

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.04.003

# 基于激光雷达数据的首都机场风场模拟

刘 磊<sup>1</sup>, 吴松华<sup>1,2</sup>, 张洪玮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;

<sup>2</sup> 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266100 )

**摘 要:** 低空风效应是指在特定的风况条件下, 机场建筑物或其他位于跑道附近的人工结构对气流造成显著扰动的现象, 该效应易引起湍流甚至是出现风切变, 进而给飞机的升降过程带来困难。采用计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 方法对首都机场进行风场模拟, 并基于 CFD 在输入风速设置上的局限性, 提出一种将高精度、高分辨率的激光雷达测风数据导入 CFD 的方法, 来研究这些地物对首都机场风速的影响。通过对模拟结果的分析, 在风速为 11~15 m/s 的西北风条件下的东跑道以及在同等风速的东南风条件下的西跑道与中间跑道均受到较大影响。

**关键词:** 低空风效应; 激光雷达; 计算流体力学方法; 风场模拟

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)04-0259-07

## Wind Field Simulation of Capital Airport Based on Lidar Data

LIU Lei<sup>1</sup>, WU Songhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongwei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

<sup>2</sup> Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The low-level wind effect refers to the phenomenon that the airport structure or other artificial structures located near the runway cause significant disturbance to the airflow under certain wind conditions. This effect is likely to cause turbulence or even wind shear, and bring difficulties to the aircrafts' takeoff and landing. The computational fluid dynamics(CFD) method was adopted to simulate the wind field at Capital Airport, Beijing, China. To overcome the limitation of CFD in the setting of input wind speed, high-precision and high-resolution data measured by lidar were introduced into CFD as input condition to investigate the influence of buildings and artificial structures on wind speed at Capital Airport. The simulation results show that when the wind speed of 11~15 m/s under northwest wind condition was applied, the air flow near east runway was influenced significantly. The same situation happened in the west runway and the middle runway under the south wind condition with the same wind speed.

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41471309),

**作者简介:** 刘 磊 (1992 - ), 四川成都人, 研究生, 主要从事复杂地形 CFD 风场模拟方面的研究。

**E-mail:** 380097062@qq.com

**导师简介:** 吴松华 (1976 - ), 男, 山西大同人, 教授, 主要从事大气激光雷达、多普勒测风激光雷达、海洋激光雷达和星载激光雷达方面的研究。 **E-mail:** wush@ouc.edu.cn

**收稿日期:** 2018-03-26; **修改日期:** 2018-06-09

Key words: low-level wind effect; lidar; computational fluid dynamics method; wind field simulation

## 1 引言

低空风效应是指在特定的风况条件下,气流因机场建筑物或其他位于跑道附近的人工结构造成显著扰动,引起湍流甚至是出现风切变。当气流经过建筑物时,气流会越过、绕过建筑物或者被阻挡,类似河流中的石块下游所出现的波浪以及漩涡,如果建筑物较大且距离跑道较近,便有可能使风场发生极速变动,进而被飞行员视为风场的改变,如逆风、侧风改变,风切变或者湍流等。这些风场的改变,都会给飞机的起降过程带来困难。为了研究地物对机场区域低空风效应的影响,通过计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)对首都国际机场进行风场模拟。

Fluent 是目前应用最为广泛的 CFD 软件之一,包含多种物理模型和参数化方案,基于有限体积法,可以实现风场的数值模拟。输入条件在 CFD 模拟风场中起着至关重要的作用,但是在使用 Fluent 模拟风场时,边界条件的设置存在一定的局限性,即通过设置速度入口条件为一条幂指数风廓线,这种方法没有包含真实的大气运动信息,因而很难将幂指数风廓线等效于当地实际风廓线<sup>[1]</sup>。后来人们尝试中尺度模式与 Fluent 耦合的方法,将中尺度模式通过多重嵌套方法,得到高精度的风场数据,进而将结果与 Fluent 耦合,作为 Fluent 速度入口的边界条件。中尺度模式耦合 Fluent 的方法相较于幂指数风廓线的方法,包含了真实的大气环流信息,更加贴近真实风廓线,最终的数值模拟结果也更加准确<sup>[2]</sup>。

但是对于研究小尺度风场,中尺度模式耦合 Fluent 的方法也存在着一定的不足,首先分辨率很难满足;其次 Fluent 研究区域的边界需要和中尺度模式的网格重合,这样才能将中尺度模式结果当作 Fluent 的速度入口边界条件;此外中尺度数值模拟会产生一定误差,在研究区域内如果没有测风塔,模拟结果的订正将会存在问题,单纯依靠历史气象资料进行订正的方法也还需要进一步的研究。而且中尺度数值模拟的风速与测风塔测得的风速也不相同,中尺度模式网格点上的风速代表网格平均值,测风塔测得风速代表的是观测点周围一定区域,因而直接将中尺度模式模拟结果当作测风塔测得数据导入 CFD 也是不完全合理的<sup>[3]</sup>。

为小尺度风场模拟提供一个高分辨率、高精度的风场数据,对最终的模拟效果起着至关重要的作用。测风塔可以提供满足要求的风廓线,但是架设成本高、不灵活,因此不可能在小尺度研究区域内架设多个,且一个测风塔往往表征一个区域,该区域大小与地形地貌有关,在地势平坦处可代表半径为 5~10 km 的范围,在地形较杂地区就只能代表半径 2~3 km 的范围。相比测风塔而言,激光雷达是一个更好的选择。激光雷达可以测得更高分辨率、更高精度的风场数据,且探测范围更大。激光雷达通过向大气中发射一束激光光束,通过检测大气中气溶胶粒子的光回波信号所产生的多普勒频移量,获得激光光束方向的径向速度,通过三维分解获得水平风场信息。具有安放灵活、体积小、时空分辨率高、数据获取率高等优点。将激光雷达测得风场数据作为 Fluent 的输入条件,可以满足小尺度精细风场的研究。

## 2 激光雷达

使用放置于首都国际机场机场气象站气象观测台、由中国海洋大学自主研发的相干多普勒测风激光雷达,该雷达采用无机械扫描部件的风廓线测量模式,可以测量 40~240 m 高度处任意一点的水平风速、风向,测量精度高( $\leq 0.1$  m/s)。激光雷达采用多波束扫描模式(Doppler beam swing, DBS),共测量东、西、南、北和垂直五个方向的径向风速,将该五个径向风速进行矢量分解,可以得到大气风场的水平分量和垂

直分量,进而得到大气风廓线。

### 3 CFD 初始条件设置

#### 3.1 计算域

模拟区域主要包含首都国际机场三条跑道和三座航站楼,根据 Google Earth 数据,在 CAD 软件中画出该区域的二维平面图,其中包括航站楼、跑道、草地、湖、混凝土地面、建筑区等区域范围,具体地物类型如图 1 所示,然后导入 Rhino 中进行三维建模,最后得到机场三维模型。

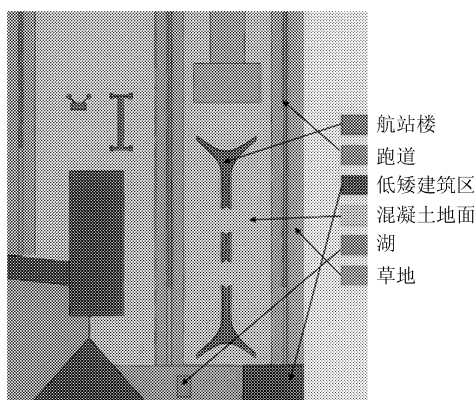


图 1 机场地物类型

Fig.1 Types of ground object at the airport

流体计算域指的是在流体计算过程中,参与积分的区域,通常这个区域需要形成一个封闭的域,但是外边界的合理选取确是建立计算域中的难点。采用目前比较常用的方法建立计算域,即当研究区域内最高的建筑物高度为  $H_{\max}$  时,计算域的上边界、上风向、侧向高度至少为  $5H_{\max}$ ,下风向距离建筑物至少为  $15H_{\max}$  [4]。最后整个计算域范围长 5182 m,宽 3900 m,高 200 m。

#### 3.2 网格划分

网格可以划分为结构化网格和非结构化网格,结构化网格生成速度快,且网格质量好,数据结构简单,但是只适用于形状规则的表面,复杂外形的贴体网格生成比较困难;非结构化网格利用三角形(体)在定义二维(三维)复杂外形时的灵活性,能更好地生成复杂外形的贴体网格,在生成过程中按照一定的准则进行优化判断,自动生成高质量的网格,且可以随意控制网格的大小和密度,无需分块或用户干预 [5]。因为首都机场航站楼的外形并不规则,所以实验采用 ICEM 进行四面体非结构化网格划分,航站楼区域进行加密处理,对于壁面问题,因为临近壁面位置法向速度存在很大梯度,并不属于湍流充分发展区域,高雷诺数的湍流模型(如标准  $k-\varepsilon$  模型、Realizable  $k-\varepsilon$  模型、RNG  $k-\varepsilon$  模型等)无法求解该区域,因此对于该区域内流场的计算,有两种常用的处理方法,一种是利用壁面函数法;另一种是通过加密网格,利用壁面模型法。因为计算资源有限,而且近壁面粘性子层的数据对于实验不是特别重要,如果采用壁面模型法,加密网格的方法即为划分边界层网格,这样网格数量将极大增加,计算资源的消耗也会相应极大地增加;壁面函数是对近壁面的半经验描述,壁面函数法不对粘性影响比较明显的区域[黏性子层(Viscous sublayer region)和过渡层(Buffer layer region)]进行求解,而用壁面函数将壁面上的物理量与湍流充分发展区内的物理量联系起来,在划分网格的时候,不需要像壁面模型法一样在近壁面进行加密,只需要将第一个节点布置在湍流充分发展区域内。 $k-\varepsilon$  方程是高雷诺数模型,其要求第一层网格位于湍流充分发

展区域,而此时若加密网格导致第一层网格处于粘性子层内,则会造成计算结果恶化<sup>[6]</sup>。因此实验采用壁面函数法来处理近壁面区域,全局最大尺寸为 16 m,航站楼区域进行加密,最大尺寸为 8 m,其余区域最大尺寸均为 16 m,第一层网格高度为 10 m,在 200 m 的高度内均匀划分 20 层,网格数量总计 180 多万个。

首都国际机场在冬春季节平均风速较大,风向主要为西北和东南风,低空风效应在该季节也较常发生,且发生时近地面风速为 11~15 m/s,风向为西北风<sup>[7]</sup>。模拟该风速条件下,西北及东南两个主风向。

Fluent 中速度入口是以面的形式进行输入,对理想廓线及实测廓线分别进行模拟。首先采用风工程中常用的指数公式:  $U = U_{10}(Z/10)^\alpha$ , 其中  $U_{10}$  为距离地面十米高度风速,  $Z$  为高度,  $\alpha$  为地面粗糙度系数,这里  $U_{10}$  设为 13 m/s,  $\alpha$  值为 0.15,  $\alpha$  值由机场实测风廓线数据拟合得到,将该廓线作为西北与东南风条件下的输入风廓线;其次采用激光雷达实测风廓线数据作为输入,选取 2017 年 4 月 18 日的西北风数据作为输入,选取 200 m 高度范围内的测风数据,雷达观测盲区高度为 40 m,风速在 40~200 m 高度范围内为 13~15 m/s,此外因激光雷达测得风廓线是离散风廓线,而 Fluent 需要的是一条连续风廓线,故通过用户自定义函数 (UDF) 进行插值,对 40~200 m 范围采用内插,对 0~40 m 范围采用外插,主要根据实测数据进行指数公式拟合,进而完成导入。

计算域总共有东、南、西、北、上、下共六个面,每个面均需要设置边界条件。在西北风条件下,北面与西面采用速度入口边界 (velocity-inlet),南面与东面采用出口边界 (outflow),上边界采用对称边界 (symmetry),下边界采用无滑移壁面 (no slip wall);在东南风条件下,设置同理<sup>[8]</sup>。

根据具体地物分别设置各区域的粗糙度高度。在粗糙度的设置上,因 Fluent 中需要设置的是粗糙度高度 (roughness height),即表示相应地表区域内粗糙度元素的平均高度<sup>[9]</sup>,而在风工程中,通常所说的粗糙度即粗糙度长度,是指近地层风速向下递减到零时距离地面的高度,涉及到的地物类型如表 1 所示<sup>[10-11]</sup>,二者之间需要进行转化,粗糙度高度和粗糙度长度之间可以用一个合适的公式进行转化,即粗糙度高度 = 19.586 × 粗糙度长度<sup>[12]</sup>。

不考虑科里奥利力以及热对流的影响,并且假设空气为不可压缩稳定流,采用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合,采用二阶迎风格式进行动量及湍流运输方程的离散,湍流模型采用 Realizable k-epsilon 模型<sup>[13]</sup>。

表 1 不同地物粗糙度长度

Table 1 Roughness lengths of different ground

objects	
地物类型	粗糙度长度 (m)
湖面	0.0002
跑道	0.004
草坪	0.01
建筑表面	0.02
混凝土	0.024
低矮建筑区	0.6

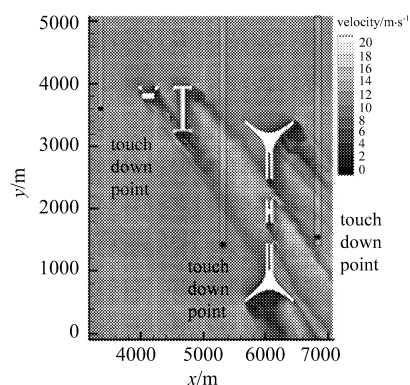


图 2 10 m 高度水平风场截面

Fig.2 Horizontal wind field cross profile at a height of 10 m

#### 4 模拟结果分析

重点关注各跑道南端下滑道风速情况,此外由于计算资源的限制,未对研究区域内的低矮建筑区进行

精细建模, 通过设置粗糙度代替。

根据国内外机场的经验, 当背景侧风时速为 12.86 m/s, 而侧风在短距离内的改变超过 3.6 m/s, 便会给飞机的起降带来困难。

西北风理想廓线条件下, 10 m 高度风速云图如图 2 所示。西跑道及中间跑道下滑道区域受航站楼影响较小, 提取两条跑道下滑道风速进行分析, 无较大速度波动; 东跑道受 T3 航站楼影响较为显著, 风速变化较为剧烈。下滑道风速如图 3 所示, 其中  $v_x$  表示侧风风速,  $v_y$  表示顶风风速,  $v$  表示实际风速。在距离着陆台水平距离 0.8 km 以及 1.3 km 左右, 风速变化较大, 易发生低空风效应, 给起降过程带来困难。

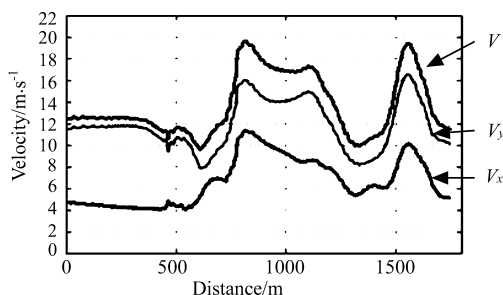


图 3 东跑道下滑道风速

Fig.3 Wind speed of east runway glide path

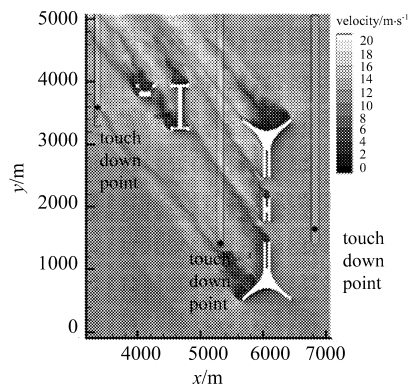


图 4 10 m 高度水平风场截面

Fig.4 Horizontal wind field cross profile at a height of 10 m

东南风理想廓线条件下, 10 m 高度风速云图如图 4 所示。东跑道下滑道区域受航站楼影响较小, 提取东跑道下滑道风速进行分析, 无较大速度波动; 西跑道与中间跑道受航站楼影响较大, 西跑道下滑道风速如图 5 所示, 中间跑道下滑道风速如图 6 所示, 两条下滑道均在离着陆台水平距离 1 km 左右开始出现风速波动。西跑道波动范围相对较小, 低空风效应不明显。中间跑道风速波动较为剧烈, 在距离着陆台水平距离 0.4 km 以及 1 km 左右, 风速变化较大, 易发生低空风效应, 给起降过程带来困难。

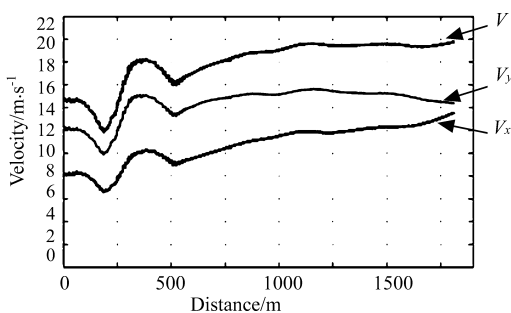


图 5 西跑道下滑道风速

Fig.5 Wind speed of west runway glide path

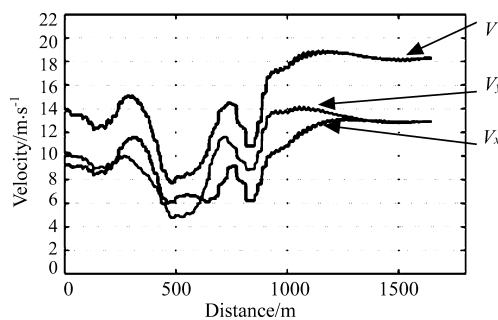


图 6 中间跑道下滑道风速

Fig.6 Wind speed of middle runway glide path

西北风实测廓线条件下, 10 m 高度风速云图如图 7 所示。西跑道及中间跑道下滑道区域受航站楼影响较小, 提取两条跑道下滑道风速进行分析, 无较大速度波动; 东跑道受 T3 航站楼影响较为显著, 下滑道风速如图 8 所示, 风速变化较为剧烈, 与理想廓线下的模拟结果趋势相同, 在距离着陆台水平距离 0.8 km 以及 1.3 km 左右, 风速变化较大, 易发生低空风效应, 给起降过程带来困难。

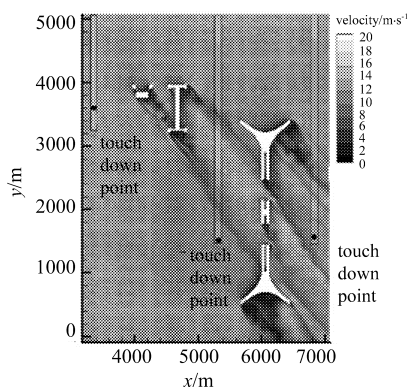


图7 10 m 高度水平风场截面

Fig.7 Horizontal wind field cross profile at a height of 10 m

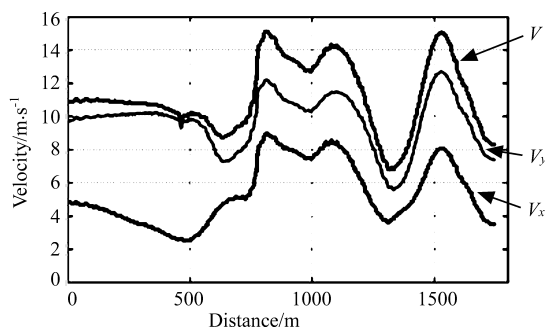


图8 东跑道下滑道风速

Fig.8 Wind speed of east runway glide path

## 5 结论

输入条件的精度对 CFD 流场模拟的精度起着至关重要的作用。在使用常规输入条件的基础上, 提出采用高精度、高分辨率的激光雷达测风数据作为输入条件, 进一步提高 CFD 流场模拟精度, 根据 Google Earth 数据建立首都国际机场的二维 CAD 模型, 并根据地物类型对模型表面进行划分, 进而导入三维建模软件 Rhino 中, 完成三维模型的建立, 通过编写 UDF 插值程序, 实现将激光雷达测风数据导入 Fluent 作为输入条件, 同时寻找粗糙度高度与粗糙度长度的关系, 通过查表得到不同地物粗糙度长度, 根据二者的关系, 得到不同地物的粗糙度高度, 完成对计算域下边界条件的设置, 最终完成对首都国际机场的流场模拟。通过对模拟结果的分析, 发现在风速为 11~15 m/s 的西北风条件下, 西跑道与中间跑道受航站楼影响较小, 东跑道受影响较大, 风速变化明显, 易发生低空风效应; 在风速为 11~15 m/s 的东南风条件下, 东跑道受航站楼影响较小, 西跑道与中间跑道受影响较大, 风速变化明显, 易发生低空风效应, 其中西跑道也受跑道南端低矮建筑区的影响, 由于采用粗糙度来代替精细建模, 该区域对风速的影响被相对弱化, 后续还可单独对该区域进行模拟分析。

## 参考文献:

- [1] Cheng Xueling, Hu Fei, Zeng Qingcun. Refined numerical simulation of complex terrain flow field [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2015, **20**(1): 1-10(in Chinese).  
程雪玲, 胡非, 曾庆存. 复杂地形风场的精细数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 2015, **20**(1): 1-10.
- [2] Yang Jian. *Nested WRF and CFD for Numerical Simulation of Localized Typhoon Wind Field* [D]. Harbin: Master's Thesis of Harbin Institute of Technology. 2015(in Chinese).  
杨剑. WRF 与 CFD 嵌套的局地台风风场数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文, 2015.
- [3] Fang Yanying, Xu Haiming, Zhu Rong, et al. Study on numerical simulation of wind energy resources based on WRF and CFD models [J]. *Meteorological*, 2012, **38**(11): 1378-1389(in Chinese).  
方艳莹, 徐海明, 朱蓉, 等. 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究 [J]. *气象*, 2012, **38**(11): 1378-1389.

- [4] Franke J, Hirsch C, Jensen A G, *et al.* Recommendations on the use of CFD in wind engineering [C]. *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, 2004.
- [5] Liu Mingliang, Zhang Siqing, Li Shengnan. Analysis of mesh on the CFD simulation results [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2016, **2**(4): 41-47(in Chinese).  
刘明亮, 张思青, 李胜男. 网格对 CFD 模拟结果的影响分析 [J]. *水电与抽水蓄能*, 2016, **2**(4): 41-47.
- [6] Wang Yuan, Lu Zhiliang, Guo Tongqing. CFD simulation of wind farm over natural terrain based on  $k-\varepsilon$  model [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, **37**(4): 1037-1042(in Chinese).  
王远, 陆志良, 郭同庆. 基于  $k-\varepsilon$  模型的实际地形风场 CFD 模拟研究 [J]. *太阳能学报*, 2016, **37**(4): 1037-1042.
- [7] Ma Minjin, Lin Chao, Zhao Surong, *et al.* Characteristics and a numerical study of low-level wind shear over Beijing Capital International Airport [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2013, **49**(3): 354-360(in Chinese).  
马敏劲, 林超, 赵素蓉, 等. 北京首都国际机场低空风切变观测分析和数值模拟 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, **49**(3): 354-360.
- [8] Franke, J, Hirsch C, Krus H W, *et al.* Recommendations on the use of CFD in wind engineering [J]. *Cost Action C*, 2004, **14**: C1.
- [9] Deng Yuanchang, Liu Sha, Yu Zhi, *et al.* Effect of roughness on CFD wind field simulation over natural terrain [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, **31**(12): 1644-1648(in Chinese).  
邓院昌, 刘沙, 余志, 等. 实际地形风场 CFD 模拟中粗糙度的影响分析 [J]. *太阳能学报*, 2010, **31**(12): 1644-1648.
- [10] Liu C, Leung D Y C, Man A C S, *et al.* Computational fluid dynamics simulation of the wind flow over an airport terminal building [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2010, **11**(6): 389-401.
- [11] Li Jun, Hu Fei, Liu Lei, *et al.* On estimation of surface roughness for wind energy resources assessment [J]. *Resources Science*, 2011, **33**(12): 2341-2348(in Chinese).  
李军, 胡非, 刘磊, 等. 风能资源评估中地表粗糙度的研究 [J]. *资源科学*, 2011, **33**(12): 2341-2348.
- [12] Blocken B, van der Hout A, Dekker J, *et al.* CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: Case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, **147**: 43-57.
- [13] Li L, Chan P W. Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, **21**(2): 183-192.