

DOI:10.11918/202409002

高度非均一建筑群拖曳力分布特性的风洞实验

王 鹿¹, 李 彪², 罗志文³, 刘 京^{4,5}

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650000; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;
3. 卡迪夫大学 威尔士建筑学院, 卡迪夫 CF10 1AA; 4. 哈尔滨工业大学 建筑与设计学院, 哈尔滨 150001;
5. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150006)

摘要: 城市环境中建筑群所受到的风拖曳力是复杂而关键的问题。目前, 大部分研究将建筑群视为均一高度, 忽略建筑群高度非均一性对拖曳力的影响。为此, 提出高度分层处理方案计算高度非均一建筑群的截面拖曳力系数 C_{de} , 引入截面修正系数 β_z , 将高度均一建筑群的拖曳力系数修正为高度非均一建筑群的截面拖曳力系数 C_{de} , 进而通过风洞实验研究建筑高度种类、层类型及层布局对建筑单体和建筑群截面拖曳力系数影响。结果表明: 建筑高度非均一性显著影响气流的流动调整过程, 当建筑高度种类 N 为 2 或 3 时, 层布局对 β_z 的影响较小, 当 N 增加至 4 时, 交错式层布局的 β_z 高于行列式层布局的 β_z ; 采用高度分层处理方案计算高度非均一建筑群的截面拖曳力系数, $N \geq 4$ 时, β_z 需进一步参数化。研究结果为实际城市建筑群的拖曳力估算提供理论支持, 提高城市参数化方案的准确性, 进而改善城市天气预报和污染物扩散计算的精度。

关键词: 非均一高度建筑群; 截面拖曳力系数; 风洞实验; 高度分层处理方案

中图分类号: TU833

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)10-0093-10

Wind tunnel experimental study on the characteristics of drag force distribution for buildings with non-uniform heights

WANG Lu¹, LI Biao², LUO Zhiwen³, LIU Jing^{4,5}

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;
2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Welsh School of Architecture, Cardiff University, Cardiff CF10 1AA, UK; 4. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 5. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: The drag force of buildings in urban environment represent a complex and critical issue. Currently, most research usually regards buildings with uniform heights, ignoring the effect of the non-uniformity of building heights on the drag force distribution. To address this, this study proposes a height stratification method to calculate the sectional drag coefficient of buildings with non-uniform heights, C_{de} . This method employs a sectional correction factor β_z to adjust the drag coefficient of buildings with uniform heights to C_{de} of buildings with non-uniform heights. Subsequently, wind tunnel experiments are then conducted to investigate the effects of building height category N , layer type, and layout on the sectional drag coefficient of individual buildings and the total building array. The results show that the non-uniformity of building heights has a significant impact on the flow adjustment process. When the building height category, N , is 2 or 3, the layer layout has a minimal impact on β_z . However, when N increases to 4, β_z values of staggered layouts are higher than those of square layouts. When using the height stratification method to calculate C_{de} of buildings with non-uniform heights, β_z requires further parameterization if $N \geq 4$. The outcome of this study provide theoretical support for estimating drag force in urban buildings, enhancing the accuracy of building effect parameterization, and improving the precision of urban weather forecasting and pollutant dispersion calculations.

Keywords: buildings with non-uniform heights; sectional drag coefficient; wind tunnel experiments; height stratification method

收稿日期: 2024-09-02; 录用日期: 2024-10-18; 网络首发日期: 2024-11-26

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241126.1451.002>

基金项目: 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220298); 国家自然科学基金(5187080901)

作者简介: 王 鹿(1992—), 女, 博士; 刘 京(1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘 京, liujinghit0@163.com

随着城市化的快速发展,人工构筑物和城市建筑显著增加,取代了原本的自然环境,由此形成了城市气候^[1],热岛效应、降水增加和雾霾事件等气候问题日益突出^[2-6]。城市建筑群对来流风产生阻塞和拖曳效应,导致来流风速衰减,引发湍流耗散,进而影响城市冠层和城市边界层内气流流动模式^[2];同时加剧气流的剪切作用,引发大规模的减速上升气流和加速下降气流等大尺度间歇性组织漩涡^[8-9]。

城市参数化方案(building effect parameterization, BEP)能够表征城市表面的三维特性,并捕捉整个城市冠层内热量、湿度和动量的垂直分布,进而有效模拟和评估城市建筑群及其形态对气象和气候的影响^[10-11]。常与建筑能耗模型(building energy model, BEM)耦合使用,并作为中尺度气象天气研究与预报模型(weather research and forecasting, WRF)的下垫面边界条件^[12-14]。在城市参数化方案中,评估不同城市形态的空气动力学效应是 BEP 的关键内容之一^[10-11]。目前,主要通过建筑群截面拖曳力系数 $C_d(z)$ 衡量建筑群对气流的衰减程度,以量化城市表面对气流的影响^[15-19]。 $C_d(z)$ 计算如下^[15,17,20]:

$$C_d(z) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i(z)}{\frac{1}{2}\rho U_{\text{ref}}^2} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; U_{ref} 为边界层风速, m/s ; n 为建筑数量; $p_i(z)$ 为第 i 个建筑单体在高度 z 处迎风面和背风面的压力差, Pa 。

对于城市建筑群,当风流经建筑群时,受建筑表面摩擦及建筑形状的影响,空气动能部分转化为阻力,该阻力即为建筑群所受的风拖曳力。大部分关于建筑群拖曳力分布特性的研究集中于 $C_d(z)$ 沿高度方向平均值 $C_d = \frac{1}{H} \int_0^H C_d(z) dz$ 的分布规律。对于高度均一建筑群,大量研究探讨了 C_d 的分布规律^[21-25], Li 等^[3] 提出了基于风廊道指数、平面面积指数 λ_p 、迎风面积指数 λ_f 和形状指数的 C_d 参数化模型。对于高度非均一建筑群, Zaki 等^[4] 对日本东京建筑高度的概率密度统计结果进行抽样,得到由 9 种建筑高度组成的建筑群模型,并进行了风洞实验。发现当 $\lambda_p = 0.077$ 时, C_d 与建筑高度标准偏差 σ_h 无显著相关性;当 $\lambda_p > 0.17$ 时, C_d 随着 σ_h 增加而显著增加。Hagishima 等^[5] 采用风洞实验研究由两种高度建筑组成的建筑群模型,研究结果表明,相比高度均一建筑群,高度非均一建筑群的 C_d 增加,而

且较高建筑的拖曳力在建筑群的总拖曳力中起主导作用。Mohammad 等^[6] 利用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 研究多个高度非均一建筑群中建筑单体的相互遮挡作用,并提出了半经验模型估计各种随机排列建筑的 C_d ,但是忽略其在垂直方向的变化,仅采用单一数值进行表征。Sützl 等^[7] 采用 LES 研究具有相同 λ_p 和 λ_f 但高度和布局非均一的建筑群,引入了广义的迎风面积指数描述城市冠层中迎风面积的垂直分布,并使用该指数对总拖曳力归一化的垂直应力剖面进行 3 次多项式拟合。但该模型无法独立计算建筑群总拖曳力,需将其作为输入参数。Xie 等^[8] 采用 LES 研究 Cheng 等^[9] 中高度正态分布的建筑群中建筑单体拖曳力系数的分布规律,发现较高建筑物拖曳力的占比远大于其迎风面积的占比。Fan 等^[10] 研究了建筑单体的尺寸和入流角对水平环流区域面积的影响,进而提出了 $C_d(z)$ 的参数化模型。该模型被应用于数个建筑群,并使用 LES 数据进行验证,但仅验证了一组高度非均一建筑群的工况,而且缺乏风洞实验数据。

综上,建筑群截面拖曳力系数的研究中,部分研究假定建筑高度均一,或考虑高度非均一的情况但忽略了截面拖曳力系数在垂直方向的变化。这种简化导致对气流流经建筑群引起的风衰减现象评估不准确,从而影响城市参数化方案精度。本文考虑了城市建筑群高度非均一的情况,提出计算截面拖曳力系数的高度分层处理方法,并根据各层相对位置不同,在建筑群的垂直划分过程中将各分层归为 3 种层类型,采用风洞实验研究建筑群高度种类、层布局和层类型对建筑单体和建筑群截面拖曳力系数的影响。研究结果为实际城市建筑群的拖曳力估算提供理论支持,进而改善城市参数化方案的精度,提高城市天气预报和污染物扩散计算的准确性。

1 高度分层处理方案

本文提出高度分层处理方案计算建筑群截面拖曳力系数。在每种建筑高度的顶部将高度非均一建筑群(称为设计工况)划分为若干分层。以 4 种建筑群高度为例,如图 1 所示,该建筑群被分为 4 层。每个层都被独立提取出来,形成 4 个基底工况,作为拖曳力计算的基准。基底工况的建筑群高度均一,分层高度为 Δz 。

设计工况中建筑群的形态参数,如 λ_p 和 λ_f 是 Δz 的函数,即

$$\lambda_f(z) = \frac{A_f(\Delta z)}{A_f} \quad (2)$$

$$\lambda_p(z) = \frac{A_p(\Delta z)}{A_t} \quad (3)$$

式中: $A_f(\Delta z)$ 为 Δz 对应的建筑群迎风面积, m^2 ; $A_p(\Delta z)$ 为 Δz 对应的建筑群平面面积, m^2 ; A_t 为建筑群基底面积。

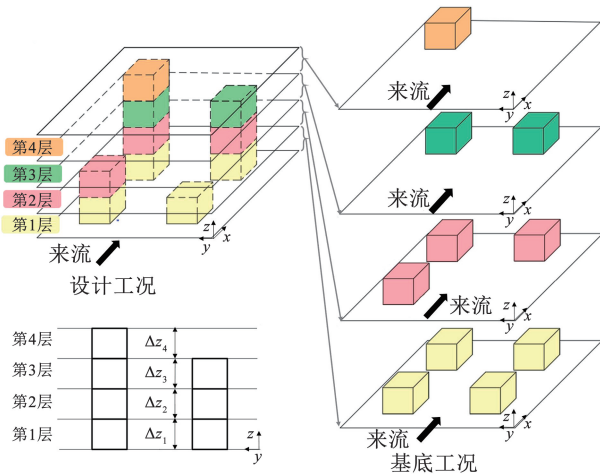


图 1 高度分层处理方案

Fig. 1 Height stratification method

基底工况的拖曳力系数 $C_d(\Delta z)$ 可以采用高度均一建筑群的半经验模型计算^[11], 然后经修正后得到设计工况的 $C_d(z)$, 即

$$C_d(z) = (1 + \beta_z) C_d(\Delta z) \quad (4)$$

式中 β_z 为 $C_d(z)$ 的修正系数, 其物理意义为相对于基底工况, 设计工况 $C_d(z)$ 的相对变化值。

为了进一步简化和分类各层的修正系数 β_z , 根据各层相对位置的不同, 在建筑群的垂直划分过程中, 将各分层归类为 3 种层类型: 1) 底层, 最靠近地面的分层, 即高度等于最低建筑高度的分层; 2) 顶层, 高度最高的分层; 3) 中间层, 位于底层和顶层之间的所有分层, 如图 2 所示。

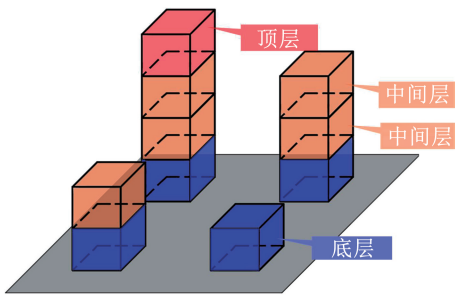


图 2 3 种层类型划分原理

Fig. 2 Principle of dividing three types of layers

2 风洞实验概述

本研究主要考虑雷诺准则数 Re 的相似性设计风洞实验^[24-25,31]。关于大气边界层流动的模拟, Snyder 指出, 当 $Re > 10^5$, 可以认为流动特性与 Re 无

关^[12]。本研究指导风速为 11 m/s , $Re = 1.76 \times 10^5$, 能够保证流动与 Re 无关。本实验在石家庄铁道大学风工程研究中心的低速风洞进行。使用的大气边界层风洞实验段是石家庄铁道大学风工程研究中心的低速实验段。该实验段宽 4.0 m 、高 3.0 m 、长 24.0 m , 最大风速大于 30.0 m/s 。空风洞流动时, 速度分布不均匀性和不稳定性均低于 0.6% , 湍动强度低于 0.4% , 平均流动角度偏差低于 0.4° 。低速实验段内有三维移动测量系统, 可在 24 m 范围内进行展向、流向和垂直的自动移动, 完成瞬时场测量。

2.1 模型及工况

城市建筑群形态千变万化、高低错落, 表现出强烈的空间非均一性, 本研究重点探讨建筑群垂直方向上非均一性的影响, 忽略建筑群水平方向的空间非均一性以及植被等非建筑下垫面。选取哈尔滨和深圳为典型城市。哈尔滨作为黑龙江省省会, 是典型的严寒地区代表城市, 也是中国高纬度的寒地大城市; 深圳市属于夏热冬暖地区, 是华南地区的超大城市。两城市的主城区人口均超过 500 万 , 是所在地区的政治和经济中心, 且地理位置和气候差异显著。通过分析这两个具有代表性城市的建筑高度分布情况, 以涵盖典型城市高度非均一建筑群的拖曳力特性。

图 3 为哈尔滨和深圳的建筑高度统计结果^[13], 通过对卫星遥感影像得到的建筑要素进行数据拾取, 转换并投影后封装为 GIS Shape file 文件, 便于展开空间要素的提取, 结合遥感影像以及实地调研对部分建筑予以复核, 以确保数据准确、可靠。如图 3 所示, 高度在 $3 \sim 36 \text{ m}$ 的建筑均占九成, 因此, 风洞实验中最多采用 4 种建筑高度来表征建筑群高度的非均一性, 对应实际建筑高度分别为 $9、18、27、36 \text{ m}$, 涵盖了中低层、多层和高层的建筑高度, 以代表城市中较为常见的建筑高度范围。

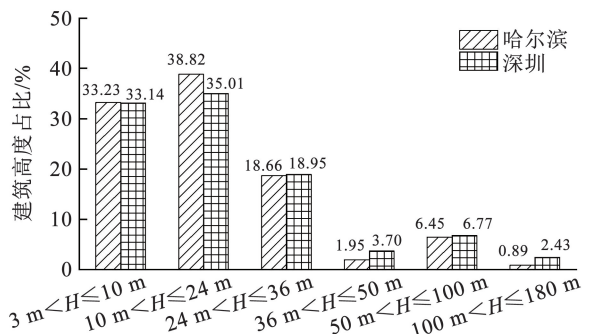


图 3 哈尔滨与深圳建筑高度占比分布^[13]

Fig. 3 Frequency of height distribution for Harbin and Shenzhen^[13]

基底工况选择两种常见的建筑布局方式,即交错式和行列式布局。交错式布局是指将建筑错开地排列在一起,即每个建筑的位置在水平和垂直方向上与相邻建筑错开。行列式布局是指将建筑按照网格状排列,即建筑水平和垂直方向的间隔相等,形成了规整的行和列。基底工况以 B_{ia} 或 B_{is} 来命名,其中, *i* 为其对应设计工况的第 *i* 层,字母 a 或 s 代表行列式(aligned)或者交错式(staggered)布局。

定义迎风建筑为在其迎风面没有其他建筑单体遮挡的建筑。以工况 B2a 为例,直接迎风建筑除了第一排建筑 I_{1,1} 和 I_{3,1} 外,还包括 I_{4,2} 和 I_{4,4}。定义迎风指数 γ 量化迎风建筑所占比例,以更全面评估建筑群截面拖曳力分布, γ 计算如下:

$$\gamma = \frac{A_w}{A_f} \times 100\% \quad (5)$$

式中: A_w 为迎风建筑的迎风面积, m^2 ; A_f 为建筑群的迎风面积, m^2 。

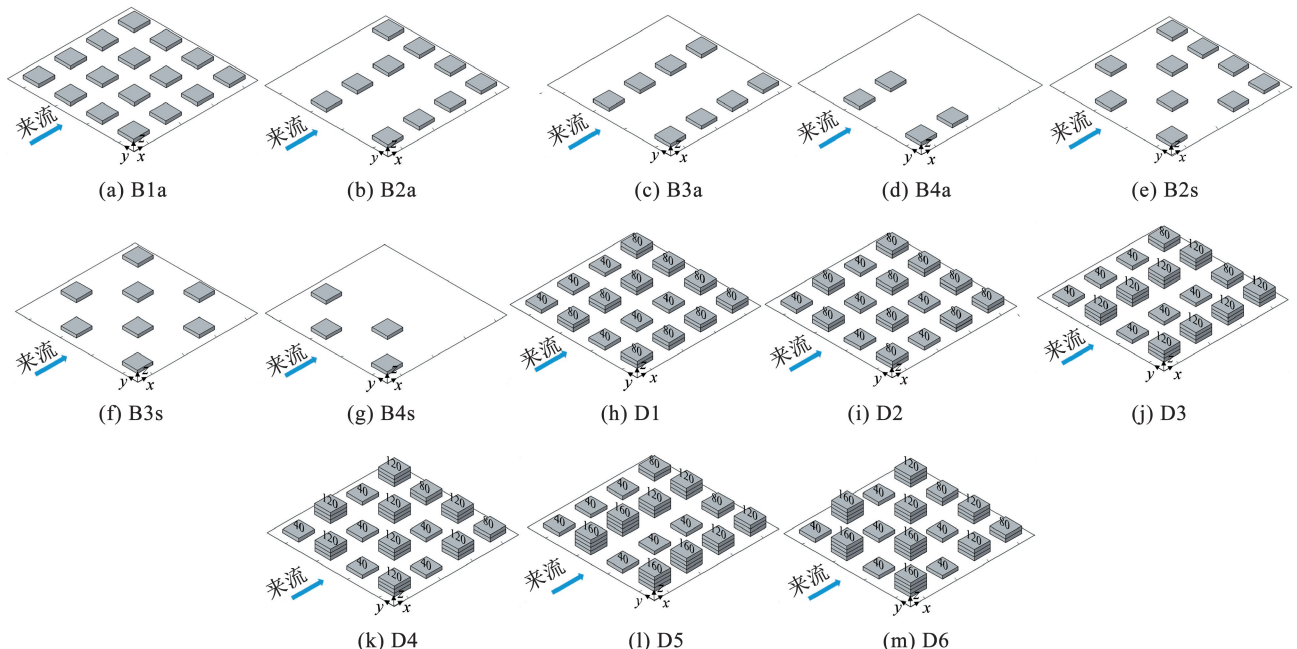
如表 1 和图 4 所示,第 1 层工况(B1a)均采用行列式布局,以保证设计工况建筑数量相同。第 2 层及以上层的布局采用行列式(B2a ~ B4a)或交错式(B2s ~ B4s)。工况 B2a 与 B2s 并非完全遵循行列式和交错式布局,但其迎风指数 γ 相等,均为 40%。这是因为考虑到实际建筑群中布局的不规则性,通过采用不完全的行列式或交错式布局,以更全面地探讨 γ 和层布局对拖曳力系数的影响。工况

B4a 与 B4s 遵循行列式布局,其迎风指数 γ 分别为 25% 和 50%,而工况 B3a 与 B3s 遵循交错式布局,其迎风指数 γ 分别为 50% 和 100%,是工况 B4a 与 B4s 迎风指数的 2 倍。对建筑单体进行编号,采用 $I_{X,Y}$ 表示,其中, *X* 与 *Y* 在 1 ~ 4 取值。采用 $Y_1 \sim Y_4$ 代表第 1 列 ~ 第 4 列建筑,例如, Y_1 包含建筑单体 $I_{1,1}$ 、 $I_{2,1}$ 、 $I_{3,1}$ 和 $I_{4,1}$ 。

表 1 风洞实验工况汇总

Tab. 1 Summary of wind tunnel cases

工况	<i>N</i>	布局/ 迎风指数 γ	H_{av}/m	建筑群垂直布置 (自下而上)	
B1a	1	行列式/25%	—	—	
B2a	1	行列式/40%	—	—	
B3a	1	行列式/25%	—	—	
基底 工况	B4a	1	行列式/50%	0.040	—
	B2s	1	交错式/40%	—	—
	B3s	1	交错式/50%	—	—
	B4s	1	交错式/100%	—	—
设计 工况	D1	2	—	0.065	B1a + B2a
	D2	2	—	0.065	B1a + B2s
	D3	3	—	0.085	B1a + B2a + B3a
	D4	3	—	0.085	B1a + B2s + B3s
	D5	4	—	0.095	B1a + B2a + B3a + B4a
	D6	4	—	0.095	B1a + B2s + B3s + B4s



单位: mm

图 4 风洞实验工况

Fig. 4 Wind tunnel cases

风洞内阻塞率一般要求不应超过 3%, D6 工况阻塞率最大, 为满足阻塞率要求并保留一定余量, 设计工况的单层高度设为 40 mm, 对应的 D6 工况阻塞率为 0.67%。原型中建筑的单层层高通常为 3 m, 原型和模型的分层高度需合理对应, 因此, 设定缩尺比为 1:225, 即 40 mm 的模型高度对应实际建筑的 3 m 层高。

各设计工况中均包含 16 个建筑单体, 且工况中各建筑单体水平方向与垂直方向间距相同, 均为 0.2 m, 以减少实验工况复杂性。在基底工况中, 所有建筑模型高度均为 0.04 m, 所有模型的横截面积均为 $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ 。底板的平面面积为 $1.6 \times 1.6 \text{ m}^2$ 。

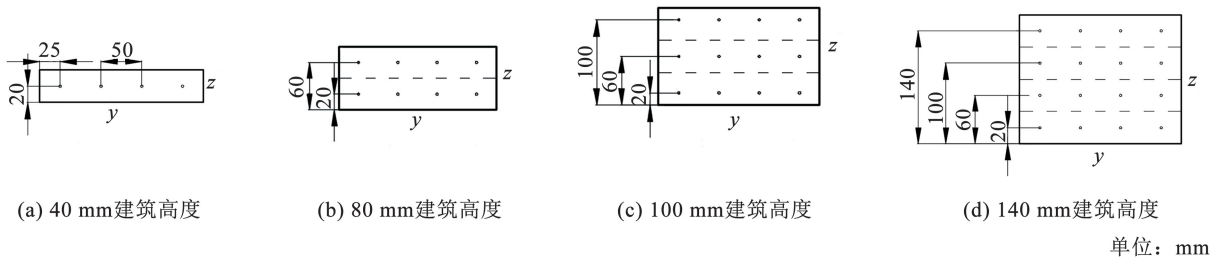


图 5 建筑模型表面压力测点分布

Fig. 5 Distribution of pressure measurement points on the surface of the building model

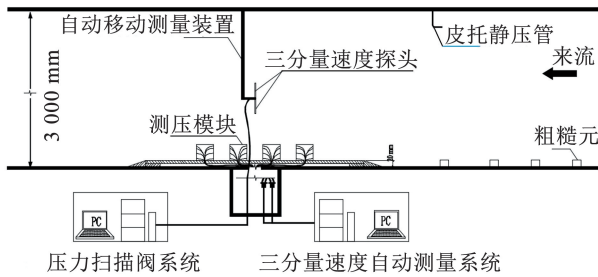


图 6 风洞实验概览

Fig. 6 Schematic diagram of wind tunnel experiments

2.2 误差分析

建筑单体拖曳力系数 C_{d0} 计算如下:

$$C_{d0} = \frac{\int_0^h \Delta p(z) dz}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad (6)$$

C_{d0} 相对误差的精度取决于建筑长度 L 、表面压力 p 和流向平均风速 U 的精度, 根据式 (7) 计算^[15] 其相对误差约为 9%。因此, 采用表面压力的测量结果可以较为准确地计算 C_{d0} 。

$$\frac{\delta C_{d0}}{C_{d0}} = \sqrt{\left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{2\delta \Delta U}{\Delta U}\right)^2 + \left(\frac{2\delta L}{L}\right)^2} \quad (7)$$

3 实验结果分析

3.1 风速分析

图 7 给出了来流的风速分布和湍动强度分布。

建筑模型制作材料为 ABS 塑料。

压力扫描阀采样频率为 330 Hz, 精度为 0.15%。如图 5 所示, 测量了所有建筑的迎风面和背风面的表面压力, 在建筑展向设置 4 个压力测点, 迎风面和背风面测点位置相同, 以计算建筑单体的拖曳力。风洞实验入口地貌类型根据标准 C 类地貌布置^[14]。图 6 为风洞实验示意。Cobra 探头用于测量 12 个高度的瞬时速度。速度采样频率为 625 Hz, 速度精度为 $\pm 0.5 \text{ m/s}$ 。测量风速剖面的水平位置位于底板的中心。速度、建筑表面压力的采样时间分别为 10 s 和 30 s, 采集了 3 个压力样本和两个速度样本。

边界层厚度 δ 约为 1.0 m, 取速度达到边界层风速 U_{ref} 的 99% 时对应的高度。无建筑群模型下 U_{ref} 为 9.45 m/s。所有工况 U_{ref} 的标准差为 0.095 m/s。来流风速与幂律剖面吻合较好, 说明入流地形能准确再现实验段标准 C 类地貌的风速剖面, 如图 7(a) 所示。对于湍动强度, 如图 7(b) 所示, 标准 C 类地貌流向湍动强度 I_u 设计值与实测结果吻合较好^[14], 说明入流地形能准确再现实验段标准 C 类地貌的湍动强度剖面。

图 8 展示了在 0.4 m 高度测量的来流速度功率谱以及对应的 Von Kármán 功率谱。可以看出, 风洞实验测量的功率谱与 Von Kármán 功率谱吻合较好。Von Kármán 功率谱计算如下:

$$\frac{f P_u}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(f \frac{L_u}{U}\right)}{\left[1 + 70.8 \left(f \frac{L_u}{U}\right)^2\right]^{\frac{5}{6}}} \quad (8)$$

$$\frac{f P_v}{\sigma_v^2} = \frac{4 \left(f \frac{L_v}{U}\right) \left[1 + 188.4 \left(2f \frac{L_v}{U}\right)^2\right]}{\left[1 + 70.8 \left(2f \frac{L_v}{U}\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \quad (9)$$

$$\frac{f P_w}{\sigma_w^2} = \frac{4 \left(f \frac{L_w}{U}\right) \left[1 + 188.4 \left(2f \frac{L_w}{U}\right)^2\right]}{\left[1 + 70.8 \left(2f \frac{L_w}{U}\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \quad (10)$$

$$L_u = \frac{0.146U}{f_{u,max}} \quad (11)$$

$$L_v = \frac{0.106U}{f_{v,max}} \quad (12)$$

$$L_w = \frac{0.106U}{f_{w,max}} \quad (13)$$

式中： f 为频率，Hz； P_u 、 P_v 和 P_w 分别为流向、展向和垂直速度功率谱密度， m^2/Hz ； L_u 、 L_v 和 L_w 分别为流向、展向和垂直湍流积分尺度，m； σ_u 、 σ_v 和 σ_w 为流向、展向和垂直瞬时速度标准偏差，m/s。 $f_{u,max}$ 、 $f_{v,max}$ 和 $f_{w,max}$ 分别为 P_u 、 P_v 和 P_w 峰值对应的频率，Hz。

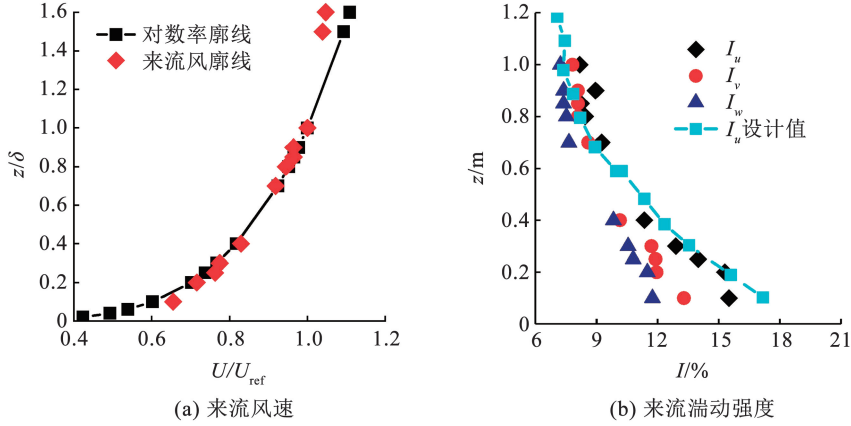


图 7 无建筑群模型下风洞实验来流特性

Fig. 7 Flow characteristics in wind tunnel experiments with no building cluster model

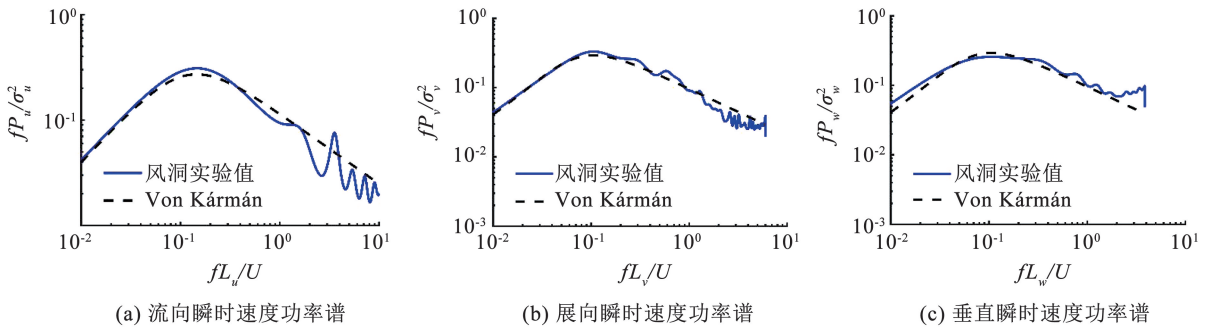


图 8 无量纲流向、展向和垂直功率谱密度在 0.4 m 高度随无量纲频率的分布

Fig. 8 Normalized stream-wise, span-wise, and vertical power spectra density at heights of 0.4 m with normalized frequency

3.2 建筑单体截面拖曳力系数影响因素分析

3.2.1 对底层的影响

建筑单体截面拖曳力系数 $C_{d0,z}$ 计算如下^[16]：

$$C_{d0,z} = \frac{2D_{0,z}}{\rho b U_{ref}^2 \Delta z} \quad (14)$$

Belcher 等^[17]将气流流经城市冠层的流动调整过程分为流动调整区、充分发展区和流出区等阶段。如图 9 所示，流动调整区位于城市层边界的上游。在该区域内，水平气流显著减速，部分空气向上穿过城市冠层顶部。在充分发展区内，向下动量通过湍流应力传递，而建筑群拖曳力削弱该动量传递过程，从而在两者之间建立起局部的流动平衡状态。建筑群下游为流出区，建筑群拖曳力突然消失，导致冠层内平均流动受力不平衡，进而加速了平均流动。根据连续性方程，产生了向下的平均垂直速度，湍流

应力因此将更多动量向下传递，以填补尾流中的速度亏损。

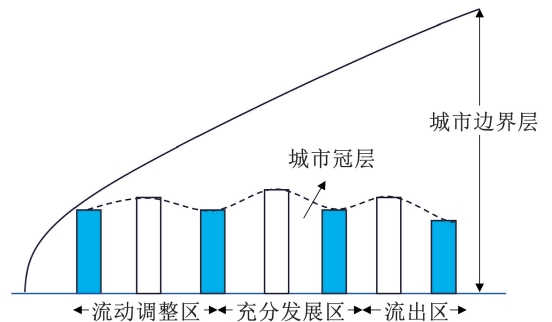


图 9 气流流经城市冠层的流动调整过程^[17]

Fig. 9 Adjustment process of flow over urban canopy^[17]

图 10 给出了基底工况 B1a 中 $Y_1 C_{d0}$ 沿风向的变化规律，以量化气流流经高度均一建筑群的流动调

整过程。因 $I_{1,1}$ 迎风面直接受到气流的冲击, 流速显著降低, 压力显著升高, 形成高压区, 其 C_{d0} 最大。受 $I_{1,1}$ 强烈遮挡, C_{d0} 在 $I_{2,1}$ 迅速减小。气流在经历了流动调整区(从 $I_{1,1}$ 建筑到 $I_{2,1}$ 建筑)后, 在充分发展区建立局部流动平衡状态(从 $I_{2,1}$ 建筑到 $I_{3,1}$ 建筑), 拖曳力在 $I_{2,1}$ 和 $I_{3,1}$ 保持稳定不变。下风向建筑 $I_{4,1}$ 受

整体建筑群尾流区域的负压影响, 拖曳力较中部建筑单体有所增大, 从 $I_{3,1}$ 建筑到 $I_{4,1}$ 建筑为流出区。图 10 同时给出了设计工况 Y_1 底层 $C_{d0,z}$ 的分布。随着建筑高度种类 N 的增加, 相比基底工况, $I_{1,1}$ 底层 $C_{d0,z}$ 略有增加。

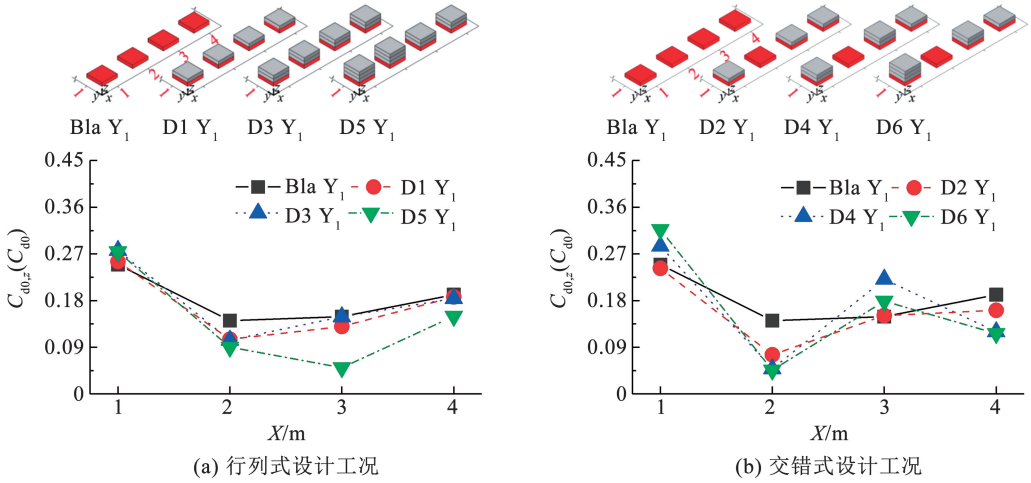


图 10 设计工况 Y_1 底层 $C_{d0,z}$ 及对应基底工况 $Y_1 C_{d0}$ 的分布

Fig. 10 Distribution of $C_{d0,z}$ at the bottom layer of Y_1 of design cases and corresponding C_{d0} of Y_1 of the base cases

3.2.2 对其余层的影响

图 11 给出了设计工况 Y_1 第 2 层 $C_{d0,z}$ 以及对应基底工况 C_{d0} 的分布。随着 N 的增加, 相比基底工况, $I_{1,1}$ 第 2 层 $C_{d0,z}$ 进一步增加。当 $N=2$ 时, Y_1 第 2 层为顶层。除迎风建筑 $I_{1,1}$ 外, 其余建筑第 2 层 $C_{d0,z}$ 与基底工况 C_{d0} 相近。这是因为对于顶层建筑, 气流可以从建筑的两侧以及顶部流过, 减弱了建筑对气流的遮挡效应, 气流的流动调整过程并未有显著变化。当 $N=3$ 时, Y_1 第 2 层为中间层, 对于 D3 工况,

除迎风建筑 $I_{1,1}$ 第 2 层外, 其余建筑第 2 层 $C_{d0,z}$ 均减小, 因 Y_1 建筑高度均一, 且其余建筑处于迎风建筑背风侧, 气流不能有效流经中间层, 加剧了建筑对气流的遮挡效应; 对于 D4 工况, $I_{3,1}$ 第 2 层“阻挡建筑减少”, 其 $C_{d0,z}$ 恢复至基底工况 C_{d0} 的水平。当 $N=4$ 时, D5 工况 Y_1 高度非均一, $I_{3,1}$ 第 2 层“阻挡建筑增加”, 使其 $C_{d0,z}$ 进一步减小, 与图 10(a) 中 D5 工况底层 $C_{d0,z}$ 变化规律相近。

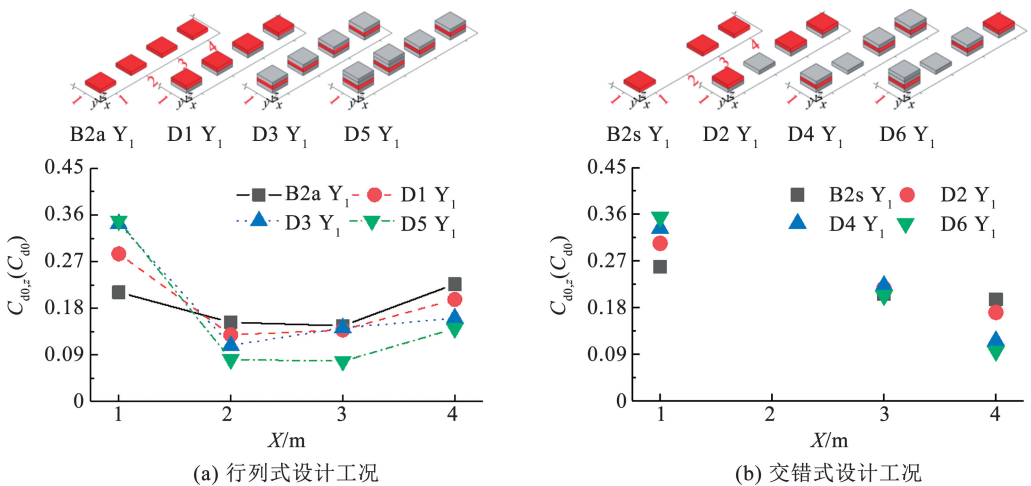


图 11 设计工况 Y_1 第 2 层 $C_{d0,z}$ 及对应基底工况 $Y_1 C_{d0}$ 的分布

Fig. 11 Distribution of $C_{d0,z}$ at the second layer of Y_1 of design cases and corresponding C_{d0} of Y_1 of the base cases

图 12 给出了设计工况 Y_1 第 3 层 $C_{d0,z}$ 以及对应基底工况 C_{d0} 的分布。 $N=3$ 时,由于第 3 层为顶层,除了第一排建筑第 3 层 $C_{d0,z}$ 增加,其余建筑第 3 层 $C_{d0,z}$ 变化较小。当 N 增加至 4 时,第 3 层为中间层,

第 3 层气流由于“阻挡建筑减少”或“阻挡建筑增加”,使得 $I_{3,1}$ 第 3 层 $C_{d0,z}$ 大幅度降低(D5 Y_1),或者几乎不变(D6 Y_1)。

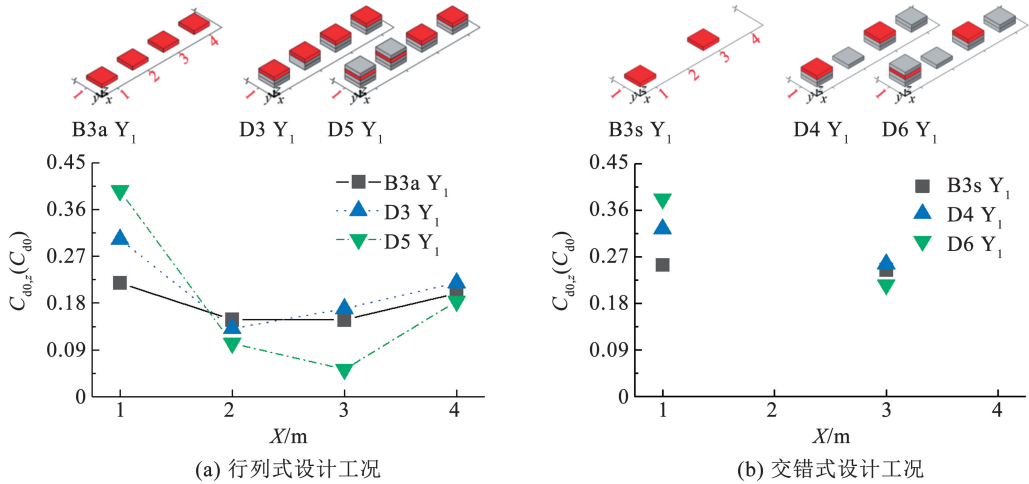


图 12 设计工况 Y_1 第 3 层 $C_{d0,z}$ 及对应基底工况 Y_1 C_{d0} 的分布

Fig. 12 Distribution of $C_{d0,z}$ at the third layer of Y_1 of design cases and corresponding C_{d0} of Y_1 of the base cases

图 13 给出了行列式设计工况 Y_1 第 4 层 $C_{d0,z}$ 以及对应基底工况 C_{d0} 的分布。第 4 层为顶层,相比基底工况 B4a,除了第 1 排建筑第 4 层 $C_{d0,z}$ 随着 N 的增加而增加,其余排建筑第 4 层 $C_{d0,z}$ 变化较小。对于交错式设计工况, Y_1 第 4 层为单个建筑,因而未予列出,其 $C_{d0,z}$ 增加至 0.37 左右。

对于底层,如图 14(a) 所示,随着 N 的增加, β_z 先增加后减小,在 $N=3$ 时达最大值。层布局和 N 对 β_z 的影响均较小。因为无论是交错式还是行列式布局,随着 N 的增加,其直接迎风建筑 $C_{d0,z}$ 的增加均抵消了其背风侧底层 $C_{d0,z}$ 的降低,从而使得底层建筑群 $C_d(z)$ 变化不显著, β_z 为 $-0.12 \sim -0.02$ 。

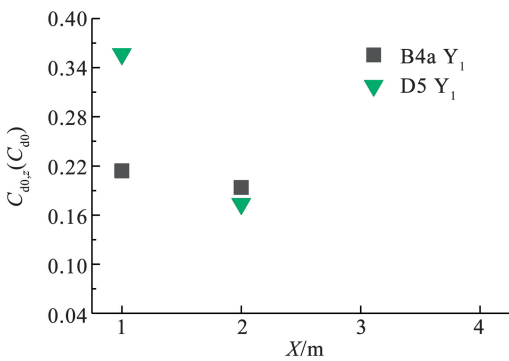


图 13 行列式设计工况 Y_1 第 4 层 $C_{d0,z}$ 和对应基底工况 Y_1 的 C_{d0} 分布

Fig. 13 Distribution of $C_{d0,z}$ at the fourth layer of Y_1 of square design cases and corresponding C_{d0} of Y_1 of the base cases

3.3 建筑群截面拖曳力系数影响因素分析

3.3.1 建筑高度种类的影响

图 14 给出了底层、中间层和顶层的 β_z 与建筑高度种类 N 和层布局之间的关系。

对于中间层,如图 14(b) 所示, $N=3$ 的中间层对应行列式和交错式设计工况 D3 和 D4 工况的第 2 层,迎风指数 $\gamma=40\%$ 相同,即迎风建筑数量相同,在 40% 的迎风指数 γ 下,迎风建筑中间层 $C_{d0,z}$ 的增加值恰好抵消了其背风侧建筑 $C_{d0,z}$ 的减小值,使得 β_z 约等于零。 N 增加至 4 时,迎风指数的差异开始显现。D3 工况第 3 层 $\gamma=25\%$,显著小于 D4 工况第 3 层的 $\gamma=50\%$,迎风建筑较少,迎风建筑 $C_{d0,z}$ 的增加无法完全抵消背风侧建筑 $C_{d0,z}$ 的减小,从而导致 β_z 降低。相比之下, D4 工况的第 3 层由于更高的迎风指数 γ ,其迎风建筑数量较多, $C_{d0,z}$ 的增加更加明显,导致 β_z 有所增加。因此, D3 工况第 3 层 β_z 降低,而 D4 工况第 3 层 β_z 增加。

对于顶层,如图 14(c) 所示,两种层布局中, β_z 都随着 N 的增加而增加。这是因为相比基底工况 C_{d0} ,顶层迎风建筑 $C_{d0,z}$ 增加,且增加幅度随 N 的增加而增加,而其余非迎风建筑 $C_{d0,z}$ 与基底工况 C_{d0} 相近,导致建筑群的 β_z 随 N 的增加而增加。

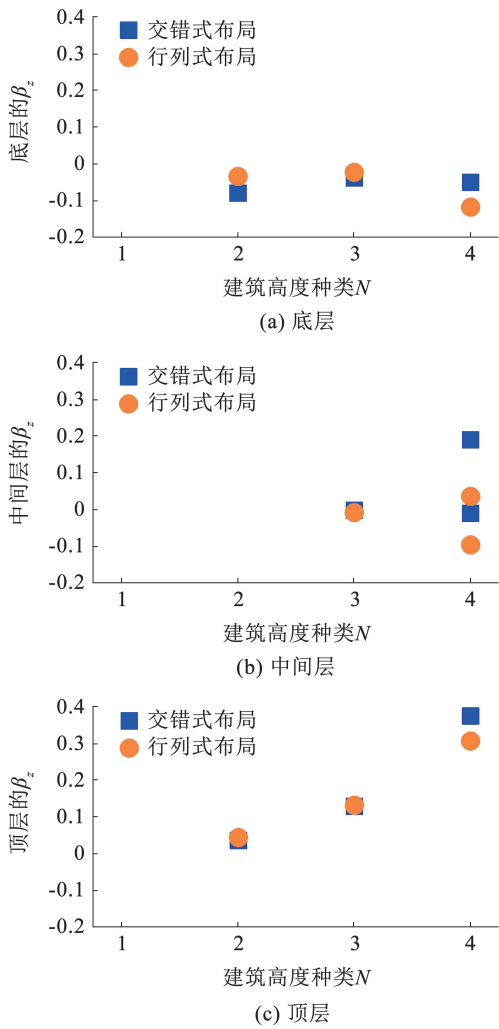


图 14 β_z 与 N 及层布局的关系

Fig. 14 Relationship of β_z with N and layer layout

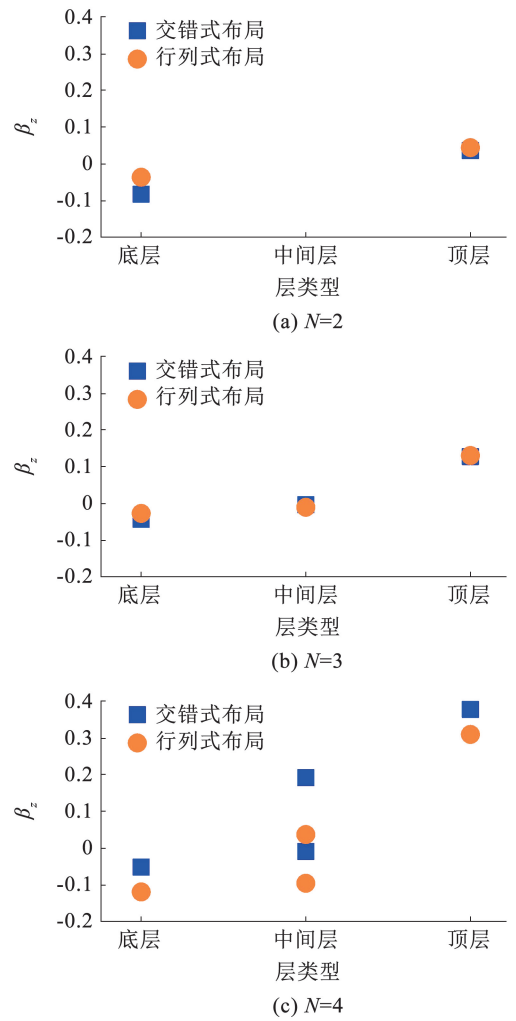


图 15 β_z 与层类型的关系

Fig. 15 Relationship of β_z and layer type

3.3.2 层类型的影响

图 15 显示了不同层类型下 β_z 的分布规律。 $N=2$ 时,如图 15(a)所示,层类型影响较小,底层的 β_z 略小于零,顶层 β_z 在零附近,顶层与底层差距较小,因为对于顶层, N 增加至 2 时,顶层迎风建筑 $C_{d0,z}$ 增加幅度较小。

如图 15(b)所示, $N=3$ 时,出现了中间层,中间层的 $\gamma=40%$,在该 γ 下,迎风建筑 $C_{d0,z}$ 的增加与背风建筑 $C_{d0,z}$ 的减小抵消,使得中间层 β_z 在零左右。对于顶层,第 1 排建筑 $C_{d0,z}$ 进一步增加,其背风建筑 $C_{d0,z}$ 几乎不变,因此,顶层 β_z 大于中间层。

$N=4$ 时,对应工况为 D5 和 D6,中间层包含两层:第 2 层(B2a 或 B3a)与第 3 层(B3a 或 B3s)。D5 的第 3 层 $\gamma=25%$,迎风建筑 $C_{d0,z}$ 的增加不足以抵消背风建筑 $C_{d0,z}$ 的减小,因此,第 3 层的 β_z 小于第 2 层。D6 第 3 层的 $\gamma(50%)$ 大于第 2 层 $\gamma(40%)$,因此,第 3 层的 β_z 大于第 2 层。交错式设计工况顶层的 γ 进一步增加至 100%,大于行列式设计工况顶层的 $\gamma(50%)$,因此,其 β_z 最大,如图 15(c)所示。

4 结 论

提出了计算高度非均一建筑群截面拖曳力系数 $C_d(z)$ 的高度分层处理方案。该方案将在每种建筑高度的顶部将高度非均一建筑群划分为若干高度均一建筑群分层,并采用截面修正系数 β_z 将高度均一工况的拖曳力系数修正为高度非均一工况的截面拖曳力系数。在建筑群的垂直划分过程中,根据各层相对位置不同,将各分层归类为 3 种层类型,即底层、顶层和中间层,然后通过风洞实验研究建筑高度种类、层类型和层布局对截面修正系数 β_z 的影响,主要结论如下:

1) 建筑高度的非均一性对气流的流动调整过程有显著影响,尤其是在流动调整区和充分发展区的形成过程中,可能导致气流在建筑群中的分布更加复杂,使得气流难以形成稳定的充分发展区。

2) 对于顶层,随着建筑高度种类 N 的增加,仅迎风建筑截面拖曳力系数 $C_{d0,z}$ 增加,其余建筑 $C_{d0,z}$

变化较小。对于中间层,随着 N 的增加,迎风建筑 $C_{d0,z}$ 增加,同时其背风侧建筑 $C_{d0,z}$ 减小。对于底层,迎风建筑及顶层为迎风建筑的建筑单体,其 $C_{d0,z}$ 随 N 的增加而增加,而背风侧建筑 $C_{d0,z}$ 则随 N 的增加而减小。

3) β_z 表征为相对高度均一工况,高度非均一工况截面拖曳力系数 $C_d(z)$ 的变化值。 β_z 按底层、中间层和顶层的顺序增加。当 N 为 2 或 3 时,层布局对 β_z 的影响较小。当 N 增加到 4 时,交错式层布局的 β_z 高于行列式层布局的 β_z 。底层的 β_z 为负值,范围为 $-0.12 \sim -0.02$,而中间层的 β_z 为正值和负值,顶层的 β_z 最大。当 $N \leq 3$ 时, β_z 为 $-0.2 \sim 0.2$; 当 $N > 3$ 时, β_z 超过了 0.2,需要对 β_z 进一步修正。

参考文献

- [1] OKE T R. Street design and urban canopy layer climate[J]. *Energy and Buildings*, 1988, 11 (1/2/3): 103. DOI: 10.1016/0378-7788(88)90026-6
- [2] PALUSCI O, MONTI P, CECERE C, et al. Impact of morphological parameters on urban ventilation in compact cities: the case of the Tuscolano-Don Bosco district in Rome[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150490. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150490
- [3] LI B, JIANG C, WANG L, et al. Wind tunnel study on influences of morphological parameters on drag coefficient of horizontal non-uniform buildings[J]. *Building and Environment*, 2022, 207: 108412. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108412
- [4] ZAKI S A, HAGISHIMA A, TANIMOTO J, et al. Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 138: 99. DOI: 10.1007/s10546-010-9551-7
- [5] HAGISHIMA A, TANIMOTO J, NAGAYAMA K, et al. Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 132: 315. DOI: 10.1007/s10546-009-9403-5
- [6] MOHAMMAD A F, ZAKI S A, IKEGAYA N, et al. A new semi-empirical model for estimating the drag coefficient of the vertical random staggered arrays using LES[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 180: 191. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.08.003
- [7] SÜTZL B S, ROONEY G G, VAN REEUWIJK M. Drag distribution in idealized heterogeneous urban environments[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2021, 178(2): 225. DOI: 10.1007/s10546-020-00567-0
- [8] XIE Z T, COCEAL O, CASTRO I P. Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 129: 1. DOI: 10.1007/s10546-008-9290-1
- [9] CHENG H, CASTRO I P. Near wall flow over urban-like roughness[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104: 229. DOI: 10.1023/A:1016060103448
- [10] FAN M Y, LI W J, LUO X L, et al. Parameterised drag model for the underlying surface roughness of buildings in urban wind environment simulation[J]. *Building and Environment*, 2022, 209: 108651. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108651
- [11] SANTIAGO J L, MARTILLI A. A dynamic urban canopy parameterization for mesoscale models based on computational fluid dynamics reynolds-averaged navier - stokes microscale simulations[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 137(3): 417. DOI: 10.1007/s10546-010-9538-4
- [12] SNYDER W H. Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1972, 3(1): 113. DOI: 10.1007/BF00769111
- [13] LU M, SONG D, XING J, et al. Comparison of the morphological influence of canopy roughness space in Shenzhen and Harbin main urban areas[J]. *Sustainability in Energy and Buildings*, 2022, 336: 22. DOI: 10.1007/978-981-19-8769-4_3
- [14] 辛金超. 大气边界层的风洞被动模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- [15] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3. DOI: 10.1016/0894-1777(88)90043-X
- [16] LI B, WANG L, LIU Y, et al. Drag distributions of non-uniform buildings from surface pressure measurements in wind tunnel[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 618. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.07.032
- [17] BELCHER S E, JERRAM N, HUNT J C R. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 488: 369. DOI: 10.1017/S0022112003005019

(编辑 刘 彤)