(b),三种对流项离散格式中,一阶迎风格式数值耗散较大,作定量分析误差较大,而二阶迎风格式计算精度较高,故本文采用二阶迎风格式。

综上,采用数值模拟方法对 TTU 低矮建筑进行分析与实测数据吻合较好,说明利用数值模拟对低矮房屋表面风压分布规律进行研究是可行有效的。

2 轻型四坡房屋群数值模拟

2.1 研究对象

本文研究对象为应用较广泛的轻型四坡房屋,房屋外形和三维尺寸见图 5(a)。群体布置时房屋表面较单体会出现放大和遮挡效应,气流在房屋表面的碰撞、分离、再附、回流和旋涡等流动现象比单体表面复杂。结合四坡房屋表面物理分区和双轴对称特点,选取 0°,45°,90°三种风向角并对房屋表面

分区见图 5(b)所示。

2.2 群体交错布局及参数选取

由文献[13],群体布置时房屋之间应有大于 2 m 的人行通道。经对图 6(a)中 0°风向角下三个四坡房屋交错布置的试算,由图 6(b)知,房屋间距达到 24 m 时,房屋表面各区平均风荷载系数与单体基本相同,因此可认为 24 m 为群体干扰效应消失的无干扰间距,房屋间距布置在 2~24 m 之间。

结合轻型四坡房屋使用情况,设计了如图 7 所示 8 个四坡房屋交错布局的布置方式。为反映群体布置的疏密程度,探讨群体风致干扰效应随疏密程度的变化规律,根据交错布局时四坡房屋间距与房屋平面对应尺寸的相对关系,定义无量纲的疏密系数为:

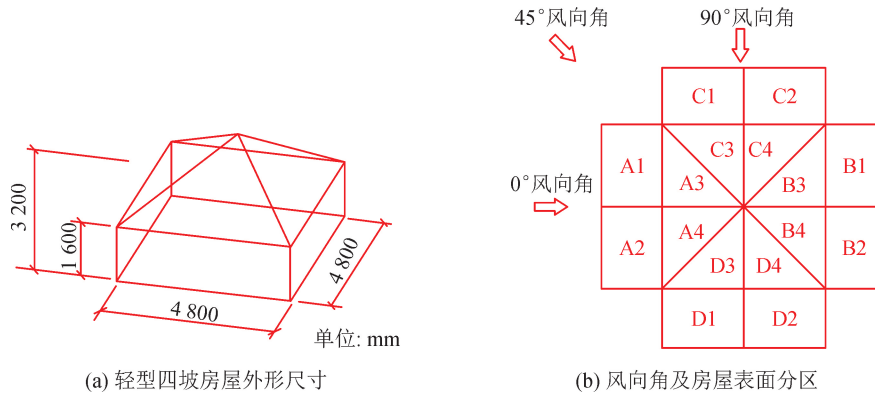
$$R_x = S_x/L = 0.5, 1, 1.5, 3, 5 \quad (4)$$

$$R_y = S_y/B = 0.5, 1, 1.5, 3, 5 \quad (5)$$

式中: R_x 、 R_y 表示横、纵向疏密系数; S_x 、 S_y 为交错布局的横、纵向间距,取 $S_x = 0.5L, L, 1.5L, 3L, 5L, S_y = 0.5B, B, 1.5B, 3B, 5B$,其中 L 和 B 分别为房屋长度和宽度。图 7 中黑体房屋为所研究的

目标房屋,各风向角下处于迎风前排的房屋为目标

房屋一,处于后排的为目标房屋二。

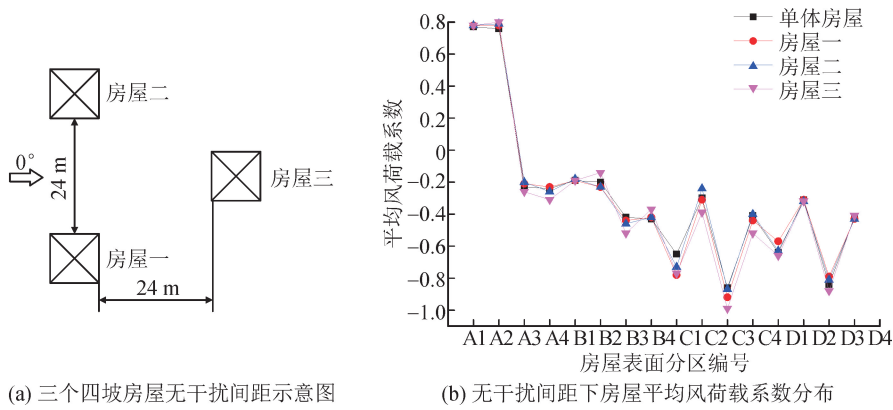


(a) 轻型四坡房屋外形尺寸

(b) 风向角及房屋表面分区

图 5 轻型四坡房屋

Fig. 5 Lightweight four-slope building dimension

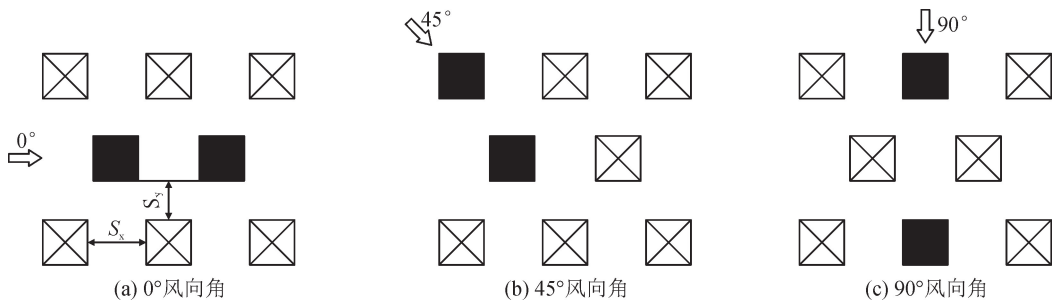


(a) 三个四坡房屋无干扰间距示意图

(b) 无干扰间距下房屋平均风荷载系数分布

图 6 交错布局四坡房屋群无干扰间距

Fig. 6 Non-interference distance of staggered layout four-slope buildings



(a) 0°风向角

(b) 45°风向角

(c) 90°风向角

图 7 四坡房屋交错布局

Fig. 7 Staggered layout of four-slope buildings

2.3 风压系数等值线

以 3 个风向角和 5 种横、纵向疏密系数为参数,进行 75 种工况数值模拟,得到目标房屋表面风压系数等值线。限于篇幅,本节取 90°风向角时最具代表性的 $R_x=0.5, R_y=0.5$ 和 $R_x=3, R_y=5$ 时的目标房屋表面风压系数等值线云图进行分析,目标房屋各区域风压系数等值线见图 8~11。

由图 8,90°风向角下,单体房屋迎风山墙 C 区受正压控制,风压系数呈环状分布,迎风山墙上部出现正压极值 0.9,由中心向外侧递减,直至迎风山墙边缘处出现负压,负压极值为-0.2。目标房屋一 C 区风压分布基本不受疏密系数变化的影响。当 $R_x=R_y=0.5$ 时,由于上游及同排房屋的遮挡和干扰,与单体房屋相比,目标房屋二迎风山墙风压系数

出现变号现象,表现为整个 C 区受负压控制,负压极值为-0.36。当 $R_x=3, R_y=5$ 时,由于房屋群布

置间距较大,目标房屋二迎风山墙风压分布规律与单体房屋相似,但风压系数值较单体房屋为小。

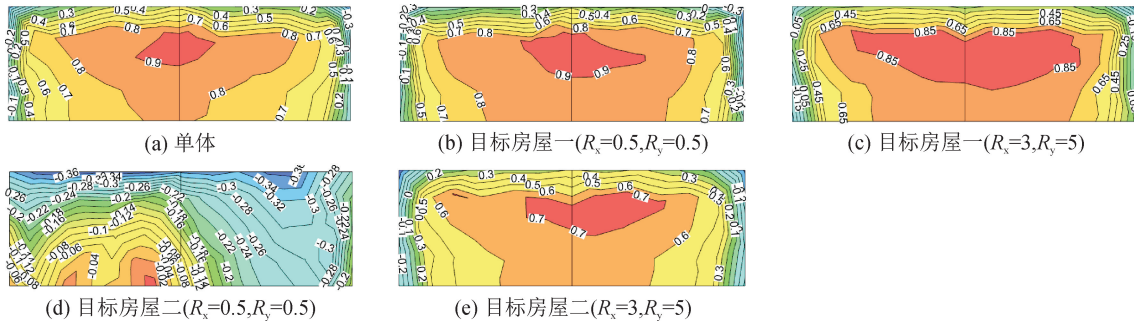


图 8 90°风向角典型疏密系数下目标房屋迎风山墙风压系数等值线

Fig. 8 Contour of wind pressure coefficient on windward gable of target building under typical density coefficient of 90 degree wind direction

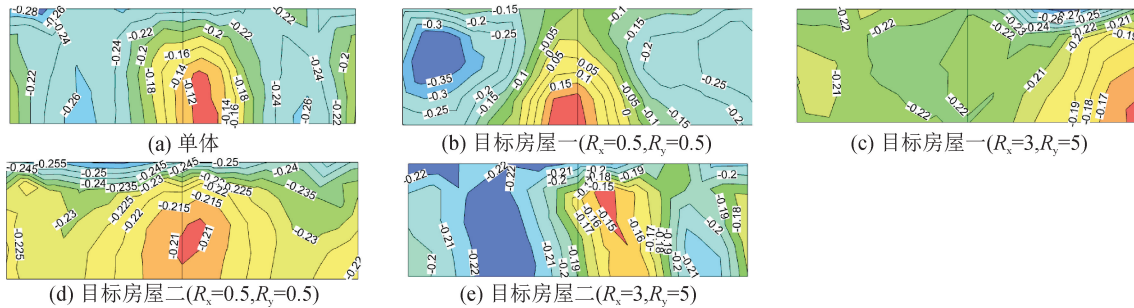


图 9 90°风向角典型疏密系数下目标房屋背风山墙风压系数等值线

Fig. 9 Contour of wind pressure coefficient on leeward gable of target building under typical density coefficient of 90 degree wind direction

由图 9,单体房屋背风山墙 D 区受负压控制,负压极值-0.25。交错布局下,当 $R_x=R_y=0.5$ 时,目标房屋一背风面主要承受负压,D1 和 D2 区负压值外侧较大。但由于房屋布置较密,流经背风面的气流受到后排房屋的碰撞后形成回流,在目标房屋一背风面中下部出现小块低正压区域,从而使其背风面平均风荷载系数绝对值较单体减小。 $R_x=3, R_y=5$ 时目标房屋一 D 区风压分布与单体近似。不同疏密系数下目标房屋二 D 区风压分布与单体近似。

由图 10,单体房屋屋面受负压控制,负压极值-1。流经屋面的气流在迎风屋面 C 区屋脊线附近出现较强的气流分离,屋脊线处出现高负压区域,然后经屋脊线向后发展并再次附着到侧风屋面和背风屋面上,形成再附。 $R_x=R_y=0.5$ 时,目标房屋一同排及后排其他房屋的存在抬升了其迎风屋面屋脊线处出现分离而向后发展的气流,减弱了气流在侧风和背风屋面的再附程度,目标房屋一侧风屋面 A、B 区及背风屋面 D 区风压系数绝对值较单体有

所减小,出现遮挡效应,D3 和 D4 区遮挡效应最为明显;但对于目标房屋二,来流经上游房屋抬升使其迎风屋面 C3 和 C4 区风压系数绝对值较单体有所增大,出现了放大效应。 $R_x=3, R_y=5$ 时,由于房屋群间距较大,两目标房屋屋面风压分布与单体近似。

由图 11,单体房屋侧面 B 区受负压控制,侧面上游 B1 区边缘处风压系数变化梯度大,B1 区风压系数绝对值也较大,负压极值-0.85,侧面下游 B2 区负压值较小,梯度变化均匀。 $R_x=R_y=0.5$ 时,在交错布局下,房屋布置较密,目标房屋一与两侧其他房屋间形成狭窄气流通道,此时顺风向纵向间距较小,气流流经此通道时形成急流出现峡谷效应,导致目标房屋一 B1、B2 区风压系数较单体有所增大,出现了放大效应;同时,由于上游房屋的干扰和遮挡,目标房屋二 B 区出现了遮挡效应,B1 区上游脚部出现小块低正压区域。 $R_x=3, R_y=5$ 时,目标房屋 B 区风压分布与单体相似。

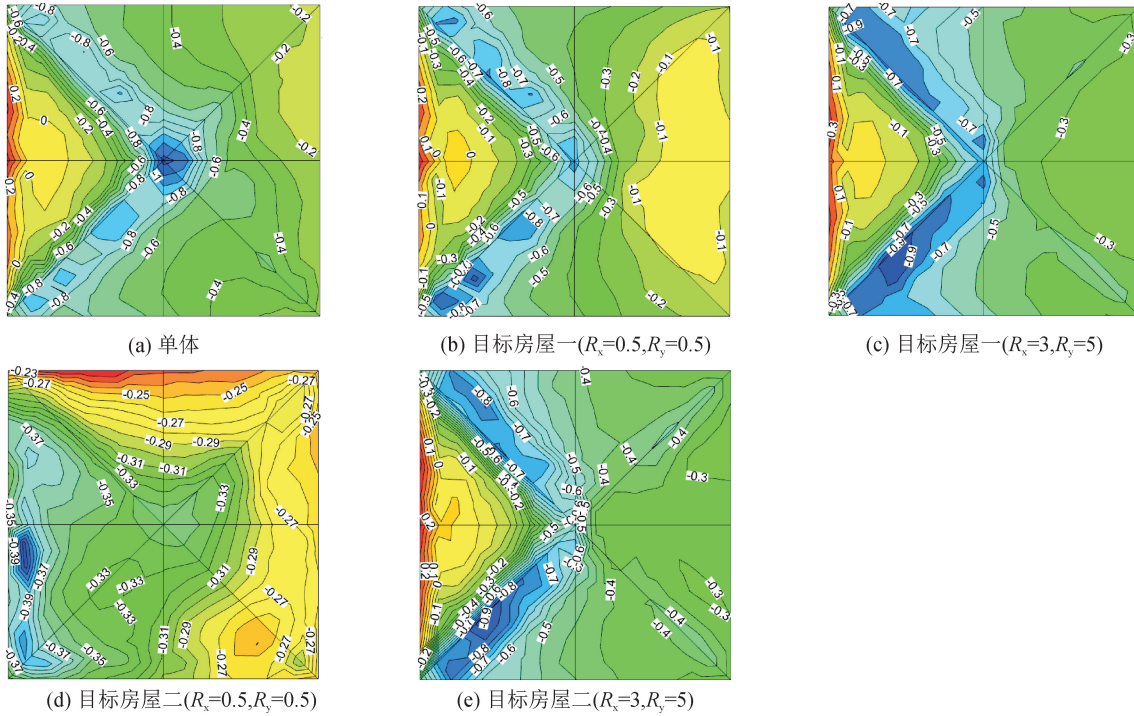


图 10 90°风向角典型疏密系数下目标房屋屋面风压系数等值线
 Fig. 10 Contour of wind pressure coefficient on roof of target building under typical density coefficient of 90 degree wind direction

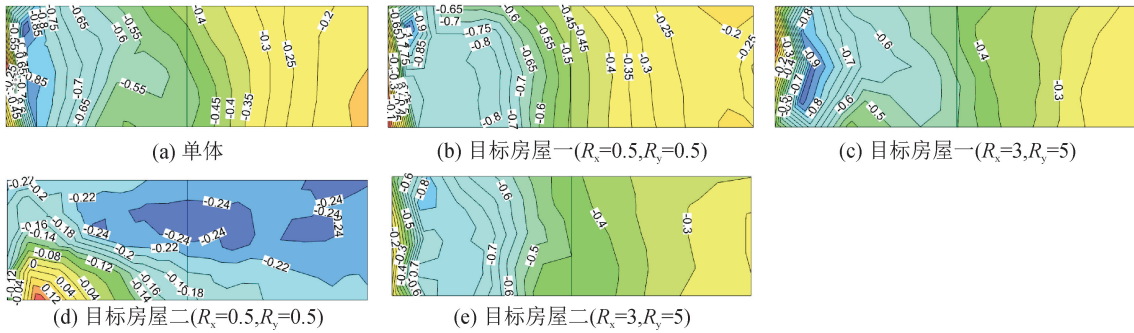


图 11 90°风向角典型疏密系数下目标房屋侧面风压系数等值线
 Fig. 11 Contour of wind pressure coefficient on lateral side of target building under typical density coefficient of 90 degree wind direction

3 风致干扰效应

为分析群体交错布局时的风致干扰效应,引入干扰因子 IF_μ 量化交错布局下目标房屋相对于单体房屋的受扰程度。干扰因子 IF_μ 定义为:

$$IF_\mu = \frac{\mu_{SA}}{\mu_{SI}} \quad (6)$$

式中: μ_{SI} 为单体房屋的平均风荷载系数; μ_{SA} 为受扰后房屋的平均风荷载系数。

IF_μ 绝对值大于 1, 说明出现放大效应; IF_μ 绝对值小于 1, 说明出现遮挡效应; IF_μ 小于 0, 说明受扰前后风压反向; IF_μ 绝对值在 $[0.95, 1.05]$ 时, 认为无干扰^[6,14]。本节以 45°和 90°风向角时为例对风致干扰效应展开分析。

3.1 45°风向角干扰效应

45°风向角下目标房屋干扰因子变化趋势分别见图 12 和图 13。

见图 12, 交错布局下目标房屋一表面各区域既有放大效应也有遮挡效应。当疏密系数较小, $R_x=0.5$ 和 $0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时干扰效应最为显著。此时, 目标房屋表面大部分区域均出现较强的放大效应, 如迎风屋面 A4、C3 区, 迎风山墙 C2 区, 背风山墙 D2 区及背风屋面 D3 区干扰因子最大值均大于等于 1.38。该风向角下最大干扰因子 1.68 出现在 $R_x=1.5$ 且 $R_y=3$ 时的 C4 区, 平均风荷载系数较单体增大了 68%, 群体风致干扰效应不可忽略。随着纵、横向疏密系数的增加, 目标房屋表面所有区域干扰效应趋于稳定, 干扰因子值逐渐接近于 1。当 $R_x \geq 3$ 且 $R_y \geq 5$ 时, 干扰效应基本消失。

见图 13, 目标房屋二表面出现明显放大效应和

风压反号现象,干扰效应强于目标房屋一。当疏密系数较小, $R_x=0.5$ 和 $0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时干扰效应最为突出,迎风屋面A4、C3、C4区,迎风山墙C2区,背风山墙D1、D2区和背风屋面D3区的干扰因子最大值均大于等于1.70。该风向角下目标房屋所有区域的干扰因子最大值3.41出现在 $R_x=3$ 且 $R_y=0.5$ 时目标房屋二A3区,平均风荷载系数较单体增大了241%,干扰效应较强,设计时应予以重视。迎风屋面上游A3、C3区为受干扰程度最重的区域,房屋布置较密, $0.5 \leq R_x \leq 1.5$ 且 $0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时,这两

个区域出现明显的风压变号现象,最大负干扰因子-3.03出现在 $R_x=0.5$ 且 $R_y=0.5$ 时C3区,相比于单体房屋,风压变号且平均风荷载系数绝对值增大了203%。随着疏密系数的增加,目标房屋表面各区干扰效应趋于稳定,干扰因子值逐渐接近于1。当 $R_x \geq 3$ 且 $R_y \geq 5$ 时,干扰效应基本消失。

综上,45°风向角下群体风致干扰效应不可忽略。疏密系数为影响群体风致干扰效应强弱的关键参数, $0.5 \leq R_x \leq 3, 0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时,干扰效应较强;随着疏密系数增大,当 $R_x \geq 3$ 且 $R_y \geq 5$ 时干扰效应消失。

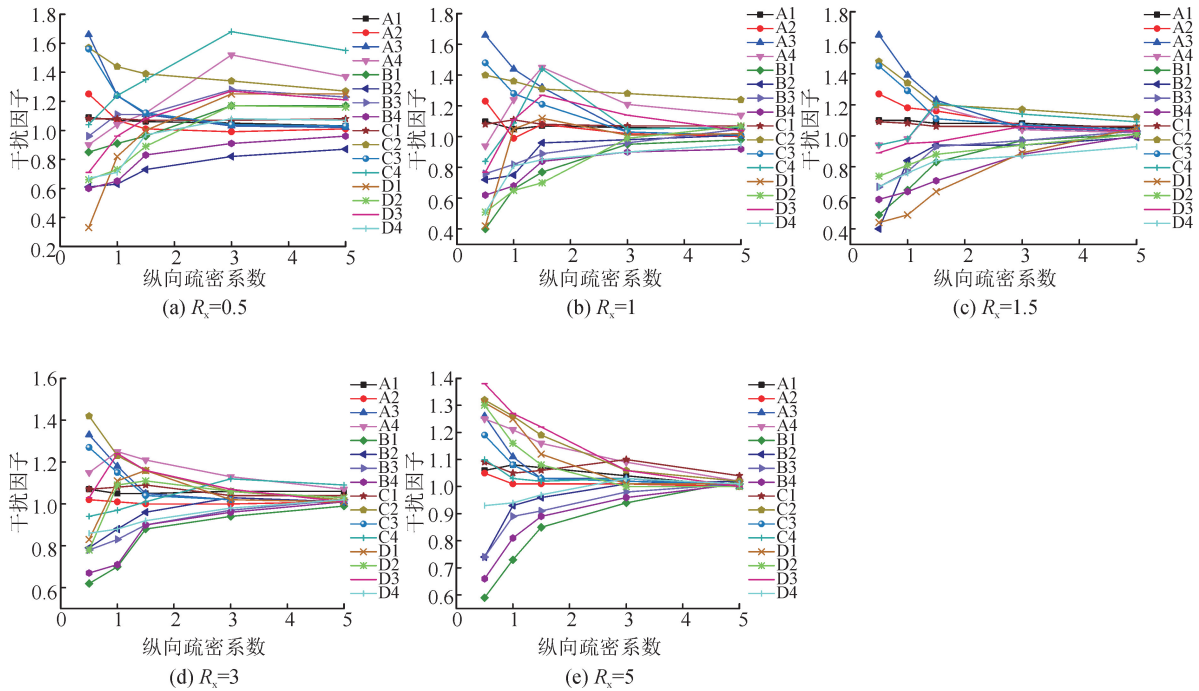


图 12 45°风向角目标房屋一干扰因子

Fig. 12 Interference factor of No. 1 target building under 45° wind direction angle

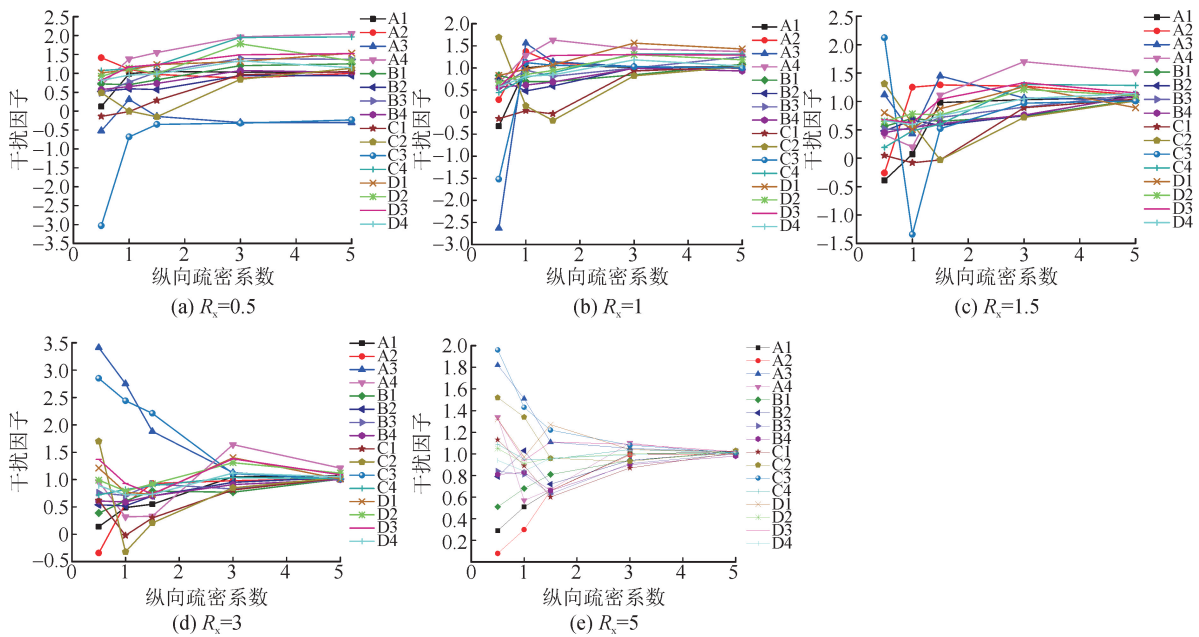


图 13 45°风向角目标房屋二干扰因子

Fig. 13 Interference factor of No. 2 target building under 45° wind direction angle

3.2 90°风向角干扰效应

见图 14 和 15。

90°风向角下目标房屋干扰因子变化趋势分别

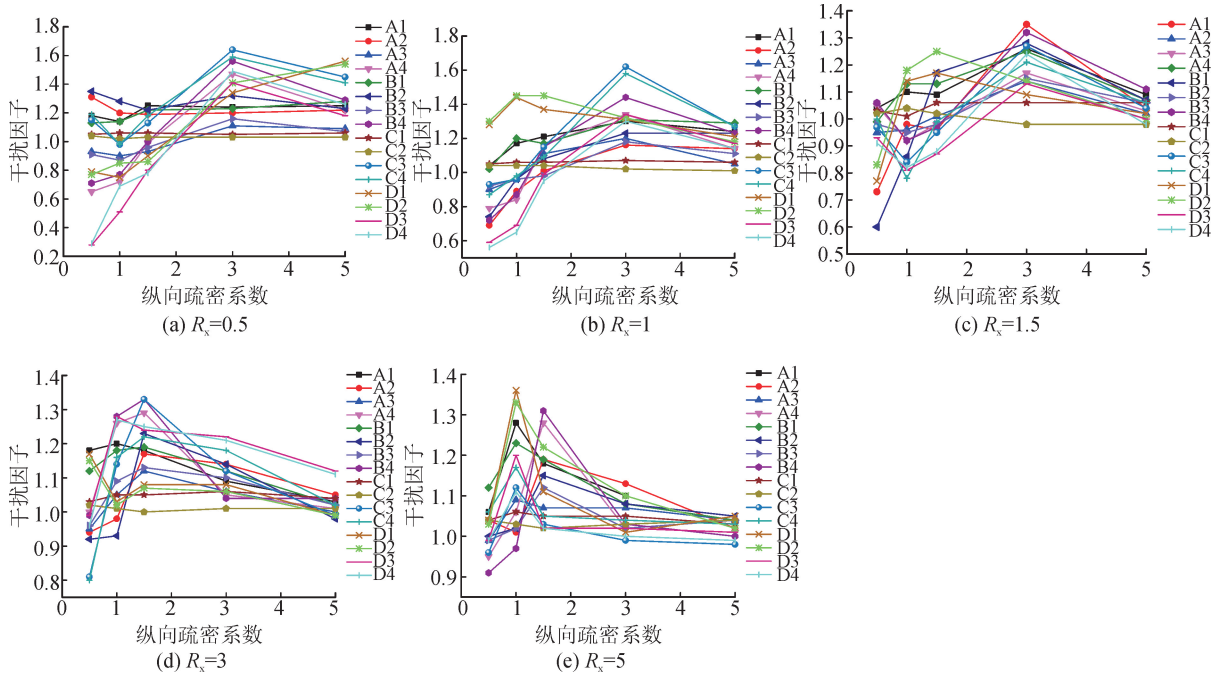


图 14 90°风向角目标房屋一干扰因子

Fig. 14 Interference factor of No. 1 target building under 90° wind direction angle

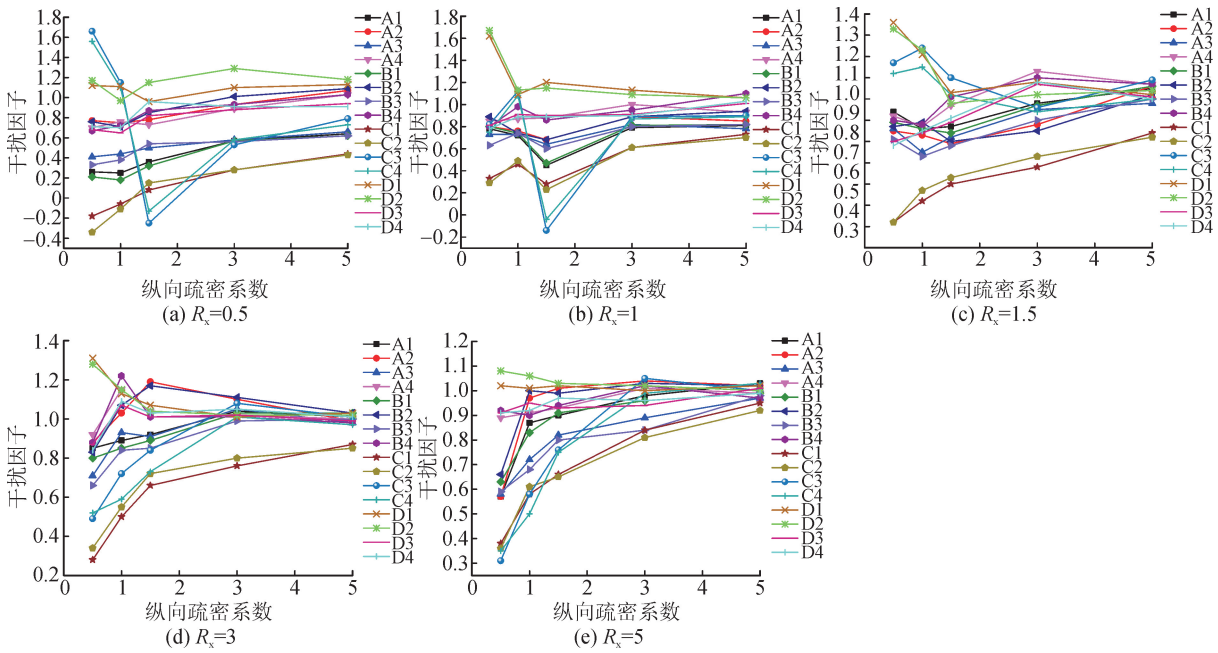


图 15 90°风向角目标房屋二干扰因子

Fig. 15 Interference factor of No. 2 target building under 90° wind direction angle

见图 14,目标房屋一大部分区域表现为放大效应,局部出现弱遮挡效应。除 $R_x=0.5$ 时 D1 和 D2 区外,其他区域干扰因子随疏密系数的增大而接近于 1。 $0.5 \leq R_x \leq 1.5, 0.5 \leq R_y \leq 3$ 时,目标房屋一各区干扰因子随 R_y 变化而变化幅度较大,此时保持 R_y 不变,干扰因子随 R_x 增大而逐渐减小。目标房屋

一最大干扰因子 1.64 出现在 $R_x=0.5$ 且 $R_y=3$ 时迎风屋面 C 区。对于 $R_x=0.5$ 时背风面 D1 和 D2 区,随着 R_y 由 0.5 增至 5,干扰因子由 0.79 增至 1.56。 $0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时出现遮挡效应, $3 \leq R_y \leq 5$ 时出现放大效应。这是因为 R_x 较小,顺风向的 R_y 也较小时,气流经目标房屋一与两侧房屋间形成的狭窄

气流通道向后发展时与后排房屋碰撞形成回流,导致背风面负压绝对值较单体为小。而 R_y 较大时,气流能充分向后发展,在背风面出现较高负压, $R_y=5$ 时放大效应最强,较单体放大了 1.56 倍。 $R_x \geq 5$ 且 $R_y \geq 3$ 时,各区域干扰因子接近于 1,干扰效应基本消失。

见图 15,目标房屋二主要表现为遮挡效应,但局部区域的放大效应不容忽视。 $R_x=0.5$ 且 $R_y=1$ 时 A1 和 B1 区遮挡效应最强,平均风荷载系数较单体分别减小了 75% 和 82%。当 $0.5 \leq R_x \leq 1.5, 0.5 \leq R_y \leq 1.5$ 时,C 区干扰因子为负,表明该区在交错布局房屋间距较密时相比单体会出现风压反向现象。然而 90° 风向角下最大干扰因子 1.67 出现在 $R_x=1$ 且 $R_y=0.5$ 时背风面 D 区,平均风荷载系数较单体房屋增加了 67%,这表明,对于处于下游受遮挡位置的目标房屋二,虽然其表面大部分区域出现遮挡效应,但房屋部分区域仍会出现较强放大效应,放大效应不可忽略。随着疏密系数的增大,干扰效应逐渐减弱,当 $R_x \geq 5, R_y \geq 3$ 时,干扰效应基本消失。

综上, 90° 风向角下,群体风致干扰效应不可忽略。疏密系数为影响群体风致干扰效应强弱的关键参数,当 $0.5 \leq R_x \leq 5, 0.5 \leq R_y \leq 3$ 时,干扰效应较强;随着疏密系数增大,当 $R_x \geq 5$ 且 $R_y \geq 3$ 时干扰效应消失。

4 风荷载体型系数

表 1 为单体房屋各区平均风荷载系数和目标房屋各区最大干扰因子。当房屋间距小于临界间距时,干扰效应不可忽略。实际应用时若仅参考单体体型系数进行群体抗风设计,则存在安全隐患。为计及交错布局带来的放大效应,根据四坡房屋使用情况,房屋表面没有分区且不会有特定迎风面、侧面、迎风屋面或背风面,在表 1 基础上,结合四坡房屋双轴对称的特点,按照最不利系数包络原则,将房屋表面简化为迎风山墙、其他山墙和屋面三个区域,在单体房屋表面各区域体型系数上乘以最大干扰因子作为放大因子,得到交错布局时的风荷载体型系数见图 16。

表 1 单体房屋各区平均风荷载系数和目标房屋最大干扰因子

Tab. 1 Average wind load coefficient of each area of single building and maximum interference factor of target building

风向角/ $^\circ$	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0.77	0.77	-0.24(1.68)	-0.24(1.68)	-0.20(1.77)	-0.20(1.77)	-0.43(1.36)	-0.43(1.36)
45	0.62(1.10)	0.25(1.41)	0.08(3.41)	-0.28(2.05)	-0.37(1.25)	-0.33(1.10)	-0.71(1.39)	-0.47(1.09)
90	-0.65(1.31)	-0.31(1.35)	-0.85(1.20)	-0.42(1.56)	-0.65(1.31)	-0.31(1.35)	-0.85(1.20)	-0.42(1.56)
风向角/ $^\circ$	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
0	-0.65(1.33)	-0.31(1.74)	-0.85(1.24)	-0.42(1.39)	-0.65(1.33)	-0.31(1.74)	-0.85(1.24)	-0.42(1.39)
45	0.62(1.13)	0.25(1.70)	0.08(-3.03)	-0.28(1.96)	-0.33(1.56)	-0.37(1.78)	-0.71(1.52)	-0.47(1.33)
90	0.77	0.77	-0.24(1.66)	-0.24(1.66)	-0.20(1.67)	-0.20(1.67)	-0.43(1.09)	-0.43(1.09)

注: 0° 风向角时最大干扰因子 1.77 出现在 $R_x=R_y=1$ 时目标房屋一背风面 B 区, $R_x \geq 3$ 且 $R_y \geq 5$ 时干扰效应消失; 45° 时风向角最大干扰因子 3.41 出现在 $R_x=3$ 且 $R_y=1$ 时目标房屋一迎风屋面 A 区, $R_x \geq 3$ 且 $R_y \geq 5$ 时干扰效应消失; 90° 时风向角最大干扰因子 1.67 出现在 $R_x=1$ 且 $R_y=0.5$ 时目标房屋一背风面 A 区, $R_x \geq 5$ 且 $R_y \geq 3$ 时干扰效应消失。

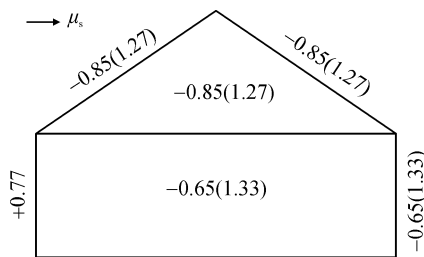


图 16 交错布局下轻型四坡房屋风荷载体型系数

Fig. 16 Wind load shape coefficient of lightweight four-slope building under staggered layout

图 16 中正号表示风压力,负号表示风吸力,括号中数值为放大因子,交错布局轻型四坡房屋风荷载体型系数为单体房屋体型系数与放大因子的乘积, $R_x \geq 5$ 且 $R_y \geq 5$ 时群体干扰效应基本消失,此时可按单体房屋体型系数进行抗风设计。

5 结论

1) 对于交错布局轻型四坡房屋群风致干扰效应的数值模拟控制网格数量 2.5 个/ m^3 ,湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,离散格式采用二阶迎风格式是

可行有效的。

2) 风向角一定时,疏密系数为影响群体风致干扰效应强弱的关键参数。交错布局房屋布置间距分别为: 0° 风向角下1倍房屋长度和1倍房屋宽度、 45° 风向角下3倍长度和1倍宽度、 90° 风向角下1倍长度和0.5倍宽度时干扰效应最强。

3) 0° 风向角交错布局房屋布置间距大于等于3倍长度和5倍宽度; 45° 风向角大于等于3倍长度和5倍宽度; 90° 风向角大于等于5倍长度和3倍宽度;所有风向角下大于等于5倍长度和5倍宽度时干扰效应消失。

4) $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 风向角下,群体交错布局时目标房屋与单体房屋相比,出现最强放大效应区域的平均风荷载系数分别放大了1.77倍,3.41倍,1.67倍; 45° 风向角时干扰效应最强。房屋群间距小于临界间距时,群体干扰效应不可忽略,实际设计中应引起重视。

5) 在单体房屋体型系数基础上乘以放大因子以计及交错布局相对于单独布置的干扰效应,得到交错布局轻型四坡房屋风荷载体型系数(见图16)。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] American Society of Civil Engineering. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE 7-1988 [S]. Reston: ASCE Press, 2010.

[3] AIJ. Commentary on recommendations for loads on buildings [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2006.

[4] WANG H, KE S T, GE Y J. Research on non-stationary wind-induced effects and the working mechanism of full scale super-large cooling tower based on field measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 184(1): 61-76.

[5] 唐意,金新阳,杨立国. 错列布置超高层建筑群的干扰效应研究[J]. 土木工程学报,2012, 45(8): 97-103.
TANG Yi, JIN Xinyang, YANG Ligu. Study of theinterference effects of wind loads on tall buildings in staggered arrangement [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 97-103.

[6] 颜卫亨,李仁鑫,武艳如,等. 交错布局轻型双坡房屋群表面风压分布特性[J]. 建筑科学与工程学报,2017, 34(3): 91-102.

YAN Weiheng, LI Renxin, WU Yanru, et al. Surface wind pressure characteristics of staggered layout light-weight double slope houses [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 91-102.

[7] 陈波,程行,张丽娜,等. 不同排列方式平屋面建筑群极值风荷载干扰效应影响研究[J]. 建筑结构学报,2018, 39(10): 1-10.
CHEN Bo, CHENG Hang, ZHANG Lina, et al. Investigation on interference effects on peak wind loads on a group of buildings with flat roof under different arrangements[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 1-10.

[8] AI Z T, MAK C M. Wind-induced single-sided natural ventilation in buildings near a long street canyon: CFD evaluation of street configuration and envelope design [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 172(1): 96-106.

[9] DUAN G, NGAN K. Sensitivity of turbulent flow around a 3-D building array to urban boundary-layer stability[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 193: 103958.

[10] 殷惠君,张其林,周志勇. 标准低矮建筑 TTU 三维定常风场数值模拟研究[J]. 工程力学,2007, 24(2): 139-145.
YIN Huijun, ZHANG Qilin, ZHOU Zhiyong. Numerical simulation study of 3D steady atmospheric flow around standard low-rise building TTU model[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 139-145.

[11] 颜卫亨,邵家醉,张茂功. 野营折叠网壳结构表面定常风场的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 224-230,243.
YAN Weiheng, TAI Jiazui, ZHANG Maogong. Numerical simulation of steady atmospheric flow for folding reticulated shell [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 224-230, 243.

[12] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用 [M]. 第二版. 上海:同济大学出版社,2008

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地震应急避难场所-场址及配套设施:GB 21734—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008

[14] YANG Songxiao, LIU Wenpeng, KANG Liming, et al. Study on wind induced interference effect of T shaped light camping housing group[M]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 252(4): 2805-2812.

(责任编辑 王绪迪)