建筑群不均匀性参数化方案的风洞实验

李 彪[1], 刘 京[1,2], 蒋志祥[1], 李美玲[1]

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,150090 哈尔滨;
2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室,150090 哈尔滨)

摘 要: 为了在参数化数值模型中更好地引入城市下垫面不均匀建筑群对大气动力特性的影响,从建筑几何结构的形态学角度出发,建立了描述城市建筑群不均匀性的形态学参数化方法,形成一组可以较为系统地表达建筑不均匀性的参数,包括迎风面积指数(λ_f)、平面面积指数(λ_p)、形状指数(S_{BC})和综合非直线系数(R). 利用风洞实验方法研究建筑群各形态学参数对拖曳力的影响,其中整个区域所受的拖曳力采用悬浮实验平台直接测量. 结果表明:周围环境地貌粗糙度的改变对拖曳力系数影响不明显;迎风面积指数是风向变化引起拖曳力系数变化的主要作用因素. 实验工况之间对比表明,在迎风面积指数、平面面积指数、形状指数分别增大或综合非直线系数减小的单因素变化情况下拖曳力系数会出现不同程度地增大.

关键词: 建筑群不均匀性;拖曳力系数;形态学参数;低速风洞
中图分类号: TU119 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)12-0067-06

Wind tunnel experiments of parameters scheme of non-uniformity buildings

LI Biao[1], LIU Jing[1,2], JIANG Zhi-xiang[1], LI Mei-ling[1]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To more precisely describe the effects of non-uniform buildings on atmospheric dynamics in parametric numerical models, this paper set up a morphological parameterization method to represent the non-uniformity of buildings according to the geometric morphology of buildings, including the frontal area index (λ_f), the plan area index (λ_p), the shape index (S_{BC}), and the integrated non-linear coefficient (R). Wind tunnel experiments were carried out to study the effect of buildings morphologic parameters on drag force. A floating experimental platform was designed to measure the drag force of the whole area. Results show that, different roughness of surrounding landforms has little effect on the drag coefficient, the frontal area index is the main factor of wind direction on the drag coefficient. The drag coefficient increases with the increasing of frontal area index, density index, shape index and the decreasing of integrated non-linear coefficient, respectively.

Key words: non-uniform of buildings; drag coefficient; morphological parameters; low speed wind tunnel

建筑构成的不均匀下垫面是城市气候形成的重要原因,其明显的不均匀性导致区域范围内大气能量和物质交换极大不均匀[1-2]. 本文从建筑几何结构的形态学角度上建立了不均匀性的参数化表达方法,利用精密的风洞实验进行了城市建筑群不均匀性参数影响大气运动特性的初步探讨. 以期更好地探寻城市建筑群不均匀性对城市气候的影响,为合理地规划城市布局、改善城市风环境提供理论依据.

1 建筑群不均匀性形态学参数化方案

1.1 建筑物迎风面积及平面面积

迎风面积直接反应建筑物的凸起对于来流的阻挡作用,建筑密度对大气动力学特性的影响也被广泛认可[3-4]. 本文采用建筑迎风面积指数 λ_f

收稿日期: 2012-05-15.
基金项目: 国家自然科学基金项目资助项目(50879015);中国气象局城市气象科学研究基金项目(UMRF201004).
作者简介: 李 彪(1986—),男,博士研究生;
刘 京(1972—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 刘 京,liujinghit0@163.com.

及平面面积指数 λ_p 两个参数表征建筑物迎风面和平面密度的特征. λ_f 是计算层内所有建筑物在垂直于风向上暴露于风中的面积之和与总的平面面积之比,λ_p 为在计算层内所有建筑物所占的平面面积之和与总的平面面积之比.

$$\lambda_f(z) = \frac{A_f(z)}{A_t};\ \lambda_p(z) = \frac{A_p(z)}{A_t}.$$

其中:$A_f(z)$ 为 z 高度计算层内所有建筑迎风面积之和;A_t 为总平面面积. $A_p(z)$ 为 z 高度计算层内所有建筑物建筑面积之和. 本文暂未考虑高度的不均匀性,因此两个参数均不随 z 值变化.

1.2 建筑布局

现实中的城市建筑群布局非常复杂,目前如 Hagishima 等[5]的风洞实验,采用了交叉排列、方格排列、钻石型排列、混合排列 4 类布局方式. Cheng 等[6]考虑了交错排列和对齐排列两种布局. 这些研究中所采用的不同布局方法,相互之间并无必然联系,也无确定理论,更无法定量判断某实际区域的布局形式. 为此本文基于路网构成城市的基本骨架[7]的观点提出新的表达方法. 一般认为路网的形式决定一个城市或小区的建筑布局形式,本文引入道路的非直线系数 R[8] 来衡量城市或小区建筑的总体布局,定义为道路网络中两节点间的实际道路距离与两节点间的空间直线距离之比,即

$$R = \frac{2\sum_{i=1}^{N_R}\sum_{j=i+1}^{N_R} R_{ij}}{N_R(N_R-1)}.$$

对于整个道路网的非直线系数,R 称为综合非直线系数,其中 N_R 为交通节点数量. 在本文中为避免进行大量的不必要运算,对此参数的算法进行合理简化:取计算区域最外围的 1 条闭合道路,等间距地分布 12 个节点,并使尽可能多的节点分布在道路交错口处,对如此确定出的 12 个节点作 66 个点对的非直线系数计算,最后取其算术平均值.

1.3 建筑物形状

以往的研究中鲜有考虑此因素的作用,大部分仅研究矩形截面的建筑. 本文将 Boyce-Clark 形状指数[9]引入建筑形状的数值表达,其思路是将研究对象与圆形进行比较得到一个相对系数,即

$$S_{BC} = \sum_{i=1}^{n}\left|100\left(\frac{r_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i}\right)-\frac{100}{n}\right|.$$

其中:n 为具有相等角度差的辐射半径的数量;r_i 为从优势点沿第 i 条辐射半径到图形周界的辐射半径长度. 本文认为建筑形状计算的优势点是 z 高度处的建筑水平截面外轮廓的形心,辐射半径数值 n 取 32.

2 风洞实验概述

本实验在哈尔滨工业大学低速风洞与浪槽联合实验室(WTWF-HIT)的小试验段中完成,风洞内部如图 1 所示. 小试验段宽 4.0 m、高 3.0 m、长 25 m,风速调节范围为3 ~ 50 m/s,当风速大于 5 m/s时风洞性能稳定,流场品质良好,空风洞中试验区域流场速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.46%、平均气流偏角小于 0.5°. 实验在 11 m/s指导风速下完成,主要包括风速和总体拖曳力测量两部分.

图 1 风洞内部实物图

2.1 测试仪器及方法

气流分布测量的基本测量要素是气流的瞬时速度,取模型区域中央 400 mm × 400 mm 正方形的 4 个顶点处风速作空间平均,测量竖直方向上 1.5 ~ 18.5H(H 为模型高度 105 mm)内 11 个位置的风速,采用 DENTEC 的 55P11 型热线风速仪进行测量,采样频率为 1 000 Hz,采样时间为12 s,考虑实验的重复性误差,每个工况重复采样 3 次.

总体拖曳力测量目标量是模型区域整体所受的拖曳力,使用 Interface 的 SPI-3LBF 型力传感器在本文设计的实验平台(见图 2)上测量获得,力传感器采样频率为 100 Hz,同样考虑实验的重复性误差,每个工况重复采样 6 次,每个样本为 60 s. 实验平台中模型安装平面完全独立地悬浮在水面上,除风的拖曳力作用外使其他干扰充分减小,并且为减小水张力的作用对悬浮机构所在水槽进行了特殊处理. 传感器受力平面与水槽边壁为点面接触,可以较精确地测量整个试验区域所受的总体拖曳力. 同时,实验平台具备改变风向测量的能力.

实验中每个测试工况的测试时间约为 600 s,测试前在零风速状态进行仪器置零,测试结束后力传感器继续在零风速工况下测量采集两样本,以避免弹性滞后所造成的影响. 风洞中参考风速采用毕托管测量.

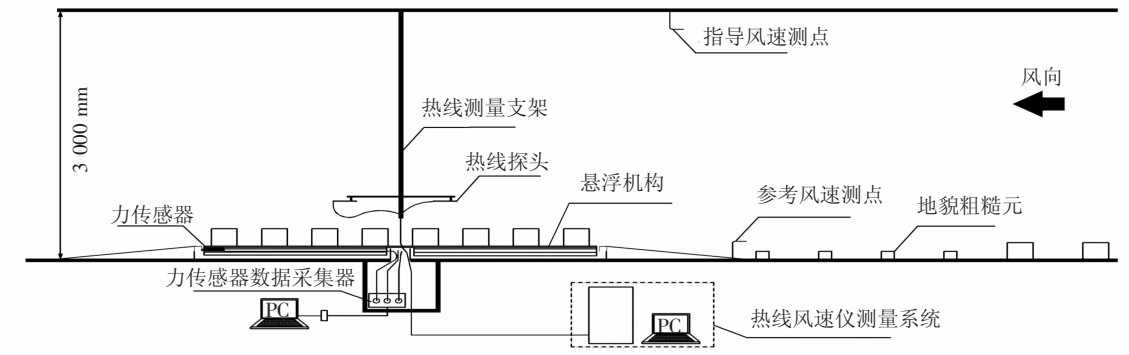


图 2　实验平台示意图

2.2　模型设计

文献[10 – 12]进行了关于迎风面积指数和平面面积指数的研究，并考虑城市的实际情况，本文采用的迎风面积指数分别为 40% 和 20%，建筑平面面积指数分别为 27.5% 和 42.5%. 对于两个新引入的参数，基于建筑和规划的分类并考虑现实情况，选择非对称方格式路网和方格对角式路网两种建筑布局，选择 H 形和矩形截面的建筑形状，两参数的量化设计结果如表 1.

表 1　形状指数和综合非直线系数的详细设计

建筑图例	形状	S_{BC}	布局图例	布局	R
	H 形	52.5		非对称方格式	1.332 5
	矩形	17.5		方格网对角式	1.177 5

本实验对各参数的影响进行独立的研究，实验模型的详细设计如表 2. 其中，编号 H42a 指建筑形状为 H 形，数字 4 代表迎风面积指数为 40.0%，数字 2 代表平面面积指数为 27.5%，a 代表非对称方格式布局；编号 R22b 指建筑形状为矩形，λ_f = 20.0%，λ_p = 27.5%，方格网对角式布局；其他编号规则相同.

表 2　详细模型工况设计

编号	λ_f/%	λ_p/%	建筑形状	长/mm	宽/mm	高/mm	数量	路网形式
H42a	40.0	27.5	H 形	98.7	92.8	105	99	非对称方格式
H24a	20.0	42.5	H 形	305.2	286.9	105	16	非对称方格式
H22a	20.0	27.5	H 形	197.5	185.6	105	25	非对称方格式
R22a	20.0	27.5	矩形	213.7	144.4	105	23	非对称方格式
R22b	20.0	27.5	矩形	213.7	144.4	105	23	方格网对角式

实验所使用的模型均为刚性模型，各工况模型的堵塞度见表 3，均满足风洞阻塞度的要求. 模型使用 ABS 板制作，具有足够强度，保证在试验风速下不发生破坏. 模型制作精度要求垂直边误差角不大于 1°.

表 3　实验工况

实验工况	模型	地貌	风向角/(°)	阻塞度/%
none-B	none	B 类	0	1.500
R22a-B	R22a	B 类	0	2.688
R22a-C	R22a	C 类	0	2.688
H22a-C	H22a	C 类	0	2.655
R22b-C	R22b	C 类	0	2.760
H42a-C	H42a	C 类	0	2.739
H42a-315C	H42a	C 类	315	3.701
H42a-45C	H42a	C 类	45	3.701
H24a-C	H24a	C 类	0	2.695

2.3　实验实施

本实验共进行了 9 个不同工况的测试，见表 3，所有工况下的阻塞率均小于 5%. 实验中还考查了不同地貌的影响，依建筑结构荷载规范确定 B、C 两类地貌，B 类是建筑不很密集的城市郊区，C 类是建筑较为密集的城市市区. 两类标准地貌依文献[13]中大气边界层被动模拟结果数据库确定，由于标准地貌粗糙元的作用，在实验段可以形成较理想的大气边界层标准风剖面和湍流度剖面，地面附近湍流强烈，符合相关规范标准，因而可不考虑风洞地面的边界层影响. 本实验还进行风向改变的测量，风向角以顺时针旋转为正，不同编号模型整体的具体布置如图 3 所示.

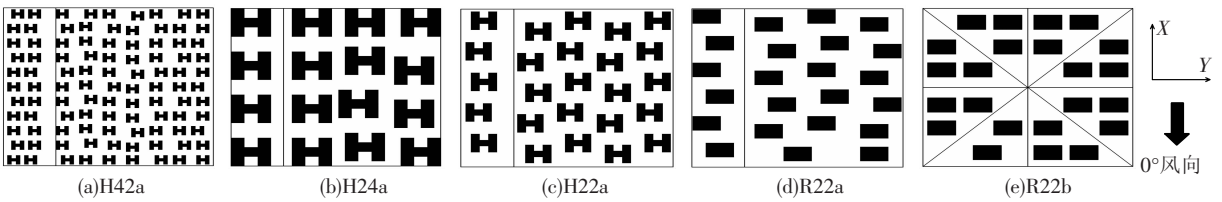
3　实验结果与分析

3.1　整体拖曳力测量结果

本实验利用悬浮机构直接测量得到整个模型区域所受的拖曳力，建筑群整体的拖曳力系数为

$$C_d = \frac{D}{0.5\rho A_b U_{ref}^2}.$$

其中：D 为建筑群整体拖曳力，A_b 为区域总面积，τ_b 为整个区域所受风的剪切力，U_{ref} 为指导风速.



(a)H42a (b)H24a (c)H22a (d)R22a (e)R22b

图 3 各编号模型整体平面布置图

各工况的平均拖曳力系数计算结果见表 4. 从表中可以初步看出,当建筑密度或迎风面积较大时拖曳力系数较大;H 形建筑群拖曳力系数较矩形建筑群大;建筑布局变化对拖曳力系数也有影响;地貌变化对拖曳力系数的影响不大. 另外,根据实验中各工况重复性误差检验结果,拖曳力偏差平均值小于 4.209%,标准偏差最大为 0.075 2,测试结果满足可靠性要求.

表 4 拖曳力测量所得平均拖曳力系数

工况	D/N	标准偏差	τ_0/ (N·m^{-2})	U_{ref}/ (m·s^{-1})	C_d/ 10^{-2}
H42a-C	3.727	0.056 9	1.456	11.08	1.933
H24a-C	3.932	0.042 3	1.536	11.05	2.039
H22a-C	3.321	0.038 9	1.297	11.00	1.722
R22a-B	2.631	0.075 2	1.028	11.03	1.324
R22a-C	2.431	0.067 2	0.950	10.78	1.280
R22b-C	3.000	0.040 6	1.172	11.08	1.556

3.2 地貌的影响分析

城市下垫面的粗糙度不同,会影响到城市大气边界层的形成规律,从而影响拖曳力系数. Hagishima 等[5]风洞实验研究和 Gillies 等[14]的室外现场研究有相似观点,认为在周围环境粗糙度从零增大到一定值时,拖曳力系数显著减小,而粗糙度在不断增大的一定范围内建筑物拖曳力系数减小并不明显,但上述实验中的粗糙元环境布置均缺乏理论性支撑. 因此本实验进行了标准地貌对拖曳力系数影响的实验. 当 C 类地貌改变为 B 类地貌,即粗糙度减小时,由图 4 可知,指导风速略有增大,地面附近参考点风速和拖曳力系数均随地貌粗糙度的减小而增大,但影响不显著,拖曳力系数的变化率仅为 3.36%,且拖曳力主要随指导风速变化,受地面附近参考点风速影响不大. 将本实验结果与 Hagishima 的实验结果进行定性地比较分析,如图 5 所示,发现两者具有基本一致的结果,因此本文认为 B、C 类地貌的改变对建筑物拖曳力系数影响较小. 考虑实际研究对象区域多包含在城市区域内部,后续试验工况均在 C 类地貌下进行,可以较好地表征周围环境的真实地貌.

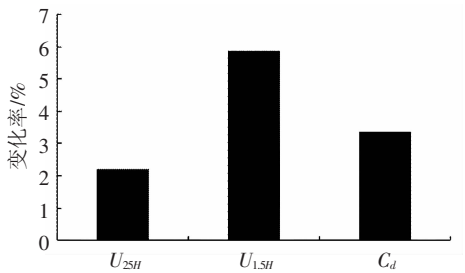


图 4 地貌粗糙度减小时参考点风速和拖曳力系数的变化率

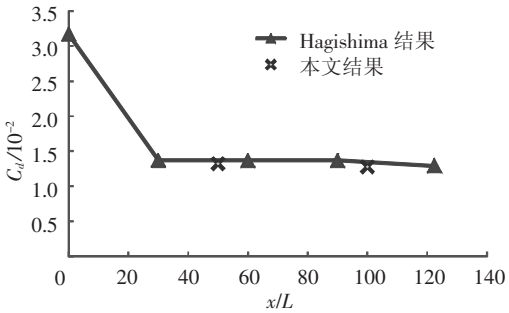


图 5 地貌变化对拖曳力系数的影响

3.3 形态学参数对大气动力学特性的影响

本实验考查了建筑物迎风面积不同对于大气动力特性的影响,结果如图 6,模型工况由 H22a-C 改变为 H42a-C 后,迎风面积由 20% 增加到 40%,来流指导风速 U_{25H} 和地面附近参考风速 $U_{1.5H}$ 略有增加,但变化不明显,而拖曳力系数却增大了 12.22%,可见迎风面积增大后建筑对大气边界层风场作用显著增强. 对风向的影响进行考察,如图 7 所示. 可以看出随着风向角从 0°到 45°再到 0°的变化,正方形悬浮平面在风的作用下,风向角在约 30°到 0°时有所偏转并且与边壁发生碰撞,影响了拖曳力的测量. 但迎风面积指数和拖曳力系数具有明显的同步变化趋势. 认为风向改变不是拖曳力系数变化的根本原因,而由风向变化引起的迎风面积指数改变才是拖曳力系数变化的主要影响因素,这与 C. Ratti 等[15]的计算结果一致,因此使用迎风面积指数的变化可表达风向变化.

本文对比了 H24a-C 和 H22a-C 工况,两者仅建筑平面面积指数不同,分别为 42.5% 和 27.5%. 风速测量结果如图 8 所示,风速廓线及湍流强度随高度 z 变化趋势良好,建筑平面面积指数大时风廓线整体数值较小,说明建筑平面面积

指数增大时对气流的拖曳作用加强. 测量所得拖曳力系数变化对比如图 9 所示. 建筑平面面积指数由 27. 5% 增大到 42. 5% 时，两参考点风速增加均≤0. 55%，即来流基本没有发生变化. 而拖曳系数增大了 18. 39%，说明平面面积指数对拖曳力系数的影响显著. 在本实验所进行的两种平面面积指数中，较大的平面面积指数会对大气运动产生较大的拖曳作用.

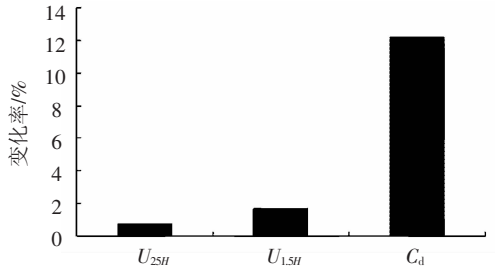


图 6　λ_f 增大对参考风速和拖曳力系数的影响

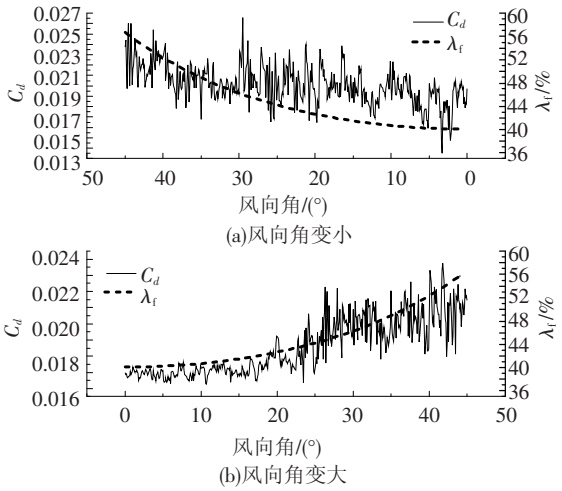


图 7　拖曳力系数和迎风面积指数随风向角的变化

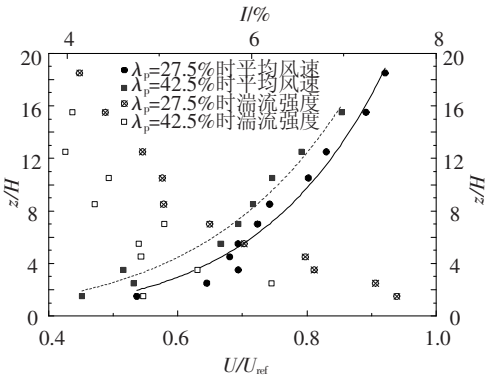


图 8　平面面积指数对风剖面的影响

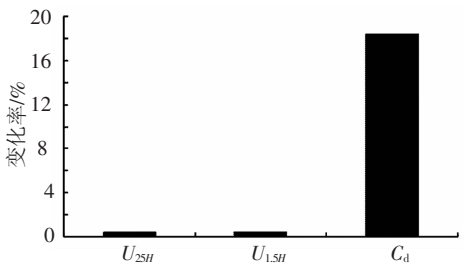


图 9　λ_p 增大时参考点风速与拖曳力系数的变化率

本文考查了建筑布局的影响，R22a-C 和 R22b-C 两工况仅建筑布局相异，前者为非对称方格式路网，后者为方格对角式路网，后者综合道路非直线系数较小，意味着其通行更加便捷，也即道路及道路交叉更多. 这两种工况的风速测量结果如图 10 所示，可以看出风剖面和湍流趋势形成均较好，方格对角式路网工况风速剖面数值相对较小，相应的湍流强度较强，说明气流在较小综合非直线系数工况下受到的阻力较大，主要是由于道路数目和交叉增多引起建筑布局较为错乱所导致.

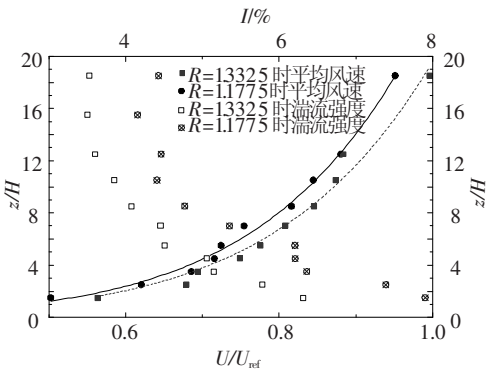


图 10　建筑布局对风剖面的影响

建筑布局对拖曳力系数的影响如图 11 所示，综合非直线系数由 1. 332 5 减小到 1. 177 5，来流风速略有增大，但变化较小，而拖曳力系数却增大了 21. 58%，可见建筑布局对拖曳力系数的影响较大. 这是由于综合非直线系数较小时该区域通行道路和交叉均较多，形成较多的通风廊道，使暴露在较大风速作用下的建筑物迎风面积增大，建筑区域所受拖曳力增大.

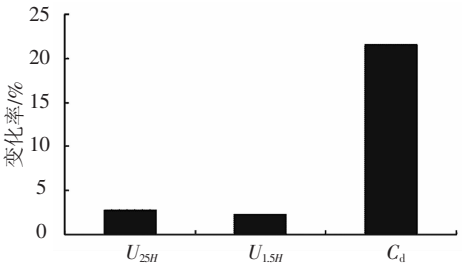


图 11　*R* 减小时参考点风速与拖曳力系数变化率

本文也考查了建筑形状的影响，H22a-C 与 R22a-C 模型工况仅建筑形状不同，前者为 H 型建筑，后者为矩形. 本文认为形状指数增大意味着形状与圆形相去较远，可以近似地认为是建筑平面图形的长宽比增大，一般伴随形状不规则性增加. 实验风速测量结果如图 12，风剖面和湍流强度剖面形成均较好，H 形模型对流场的阻力较大，其风剖面整体数值较小，说明形状系数大的建筑物较形状系数小的建筑物对风的拖曳作用更大. 拖曳力系数对比如图 13，形状指数由 17. 5 增大到 52. 5 后，在风速增大很小的情况下，拖曳力

系数增大了 36.83%，可见建筑形状变化对拖曳力系数影响较大，其原因在于当其他参数不变时，H 型建筑自身形状的凹凸起伏导致整个平面区域上建筑对风总的作用面积增加，同时加剧了湍动和衰减.

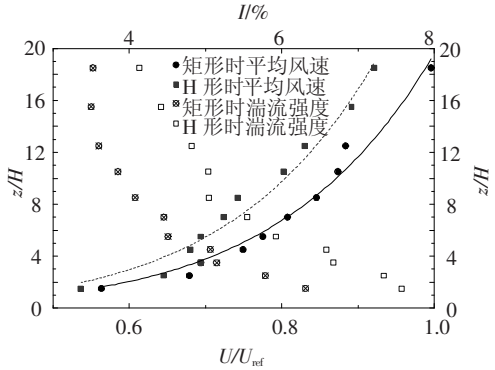


图 12 建筑形状对风剖面的影响

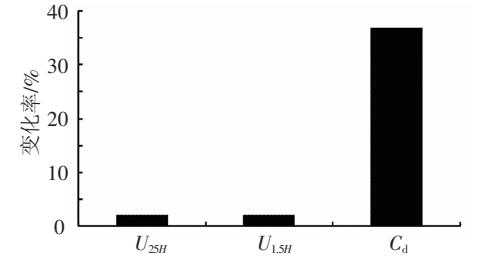


图 13 形状指数增大时参考点风速与拖曳力系数的变化率

4 结 论

1）提出了采用形态学参数化方案表征城市下垫面建筑群不均匀性的方法，建立了一组相对完整并互相制约的形态学参数，包括迎风面积指数、平面面积指数、形状指数和综合非直线系数，并利用风洞实验研究各形态学参数对大气动力学特性的影响规律.

2）地貌粗糙度改变对拖曳力系数影响较小，风向角改变引起建筑群迎风面积指数变化是影响拖曳力系数变化的主要因素.

3）当迎风面积指数由 20% 增大到 40%、平面面积指数由 27.5% 增大到 42.5%、形状指数由 17.5 增大到 52.5 或综合非直线系数由 1.332 5 减小到 1.177 5 时，建筑区域整体的平均拖曳力系数分别增大了 12.22%、18.39%、36.83% 和 21.58%.

参考文献：

[1] AMFIELD A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(1): 1 – 26.

[2] PIELKE R A, MARLAND G, BETTS R A, *et al.* The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases[J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2002, 360(1797): 1705 – 1719.

[3] KANDA M, MORIWAKI R, KASAMATSU F. Large eddy simulation of turbulent organized structure within and above explicitly resolved cube arrays[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2004, 112(2): 343 – 368.

[4] CHENG H, CASTRO I P. Near wall flow over urban-like roughness[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2002, 104(2): 229 – 259.

[5] HAGISHIMA A, TANIMOTO J, NAGAYAMA K, *et al.* Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2009, 132 (2): 315 – 337.

[6] CHENG H, HAYDENA P, ROBINSA A G, *et al.* Flow over cube arrays of different packing densities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(8): 715 – 740.

[7] 王思忠. 浅谈城市路网规划布局设计[J]. 现代城市研究, 2003(S2): 10 – 13.

[8] 陆建, 王炜. 城市道路网规划指标体系[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 62 – 67.

[9] BOYCE R R, CLARK W A V. The concept of shape in geography[J]. The Geographical Review, 1964, 54 (4): 561 – 572.

[10] SPANTON A M, HALL D J, WALKER S. A survey of the aerodynamic characteristics of some UK areas[C]// BRE Report CR. Garston: Building Research Establishment, 1996: 96.

[11] RATTI C, DI SABATINO S, BRITTER R, *et al.* Analysis of 3-D urban databases with respect to pollution dispersion for a number of european and american cities [J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2002, 2 (5/6): 459 – 469.

[12] DI SABATINO S, SOLAZZO E, PARADISI P, *et al.* A simple model for spatially-averaged wind profiles within and above an urban canopy[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2008, 127(1): 131 – 151.

[13] 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: 57 – 58.

[14] GILLIES J A, NICKLING W G, KING J. Shear stress partitioning in large patches of roughness in the atmospheric inertial sublayer[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2007, 122(2): 367 – 396.

[15] RATTI C, SABATINO S, BRITTER R. Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 84(1/2/3): 77 – 90.

（编辑 魏希柱）