

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.011

## 直升机典型城区环境流场计算与试验

孙伟 孙朋朋 林永峰

(中航工业直升机设计研究所,景德镇,333001)

**摘要:**首先,针对典型城区模型,在黏性非结构直角网格上求解了三维 Navier-Stokes(N-S)方程,并通过数值模拟计算了典型城区环境流场。其次,采用粒子图像测速(Particle image velocimetry,PIV)技术开展了城区流场测量试验研究。最后,通过对比试验与计算结果分析了典型城区流场特性。

**关键词:**城区流场;直角网格;N-S 方程;粒子图像测速

**中图分类号:** V211.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2016)02-0218-06

## Numerical Simulation and Experimental Research on Helicopter Typical Urban Area Flow-Field

Sun Wei, Sun Pengpeng, Lin Yongfeng

(AVIC China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

**Abstract:** Firstly, the numerical simulations for the flow-field of typical urban area models are carried out by solving 3-D Navier-Stokes(N-S) equations based on viscous unstructured Cartesian grid. Secondly, the flow-field of typical urban area is measured by using the particle image velocimetry(PIV). Finally, comparisons between testing results and numerical calculation results are conducted to analyze the characteristics of typical urban area flow-field.

**Key words:** urban area flow-field; Cartesian grid; N-S equations; particle image velocimetry (PIV)

直升机具有独特的垂直起降能力,可以在空中悬停,对复杂地面环境的适应性强,能在无准备场所或楼顶狭小平台起降。直升机的这些优点特别适合在城区使用,是固定翼飞机和其他交通运输工具所不能替代的。随着国民经济的进一步发展,直升机应用于医疗救护、安全保卫、城区人员接送、旅游观光、交通疏导与管制、高层建筑灭火等领域的机会将会越来越多。执行这些任务的直升机通常在城区起降,但是,由于城区建筑环境复杂,导致城区流场环境变得复杂,从而危害直升机在城区起降

过程中的飞行安全,影响了直升机的城市化进程<sup>[1-2]</sup>。

本文通过开展典型城区流场环境下的数值模拟计算和风洞试验研究,分析不同气象条件下城区流场的流动特性,为直升机在城区环境下的安全起降提供可靠的风场数据和飞行参考。

### 1 典型城区环境流场计算

城区绕流流场计算区域大,紊流度高。本文采用黏性自适应非结构直角网格,通过求解三维

收稿日期:2015-10-01;修订日期:2016-01-01

通信作者:孙伟,男,工程师,E-mail:chrdisw@163.com。

**引用格式:**孙伟,孙朋朋,林永峰.直升机典型城区环境流场计算与试验[J].南京航空航天大学学报,2016,48(2):218-223. Sun Wei, Sun Pengpeng, Lin Yongfeng. Numerical simulation and experimental research on helicopter typical urban area flow-field[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 218-223.

Navier-Stocks(N-S) 方程进行典型城区环境流场的计算与分析。

### 1.1 网格生成

考虑较复杂建筑对流场的影响,选择了双楼城区模型 A 和相邻近的高低楼模型 B 为计算模型,如图 1 所示,图中单位尺寸为 mm。

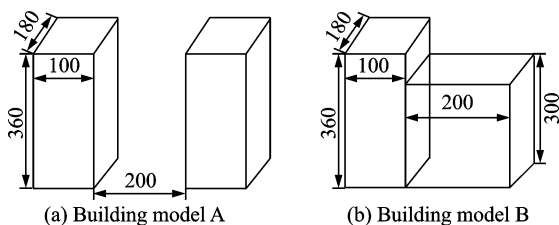


图 1 典型城区建筑模型 A、B

Fig. 1 Building models A and B of typical urban

网格划分采用黏性非结构直角网格,其具有对复杂外形适应性强、网格质量好、生成耗时较少以及可以整体网格整体求解的优点,缺点在于网格层与层之间的过渡区域网格尺度相差较大,对于计算收敛性有一定的影响。

网格的生成过程如下:将经表面三角划分的建筑模型放入空间自适应加密的非结构直角网格中,通过删除切割单元、光顺和投影等步骤,先生成无黏非结构贴体直角网格,再对物面附近投影层网格进行剖分,形成非结构直角黏性网格。本文采用的网格加密方式是结合局部感兴趣的流场进行长方盒子内的网格加密,如图 2 所示,长方盒子内作了 4 次加密。

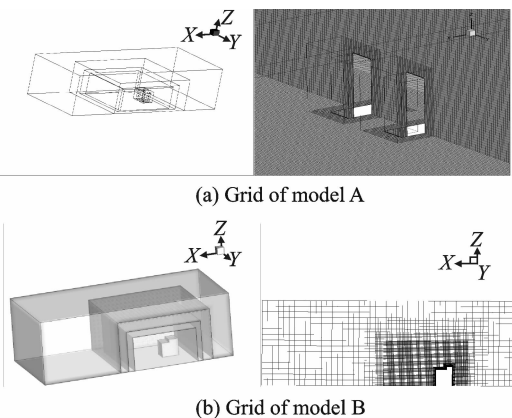


图 2 模型 A、B 网格示意图

Fig. 2 Grids of models A and B

### 1.2 计算方法

由于计算区域空间较大,本文采取准定常计算

模拟城区非定常的紊流流动,用可压缩程序求解不可压流动问题,捕捉对直升机城区起降影响较大区域的主要流动特征。

求解方程为时均形式的 N-S 方程,其与层流 N-S 方程具有相同的形式,只是应力张量中需加上雷诺应力张量,热通量中也需加上紊流的对应部分

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中:  $W$  为守恒变量;  $E$ ,  $F$  和  $G$  为对流量;  $E_v$ ,  $F_v$  和  $G_v$  为黏性通量。

将 Jameson 格心有限体积法推广用于三维 N-S 方程数值计算,加入人工耗散项,远场采用无反射边界条件,物面为无滑移边界条件,即速度为零。选用两方程  $k-\epsilon$  湍流模型使 N-S 方程闭合<sup>[3-4]</sup>

$$\rho_0 \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho_0 \epsilon \quad (2)$$

$$\rho_0 \bar{U}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} \left[ C_{\epsilon 1} v_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon \right] \quad (3)$$

式中:  $v_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon}$ ,  $C_u = 0.09$ ;  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ;  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

## 2 典型城区模型流场测量试验

典型城区环境的流场特性测量试验在南京航空航天大学直升机旋翼动力学低速回流式风洞进行。试验选取多种典型城区建筑物模型,采用粒子图像测速 (Particle image velocimetry, PIV) 技术测量了城区建筑物尾流中的涡流场分布及结构特性<sup>[5-7]</sup>,研究了不同风速、风向条件对流场特性的影响。

本次试验所用设备主要包括风洞系统、PIV 系统以及各类型建筑物模型。其中风洞试验段口径为  $2.4 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$ ,最大风速为  $50 \text{ m/s}$ ,如图 3 所示。测量设备仪器布置如图 4 所示。

试验选用了多种不同复杂程度的城区模型,并在风洞出口处地面布置了很多正方形的小方块,以模拟地面粗糙度的影响。测量试验现场如图 5 所示。由于篇幅所限,文中只给出与计算相关的模型 A 和模型 B 的部分计算结果。

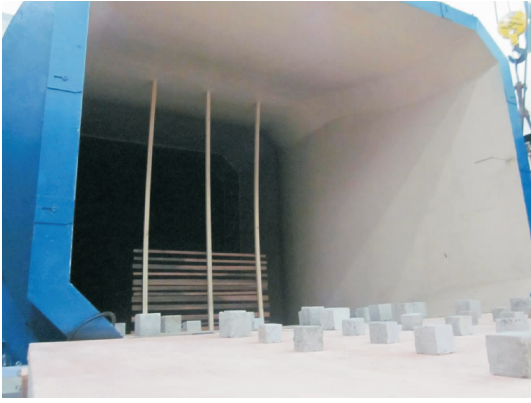


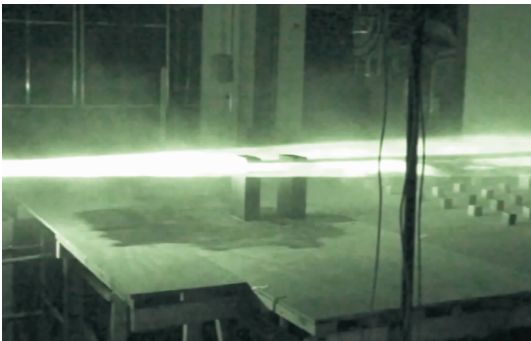
图3 低速回流风洞

Fig. 3 Low speed flow wind tunnel

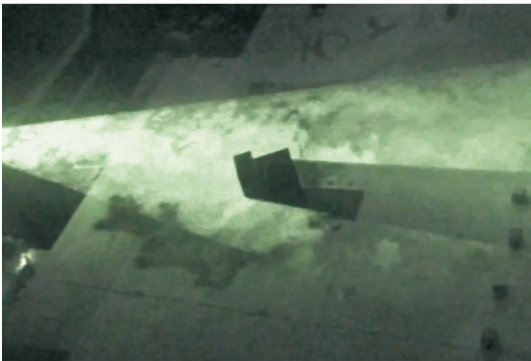


图4 测量设备仪器布置

Fig. 4 Layout of measuring equipment



(a) Model A



(b) Model B

图5 模型测量试验现场图

Fig. 5 Scene diagrams of measurement tests with models A and B

### 3 计算与试验结果对比分析

在城区飞行时,直升机一般选择风速较低的气象条件,因此文中选择风速  $v = 4 \text{ m/s}$ ,风向角度  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ$ 为计算状态,对比分析相同状态下计算与试验结果的异同。

选择典型特征剖面研究流场流动特性,模型A, B剖面位置如图6所示,图中尺寸单位为mm。

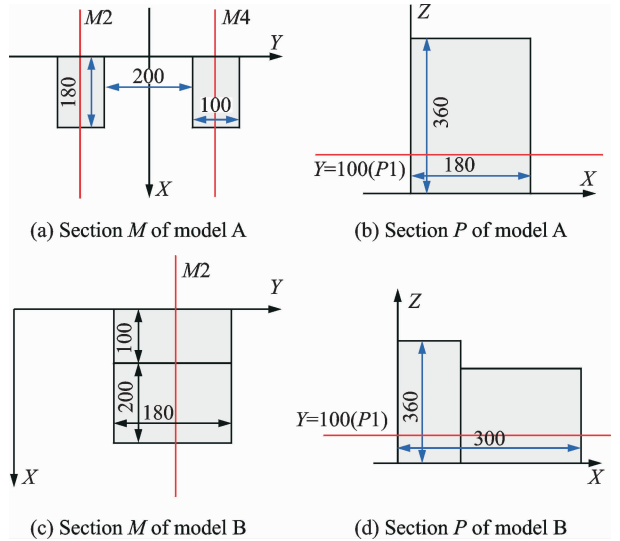
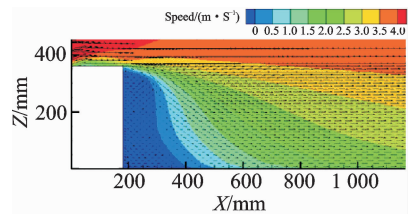


图6 模型A, B剖面位置示意图

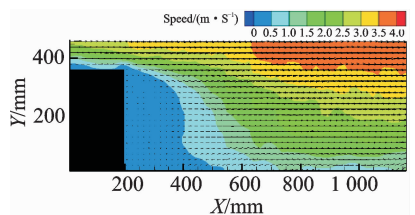
Fig. 6 Sectional drawings of models A and B

通过控制方程求解计算得出流场剖面速度云图<sup>[8]</sup>,并与试验结果进行了对比。图7给出了风速  $v = 4 \text{ m/s}$ ,风向角  $\alpha = 0^\circ$ 时,模型A剖面M2, P1速度云图。

定义模型建筑背后的回流区为城区流场的尾迹区<sup>[9-10]</sup>。对于计算结果<sup>[8]</sup>与PIV试验结果,在TECPLOT软件中通过取点的方法近似取出城区流场尾迹区边界上的若干点,对比计算与试验方法



(a) Calculation result (A-M2)



(b) Testing result (A-M2)

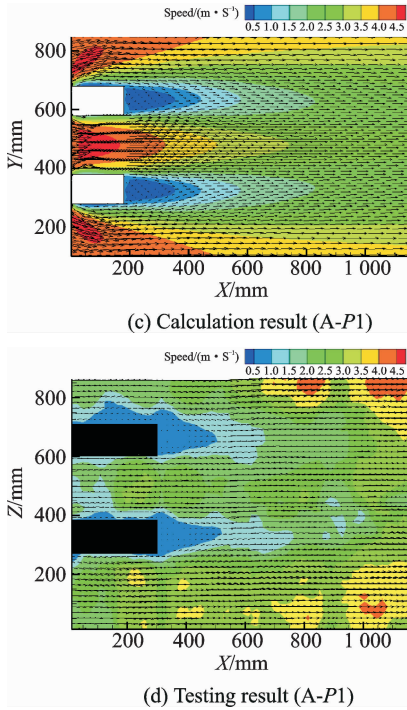


图 7 风速 4 m/s,风向角 0°时,模型 A 剖面 M2,P1 速度云图  
Fig. 7 Velocity contours of sections M2 and P1 of model A at  $v=4$  m/s,  $\alpha=0^\circ$

获得的尾迹区边界。图 8 给出了模型 A 剖面 M2 尾迹区边界试验值与计算值对比曲线。

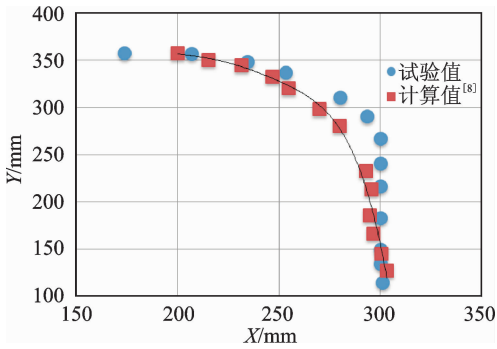


图 8 模型 A 剖面 M2 尾迹区边界对比  
Fig. 8 Comparison between testing and computation results of boundary of wake region of section M2 in model A

图 9 给出了风速  $v=4$  m/s,风向角  $\alpha=0^\circ$ 时,模型 B 剖面 M2,P1 速度云图。图 10 给出了模型 B 剖面 P1 尾迹区边界试验值与计算值对比曲线图。

对比图 7~10 中试验与计算的结果可得,相同状态下同一位置剖面处的流场流动特征基本一致,剖面流场速度分布相似,流场尾迹区边界也较为接近。造成结果差异的原因可能有:计算中参数选择带来的误差及试验本身的测量误差。此外,试验中通过在来流上游放置很多小方块模拟地面粗糙度

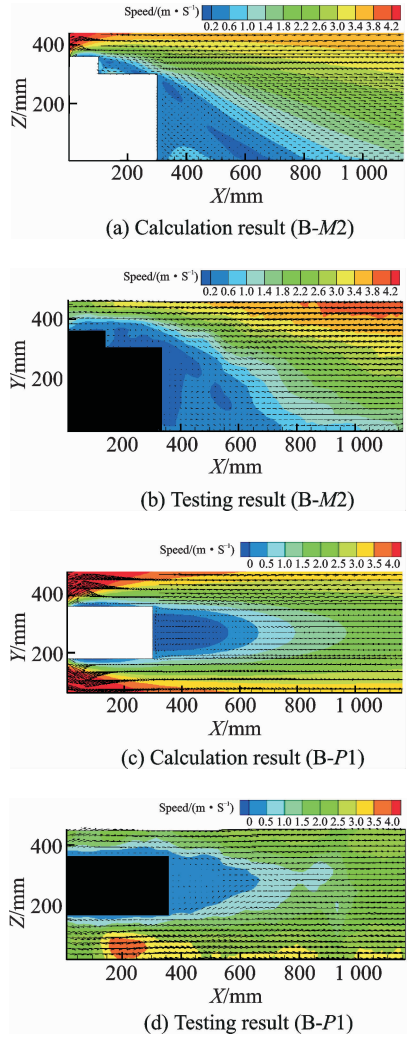


图 9 风速 4 m/s,风向角 0°时,模型 B 剖面 M2,P1 速度云图  
Fig. 9 Velocity contours of sections M2 and P1 of model B at  $v=4$  m/s,  $\alpha=0^\circ$

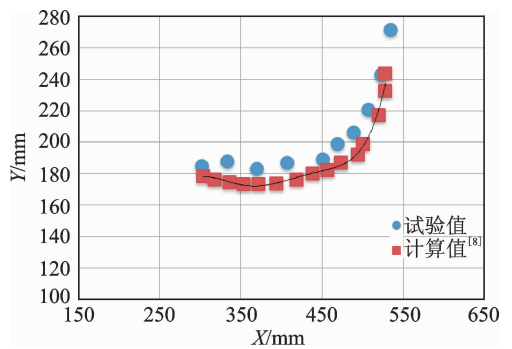


图 10 模型 B 剖面 P1 尾迹区边界试验值与计算值对比  
Fig. 10 Comparison between testing and computation results of boundary of wake region of section P1 in model B

的影响,而在数值计算中,只是简单地以一定的地面粗糙度系数来代替,这也会造成结果上的差别。

总体而言,城区流场的数值计算结果与 PIV



测量试验结果较为一致,能够正确捕捉流场的主要特征及尾迹区的流动特性。因此,本文建立的基于无黏非结构直角网格和三维 N-S 方程求解简化城区环境流场的计算方法是可行的,可进一步应用于城区流场环境的分析研究中。

图 11 给出了风速  $v=4\text{m/s}$ , 风向角  $\alpha=30^\circ$  状态下模型 A 剖面 P1 的尾流场,由图中可以看出,下游建筑的尾迹区比上游建筑要大许多,这是由于气流流过上流建筑后产生了分离,紊流度增加,又流经下游建筑,使得气流进一步分离,漩涡强度也进一步增加,尾迹区增大。可见,楼群建筑的绕流过程比单一建筑的流场更加复杂<sup>[11]</sup>。直升机在这样的楼群中进行起降时,其同一气动部件可能处于截然不同的流动环境中,从而在机体上产生力矩作用,引起直升机姿态的急剧变化。飞行员在这一情况下要进行更多的总距、脚蹬以及周期变距操纵以保持直升机的平衡飞行,当漩涡较强或者发生操纵失误时,容易发生危险甚至引起飞行事故。

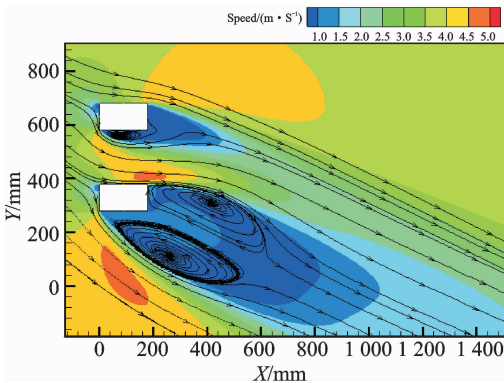


图 11 风速  $4\text{m/s}$ , 风向角  $30^\circ$  时,模型 A 剖面 P1 速度云图  
Fig. 11 Velocity contour of section P1 of model A at  $v=4\text{m/s}$ ,  $\alpha=30^\circ$

城区模型 B 是相邻近的高低楼的组合模型,自然风从高楼一侧吹来,在低楼顶部和背风面形成较强的漩涡,且在低楼顶部上方的漩涡更强<sup>[12]</sup>。图 12 给出了风速  $v=4\text{m/s}$ , 风向角  $\alpha=0^\circ$  时,模型

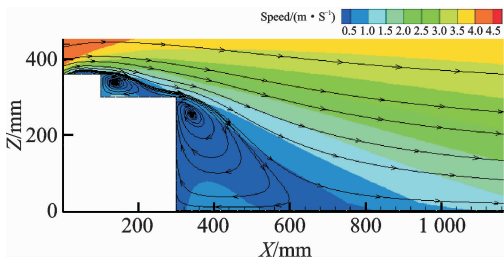


图 12 风速  $4\text{m/s}$ , 风向角  $0^\circ$  时,模型 B 剖面 M2 速度云图  
Fig. 12 Velocity contour of section M2 of model B at  $v=4\text{m/s}$ ,  $\alpha=0^\circ$

B 剖面 M2 速度云图。如果直升机将低楼的楼顶作为起降点,那么尤其是在风速较大的情况下,尾迹区内旋流对直升机的操纵和姿态会造成较大的影响,并引起飞行员操纵量的增加。因此,直升机在城区飞行时,应尽量避免直接在建筑的尾迹区内起降。

## 4 结 论

本文选择了两种简化城区模型,通过数值模拟计算,在与 PIV 测量试验结果对比验证的基础上,分析研究了典型城区建筑环境尾迹区的流场特性,总结如下:

(1) 本文建立的基于非结构黏性直角网格和 N-S 方程求解计算的城区流场数值模拟方法能够正确捕捉城区流场特征,适用于城区流场的计算研究。

(2) 楼群建筑的绕流比单一建筑更加复杂。相邻建筑的尾流会相互干扰影响,使得下游尾迹区范围增大,漩涡增强。

(3) 直升机在城区进行起降操作时,尾迹区内旋流的作用会引起直升机姿态的迅速变化和飞行员操纵量的增加,应尽量避免直接在建筑的尾迹区内进行起降。

## 致 谢

本文 PIV 测量试验是在南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室的风洞中进行的,在此对参与试验人员的辛勤工作表示感谢!

## 参考文献:

- [1] David G. Urban wind modeling with application to autonomous flight [D]. Ottawa: Carleton University, 2009.
- [2] Peisen D J, Lobosco R. New York downtown Manhattan (Wall Street) heliport—Operations analysis [R]. DTFA01-87-C-00014, 1991.
- [3] 陈义胜, 庞贻倍, 闫永旺. 建筑间距对大气流动及输移特性影响的研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 24-27.  
Chen Yisheng, Pang Yunji, Yan Yongwang. The investigation of the effect of building space on atmosphere flow and transport characteristics [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(2): 24-27.
- [4] Guenther A, Lamb B, Stock D. Three-dimensional numerical simulation of plume downwash with a k-

- turbulence model[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(13):633-643.
- [5] 赵维义. PIV 测量舰船空气尾流场[J]. *实验流体力学*, 2007, 21(1):31-35.  
Zhao Weiyi. PIV measurements of the warship airwake[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1):31-35.
- [6] Adrian R J. Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow [J]. *Laser Anemometry in Fluid Mechanics*, 1988 (3): 115-129.
- [7] Cenedese A, Paglialunga A. Digital direct analysis of a multi-exposed photograph in PIV[J]. *Mineralium-Deposita*, 1993, 29(1):273-280.
- [8] Snyder W H, Lawson R E. Wind-tunnel measurements of flow fields in the vicinity of buildings[C]// Eighth Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology. MA: American Meteorological Society, 1994.
- [9] Brown M J, Lawson R E, Al E T. Comparison of centerline velocity measurements obtained around 2D and 3D building arrays in a wind tunnel [C]// Proceedings of ISEH. Tempe, AZ: International Society of Environmental Hydraulics Conference, 2001.
- [10] Meroney R N, Leitl B M, Rafailidis S, et al. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 81(1/2/3):333-345.
- [11] Kastner-Klein P, Fedorovich E, Rotach M W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(9):849-861.
- [12] Cochran L, Peterka J, Petersen R. Modeling of rooftop helicopter exhaust flow dispersion[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(1/2/3):347-360.

本文已收编于 2015 年全国直升机年会内部交流论文集

