

地形和建筑触发珠海机场低空风切变数值模拟*

杨巧兰¹, 蒋晓威¹, 夏冬^{1,2}, 黄照亮¹, 李智标¹, 邓丽洁¹

1. 珠海市公共气象服务中心, 广东 珠海 519000
2. 珠澳气象创新与应用研究中心, 广东 珠海 519000

摘要: 为了分析复杂地形和建筑物对珠海机场风场的影响及是否会诱发低空风切变, 利用流体力学(CFD)软件FLUENT对珠海机场周围地形和建筑物进行风环境数值模拟, 分析北、西北偏北和东北风背景下机场上空低空风切变的易发区。结果表明: 1) 3个风向下地形和建筑物在机场跑道引起的风速波动均出现在500 m高度以下, 且均主要出现在沿着跑道的方向; 2) 吹北风和西北偏北风时, 风切变均发生在100~500 m高度, 主要由地形引起; 3) 吹北风时, 在跑道南端以外(距端口0.0~1.4 km区间)发生低空风切变的概率最大, 其次在跑道南端附近(跑道内距端口0.2~1.5 km区间), 吹西北偏北风时, 在跑道南端附近(向外距端口0.5 km至向内距端口1.1 km区间)发生低空风切变的概率最大, 其次在跑道中点附近(0.3 km区间); 4) 吹东北风时, 机场跑道风切变发生概率低。研究结果可为珠海机场低空风切变的探测和预警提供基础, 为风切变的防范提供依据, 对今后的机场选址及航空安全气象风险评估有参考价值。

关键词: 低空风切变; CFD模拟; 复杂地形; 建筑; 机场跑道

中图分类号: P49 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)04-0047-14

Numerical simulation of terrain and buildings-triggered low-level wind shear around Zhuhai Airport

YANG Qiaolan¹, JIANG Xiaowei¹, XIA Dong^{1,2}, HUANG Zhaoliang¹, LI Zhibiao¹, DENG Lijie¹

1. Zhuhai Public Meteorological Service Center, Zhuhai 519000, China

2. Zhuhai-macao Meteorological Innovation and Applied Research Center, Zhuhai 519000, China

Abstract: To analyze the influence of complex terrain and buildings on the wind field of Zhuhai Airport and whether they will induce low-level wind shear, the Computational Fluid Dynamics (CFD) code FLUENT was used to simulate the wind environment around the terrain and buildings of Zhuhai Airport, and the prone airspace of low-level wind shear at the airport under the background of north(N), north-northwest(NNW) and northeast(NE) wind were analyzed. The results show that: 1) The wind speed fluctuations caused by terrain and buildings at the airport runway under the three wind directions all appear below the height of 500 m, and all of them mainly appear along the runway. 2) When the wind direction is N or NNW, the wind shear appears at the height of 100-500 m and is mainly induced by the terrain. 3) When the wind direction is N, the maximum probability of low-level wind shear is outside the southern end of the runway (in the area of 0.5-1.4 km from the southern

* 收稿日期: 2023-11-21 录用日期: 2024-01-11 网络首发日期: 2024-04-24

基金项目: 广东省气象局科技项目(GRMC2021Q13)

作者简介: 杨巧兰(1993年生), 女; 研究方向: 气象服务、数值模拟;

E-mail: muni_yang@sina.cn

通信作者: 夏冬(1982年生), 男; 研究方向: 天气预报、气象服务和大气环境;

E-mail: 584131440@163.com

全文阅读



ZR20230020

end) and the second is near the southern end (0.2-1.5 km from the southern end within the runway); when the wind direction is NNW, the maximum probability of low-level wind shear is near the south end of the runway (0.5 km outward from the port to 1.1 km inward from the port) and the second is near the midpoint of the runway about 0.3 km. 4) When the wind direction is NE, the probability of low-level wind shear on the airport runway is low. The research results provide a basis for the detection and early warning of low-level wind shear at Zhuhai Airport to prevent wind shear and have significance for airport location and aviation safety meteorological risk assessment in the future.

Key words: low-level wind shear; CFD simulation; complex terrain; buildings; airport runway

复杂下垫面是影响风场的重要因素之一,高低起伏的地形、高耸密集的建筑会引起孤峰绕流效应、峡谷效应等,还容易产生紊流,加剧区域风场扰动,增加湍流、风切变等影响航空安全的气象情况发生概率。航空气象学中的低空风切变是指发生在 487.68 m (1 600 ft) 高度以下、距机场跑道端部 3 n mile (5.556 km) 以内大气中风向风速的突然变化(ICA0, 2010),是威胁飞机起飞和着陆阶段安全的重要气象条件。据统计,4%的进近着陆事故,40%的航空事故死亡人数由低空风切变造成(彭笑非,2010;俞飞等,2001),因此,低空风切变被公认为是危害航空安全的重要天气现象之一。低空风切变的形成除了雷暴、锋面、辐射逆温及海陆风等气象因素外还受地形、建筑等影响,当强风吹过机场附近的山坡和建筑时,障碍物前后会产生湍流,容易诱发低空风切变,例如,有研究指出,地形诱导的低空风切变是香港国际机场最主要的风切变类型(Shun et al., 2008)。低空风切变具有时空尺度小、强度大、突发性、持续时间短等特点(Li et al., 2018),导致探测、预报难度大(王青梅等,2012;戴丽莉,2010),因此,加强对低空风切变的研究具有重要意义。

1978年 Fujita(1979)证实可以从多普勒雷达探测数据分析是否存在风切变并判定其危险级别以来,国内外很多学者对风切变的探测、识别、形成原因及预报预警等进行了大量研究。Hannon et al.(1996)利用激光测风雷达进行风切变探测;Chan(2012a)和 Lee et al.(2014)的研究表明激光雷达十分适合探测晴空状况下的低空风切变。刘晓英等(2020)通过现场试验观测证明相干多普勒测风激光雷达的不同扫描模式可以分别识别干性雷暴引起的水平低空风切变和地形诱导的风切变。范琪等(2020)的研究表明基于激光测风雷达的一种算法,低空风切变的探测命中率达 88% 以上。

蒋立辉等(2012)将计算流体力学与多普勒激光雷达探测结合,采用多普勒激光雷达对微下击暴流、侧风切变和低空急流等的三维数值仿真风场进行扫描从而识别低空风切变。张涛等(2020)利用激光测风雷达和风廓线雷达资料对西宁机场一次低空风切变过程进行细致结构分析和形成机理研究。

马敏劲等(2013)将统计分析和数值模拟方法结合,对首都国际机场的低空风切变进行分析,认为高空动量下传可能是诱发低空风切变的重要机制。单乃超等(2018)和赵倩等(2019)分别对合肥机场的一次低空风切变过程的形成机理和成因进行研究,指出 γ 中尺度对流单体底部的紊乱气流和下击暴流都会造成低空风切变。Wolfson et al.(1994)利用雷达的二维图像对低空风切变进行预报。孙磊(2003)对低空风切变流场进行数值模拟分析,表明数值模拟可以较好地预测低空风切变发生的位置和强度。

以上研究大多是利用多普勒雷达、风廓线雷达和自动气象站等的观测数据和数值模式分析不同天气系统引起的低空风切变,而对于地形障碍及建筑物等可能引起的低空风切变的研究较少。

针对地形诱导风切变,Chan(2012b)利用激光雷达数据分析了2010年3月5日香港国际机场发生的一起飞机机尾撞击事件,认为事故是由机场附近复杂地形引起的风切变造成的。Shun et al.(2003)及 Chan et al.(2007)分别利用激光雷达实测数据分析地形复杂风场气流对风切变的影响。还有部分学者通过数值模拟进行研究,其中, Szeto et al.(2006)表明区域大气建模系统 RAMS 可以很好地捕捉复杂地形区域的环流。Chan et al.(2016)则表明 AVM 模式能够捕捉地形引起的风切变,且能够提前预警低级别风切变的发生。

随着计算机技术迅猛发展,计算流体力学(CFD, computational fluid dynamics)已被广泛

应用于风环境模拟,其可行性和准确性也已经被很多学者证实(张伯寅等,2004;李磊等,2010)。Liu et al.(2010)和Chan et al.(2010)分别模拟分析了航站楼和飞机库对香港国际机场跑道风场的影响,并指出跑道着陆点附近的低空风切变主要由建筑引起。Leung et al.(2012)的模拟结果认为建筑和地形可能会导致香港国际机场南跑道西端的风速发生显著变化。蒋立辉等(2018)利用FLUENT对兰州中川机场周边地形和建筑进行模拟,表明地形和建筑均对跑道风场有较大影响,有可能诱发低空风切变。黄妍妮等(2023)通过大涡模拟方法,采用F因子和7节标准识别机场跑道低空风切变的易发区,得到地形对香港国际机场低空风切变的影响范围。

综上,目前对于地形和建筑物共存对风环境的影响极其可能引起低空风切变的研究较少,且现有的相关研究也主要是围绕地形和建筑对香港国际机场的影响。珠海机场背山面海,地理条件较为复杂,且近年来,机场周边的环境也发生了变化,局地气候及气象飞行条件也可能发生了改变,分析周边地形和建筑物对机场风场的影响对保证机场航班正常运行具有重要的意义。因此本文利用CFD对珠海机场进行风环境模拟,分析地形和建筑物对机场风场的影响及低空风切变的易发区,为低空风切变的探测、预警及形成原因分析等提供参考。

1 计算域建模

1.1 模拟区域

珠海机场位于珠海市金湾区三灶镇南端,东、西、南三面环海,北侧是茅田山-拦浪山-轿顶山等山脉(图1),山脉呈东北-西南走向,主峰最高约299 m。机场飞行区等级为4E,现有一条长4 km,宽45 m跑道,两侧各设7.5 m宽的道肩,并建设有等长的平行滑行道。跑道与山脉最近距离仅约1.2 km,且与山脉走向一致。跑道磁方向为 $47^\circ\sim 227^\circ$,编号分别为05和23,可用起飞滑跑距离为4 km,可用起飞距离为4 km,可用加速停止距离为4.06 km,可用着陆距离为4 km。

目前机场跑道附近的建筑主要有T1航站楼、航展馆及相关设施等,由于客流量增加,近年来正在对机场进行升级改造,内容包括新建T2航站楼、设备用房和危险品库等配套设施,并对T1航

站楼进行改造。最高建筑为T2航站楼,其最高点37.81 m。

1.2 建模及网格划分

由于计算域需尽量保持山地几何特征(大于10 m几何特征),地形模型边缘不能切断山脉,否则会对边界计算结果造成影响,而计算域太大则增加计算量和内存占用,不利于提高计算精度,因此充分考虑机场的周边环境并参考计算风工程的主要标准,在计算区域的上下游预留一定距离,故设置计算域长、宽均为20 km,高为600 m。因此,将机场北侧的山脉均考虑在内,根据高程地形数据转化得到可靠性较高的地形三维模型,将机场现有建筑及升级改造拟建建筑均考虑在内,为了尽可能还原建筑外形,将建筑平面图导入三维绘图软件,输入不同构筑物的高度,得到建筑三维模型。在Gambit中进行网格划分,为节约计算时间,对网格类型及疏密做相应调整,核心区域为六面体网格,网格尺寸为1 m;山地区域部分采用四面体网格,以还原(保留)山地地区几何特征;外围网格尺寸相对较大,故计算域共有约1 500万个网格,如图2所示。

2 CFD数值模拟

2.1 边界条件

CFD通过计算机和数值方法对流体力学问题进行模拟和分析,并用图像进行显示,广泛应用于风工程领域。目前应用较广泛的CFD模拟软件有FLUENT, PHOENICS, AirpaK, OpenFOAM等,其中FLUENT具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能,适用于可压缩流体和不可压缩流体的模拟分析,被广泛应用于航空、气象、水运、工程设计等行业。因此,本文选择FLUENT软件进行数值模拟,其主要控制方程有动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (2)$$

质量守恒方程(连续方程)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_M, \quad (3)$$

式中 u_i 为 i 方向流体速度, p 是静压力, ρg_i 为重力, F_i 为其他外力, μ 为动力黏性系数, S_M 为源项。



图1 珠海机场位置及跑道布局图

Fig. 1 Location map and runway layout of Zhuhai airport

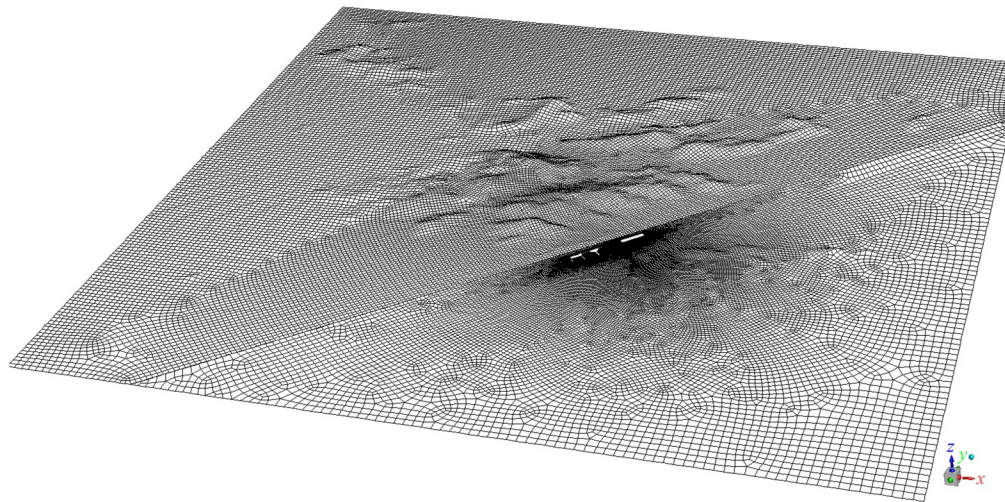


图2 模拟区域、三维模型和网格设置

Fig. 2 The simulation domain, three-dimensional model and the grid setting

在 FLUENT 软件提供的湍流模型中, 标准 $k-\varepsilon$ 模型适合高雷诺数湍流, 其计算精度较高、稳定性好且兼具经济性, 应用广泛(齐静, 2010), 因此本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。相关湍流参数中湍流动能(TKE, turbulence kinetic energy)是衡量湍流发展的重要指标, 其方程为

$$\kappa = \frac{3}{2}(u')^2, \quad (4)$$

$$I = \frac{u'}{u} = 0.16Re^{-1/8}, \quad (5)$$

式中 κ 为湍流动能, u 为流体平均速度, u' 为速度扰动, I 为湍流强度, Re 为雷诺数。

正对来流方向的面为速度进口, 设置为 velocity-inlet 边界条件, 正对速度入口的另一面以及两个侧面均为出口, 边界条件设置为 pressure-outlet。梯度风由幂指数函数计算, 根据《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012, 地面粗糙度可分为 A、B、C、D 共 4 类, 本文研究区域属于 B 类地貌, 幂指数为 0.15。

2.2 模拟风工况选取

2006—2022年机场附近风速逐年变化见图3a, 多年平均风速为3.6 m/s, 其中2006和2009年为历年最大(3.9 m/s), 2016—2017年最小(3.2 m/s)。风速整体呈下降趋势, 其中2006—2016年显著下降, 2017—2022年则略有上升。从多年平均风速频率谱分布(图3b)可以看出, 平均风速频率呈现随风速增加先增大后减小的趋势, 3级风(3.4~

5.4 m/s)出现的频率最高, 其次为2级风(1.6~3.3 m/s)。从多年风向频率玫瑰(图3c)可以看出, 近17年风向以东北偏东风(ENE)最多, 频率为13.9%, 其次为北风(N)和西北偏北风(NNW), 频率分别为13.4%和13.0%。西风(W)和西北偏西风(WNW)为最少和次少, 风向频率均不到1%。表明近10多年机场附近的主导风向为ENE, 其次是N和NNW, 累计风向频率约为40.3%。

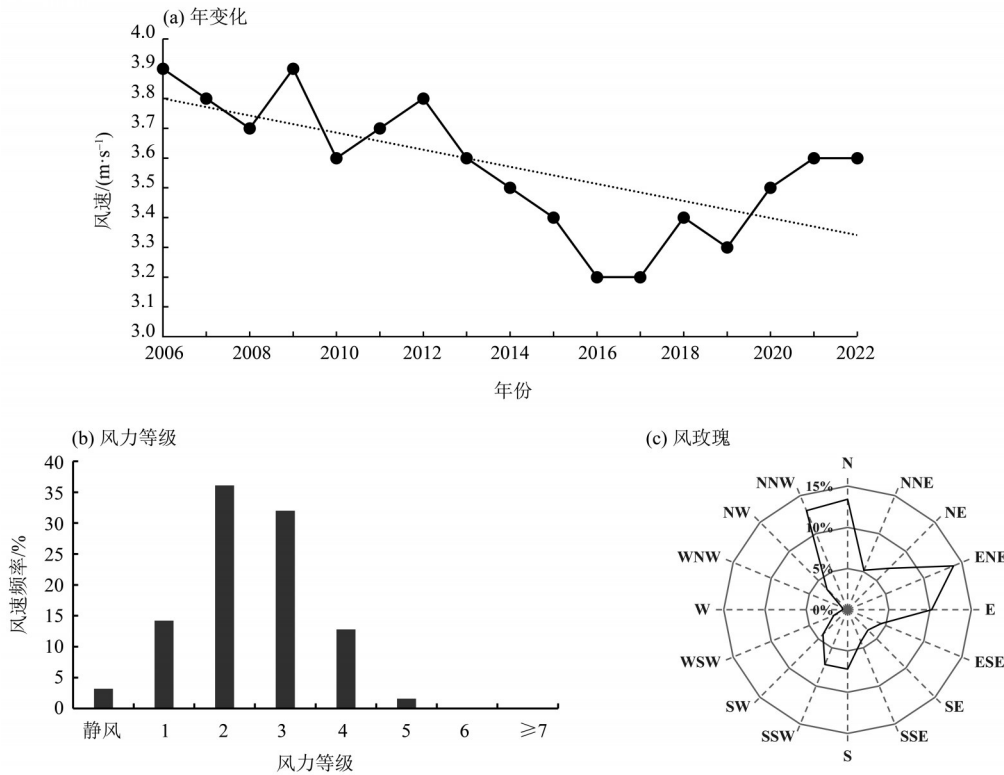


图3 2006—2022年机场风速的年变化、频率谱分布和风向频率玫瑰图

Fig. 3 The variation of wind speed including (a) annual variation, (b) frequency, and (c) the rose diagram of average wind direction frequency around the Zhuhai airport during 2006–2022

而根据相关统计分析(裘锦华,2011),当吹西北风(NW)或N风且风速超过9 m/s时,越山气流可能在机场形成湍流,甚至引起风切变。综合考虑机场的盛行风向、地理位置和风切变常发生的风向风速,本文以10 m/s作为背景风速,对N、NNW和NE风进行CFD模拟。

2.3 低空风切变强度标准

低空风切变有不同类别的划分方式,根据风场的空间结构,可分为3类:①水平风的水平切变,指在水平方向上一定距离内风向和(或)风速的变化;②水平风的垂直切变,指在不同高度层之间风速和(或)风向的变化;③垂直风的切变,指上升或下降气流(垂直风)在水平方向上的改变。

本文主要分析水平风的水平切变和垂直切变。其中,水平风的垂直切变强度标准为:空气层厚度取30 m,用于计算的风资料取2 min,一般认为0.1 s以上的垂直切变就会给喷气式运输机带来威胁,详见表1。水平风的水平切变强度目前尚未建立统一的标准,根据美国机场低空风切变报警标准值,通过推算2.6 m/s/km可作为能对飞行构成危害的水平风的水平切变。

3 模拟结果与分析

图4为跑道及跑道南端、北端剖面的位置示意图,下文沿着跑道的风速剖面和风速曲线图中,横坐标为距机场跑道南端入口的距离,即跑道位

表 1 水平风的垂直切变强度标准

Table 1 The vertical shear intensity standard of horizontal wind

强度等级	每 30 m 垂直厚度风速变化/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风切变值/ s^{-1}	对飞行的影响
轻度	0 ~ 2	0 ~ 0.07	飞机航迹和空速稍有变化
中度	2.1 ~ 4	0.08 ~ 0.13	对飞机的操纵造成很大的困难
强烈	4.1 ~ 6	0.14 ~ 0.20	有使飞机失去操纵的危险
严重	>6	>0.20	会造成严重的危害

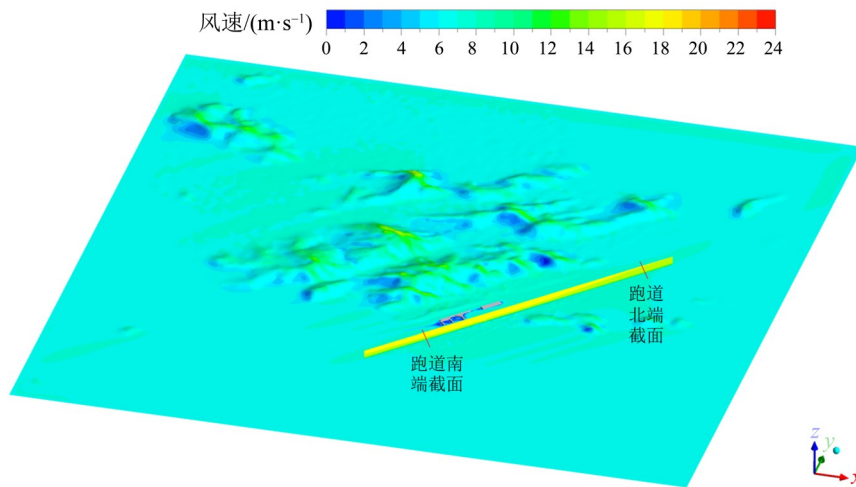


图 4 跑道及跑道南端、北端剖面位置示意图

Fig. 4 The sketch map of the positions of the runway and the south and north sections

于 0~4 000 处；跑道南、北两端的风速剖面和风速曲线图中，横坐标为距机场跑道最南侧的距离，即跑道均位于 0~45 处。

3.1 北风下的 CFD 风环境模拟

由图 5 近地层不同海拔高度的风速分布可以看出，山脉附近风速随海拔的增加而明显增大，山脉背后偏南一侧出现明显的尾流减速，机场位于山脉东南侧，明显的尾流低风速区主要出现在跑道中点以南，建筑物背风面的尾流低风速区也主要影响跑道中点以南区域，而且地形和建筑物导致的尾流效应的影响海拔高度不同，因此机场跑道上空的风速不均匀且不同高度层的不均匀性有所差异。但随着海拔高度增加，尾流减速效应减弱，跑道风场的不均匀性也逐渐减弱。

由图 6a 可以看到，跑道南端向外距端口 0.5~1.4 km 区间和跑道南端向内距端口 0.2~1.5 km 区间在 400 m 以下分别有一个小风速区，自跑道中点至跑道北端在 200 m 以下也有 2 个小风速区。由图 6b 也可以看出，500 m 以下的风速线均有明显波动，其中跑道南端附近跑道内部和跑道外部的小风速区对应区域的风速曲线波动最显著，且 100 m 高度

层风速线变化最剧烈。从有地形和建筑影响及无地形和建筑影响下跑道南、北端的风速廓线图中(图 6c~d)可以看出，有地形和建筑影响时，500 m 高度层以下跑道南端风速减小，跑道北端风速增大。表明地形和建筑会导致珠海机场跑道风速减小或增大，且影响主要在 500 m 高度层以下。

从图 6e 沿着跑道的 TKE 剖面可以看到，跑道南端向外距端口 0.5~1.4 km 区间在 100 m 及以上高度有一个 TKE 大值区，从曲线图(图 6f)也可以看出，跑道南端向外距端口 0.9 km 附近在 100 m 及以上高度层 TKE 明显增大，最大值达 $8.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上，沿着跑道 TKE 逐渐减小，但跑道南端至向内距端口 1.5 km 区间 100 m 及以上高度层 TKE 值仍维持较大，根据 TKE 方程，说明跑道南端向外距端口 0.5~1.4 km 区间风速波动最大，其次为跑道南端至向内距端口 1.5 km 区间。从有地形和建筑影响及无地形和建筑影响下跑道南、北端的 TKE 廓线图中(图 6g~h)可以看出，有地形和建筑影响时跑道南端 TKE 显著增大，且地面至 400 m 高度层 TKE 有一个显著增长的过程，跑道北端 55 m 高度层以上 TKE 较无地形和建筑影响时偏小，以下则偏大，

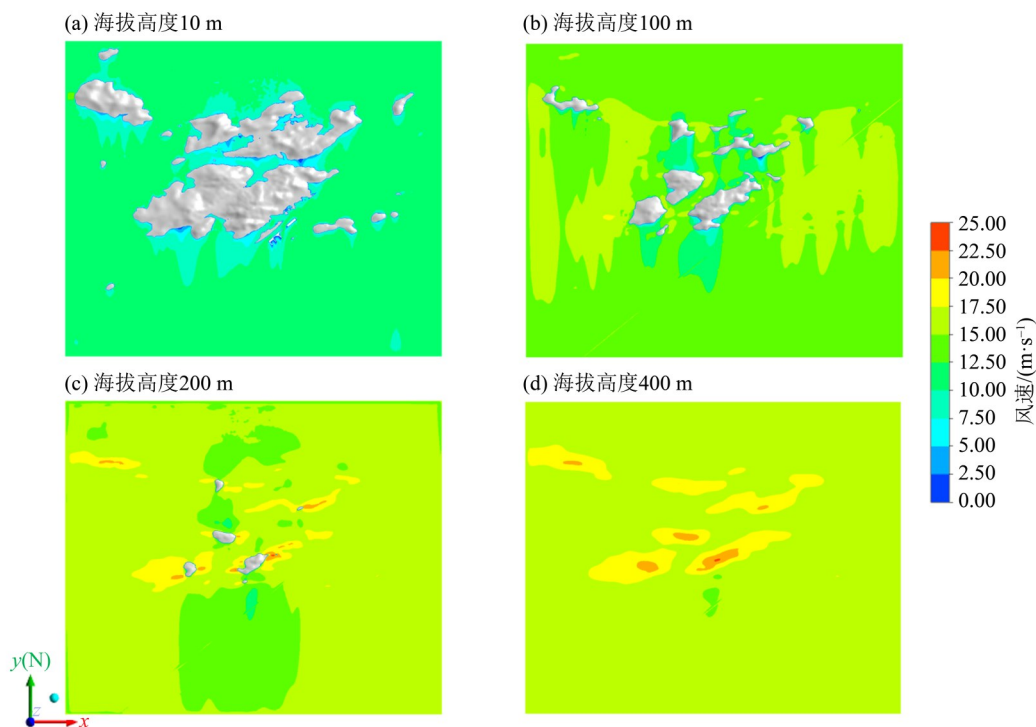


图 5 不同海拔高度的风速分布(N工况)

Fig. 5 The wind speed for different altitudes (from N)

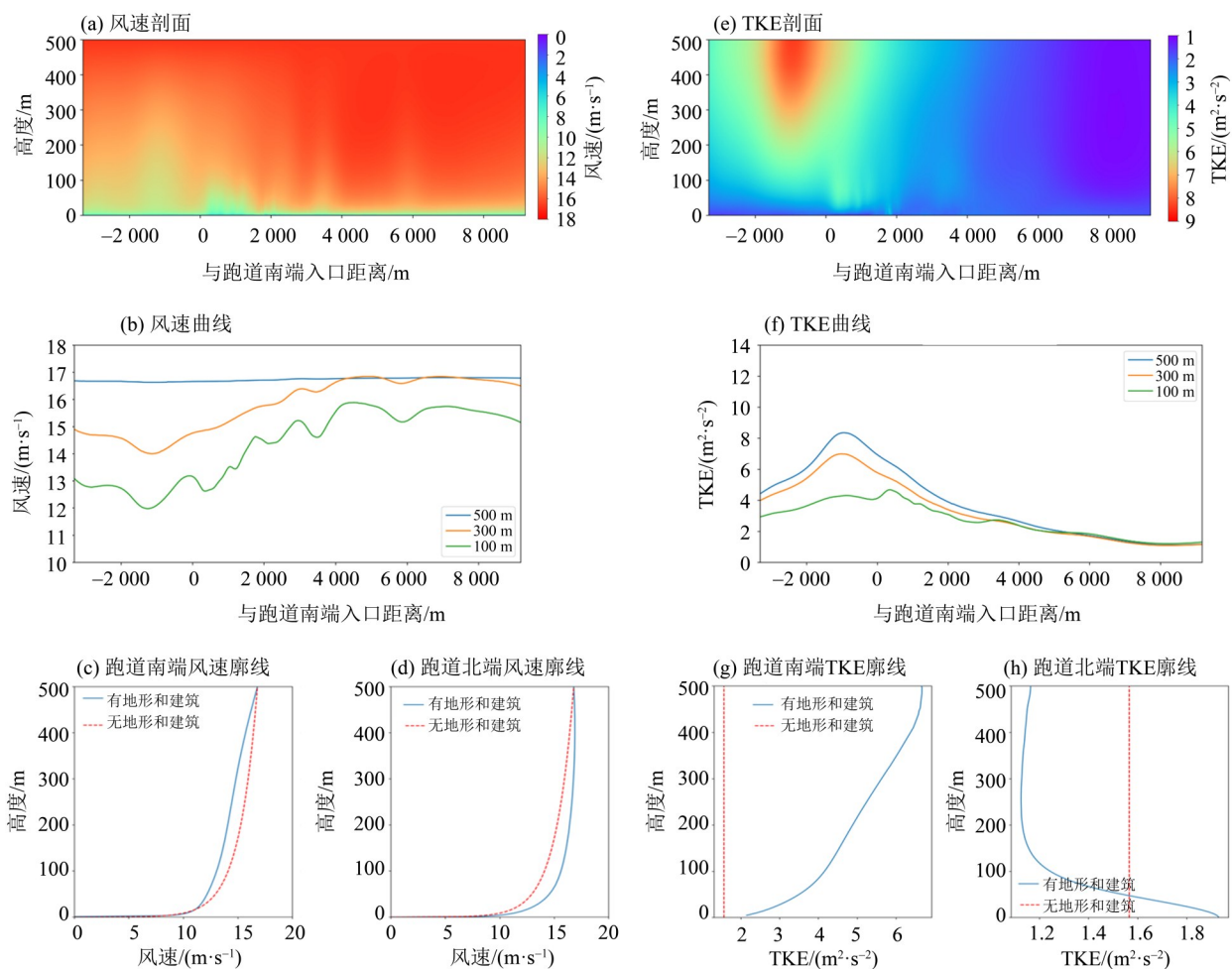


图 6 沿着跑道的风速、TKE 分布及跑道两端的风速、TKE 廓线(N工况)

Fig. 6 The wind speed and TKE along the runway and the profile at the southern and northern ends of the runway (from N)

但最大值不超过 $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 表明地形和建筑会导致机场区域 TKE 增大或减小, 且其对跑道南端的影响更显著。风切变是风向和(或)风速的突然变化, 因此推断风速曲线波动最明显的区域与 TKE 大值区对应区域容易引发低空风切变, 而表 2 中跑道南端向外风速波动最明显区域垂直方向每 30 m 最大风速差可达 2.0 m/s , 可能存在轻度垂直切变, 跑道南端向内风速波动最明显区域的垂直切变也接近轻度水平, 因此跑道南端向外距端口 $0.5\sim 1.4 \text{ km}$ 区间风切变发生概率最大, 其次为跑道南端向内

距端口 $0.2\sim 1.5 \text{ km}$ 区间。TKE 大值区主要在 $100\sim 500 \text{ m}$ 高度层, 风场的剧烈变化发生在 500 m 以下, 所以风切变可能发生在 $100\sim 500 \text{ m}$ 高度层, 而建筑物对风场的影响区域在 100 m 高度层以下, 表明风切变主要由地形引起。

由图 7 可以看出, 风速随高度增加而增大, 但无明显小风速区, 风速曲线变化也平缓, TKE 值随高度增加而缓慢增大, 无明显波动(图略), 表明跑道上横向上风切变发生概率较低。

表 2 3 个风向下跑道不同区域的最大风速差

Table 2 The maximum wind speed difference in different areas of the runway under three wind directions

风向	最大风速差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		出现区域范围
	水平方向(每 1 km)	垂直方向(每 30 m)	
N	2.1	2.0	跑道南端向外距端口 $0.5\sim 1.4 \text{ km}$
	1.5	1.8	跑道南端向内距端口 $0.2\sim 1.5 \text{ km}$
	1.1	0.3	跑道北端向内距端口 $0.0\sim 1.0 \text{ km}$
NNW	3.5	3.0	跑道南端距端口向外 $0.5 \text{ km}\sim$ 向内 1.1 km
	3.5	2.0	跑道中点以南 $0.2 \text{ km}\sim$ 以北 1.5 km
	1.5	1.0	跑道北端向外距端口 $0.0\sim 0.8 \text{ km}$
NE	0.5	1.0	跑道南端 1.0 km
	0.7	1.0	跑道中点 1.0 km
	0.5	0.8	跑道北端 1.0 km

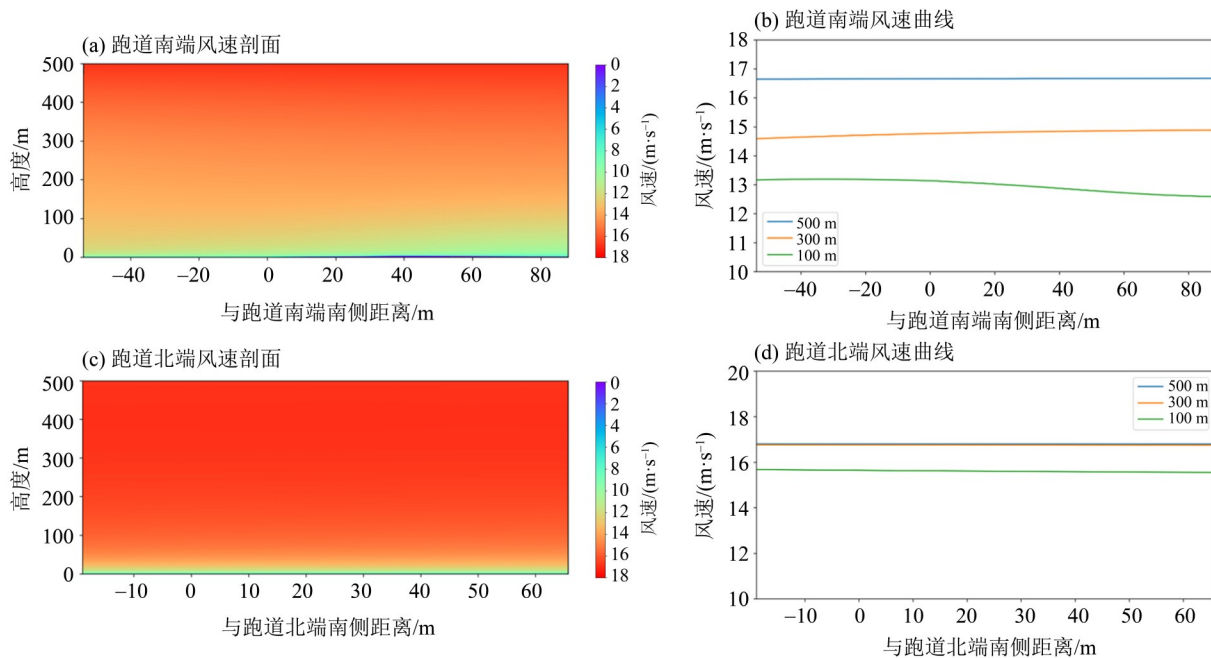


图 7 跑道两端的风速分布(N工况)

Fig. 7 The wind speed at the southern and northern ends of the runway (from N)

3.2 西北偏北风下的CFD风环境模拟

从图8可以看出, NNW风下, 山脉附近风速与N风时一致, 在山脉和建筑物背风面的整个机场都出现尾流减速, 而且由于山脉的高低起伏,

风场出现流动分离, 机场形成带状低风速区。跑道上空的风速也出现不均匀特征且不同高度层的不均匀性也有所差异, 尾流减速效应和风场的不均匀性随着海拔高度增加而逐渐减弱。

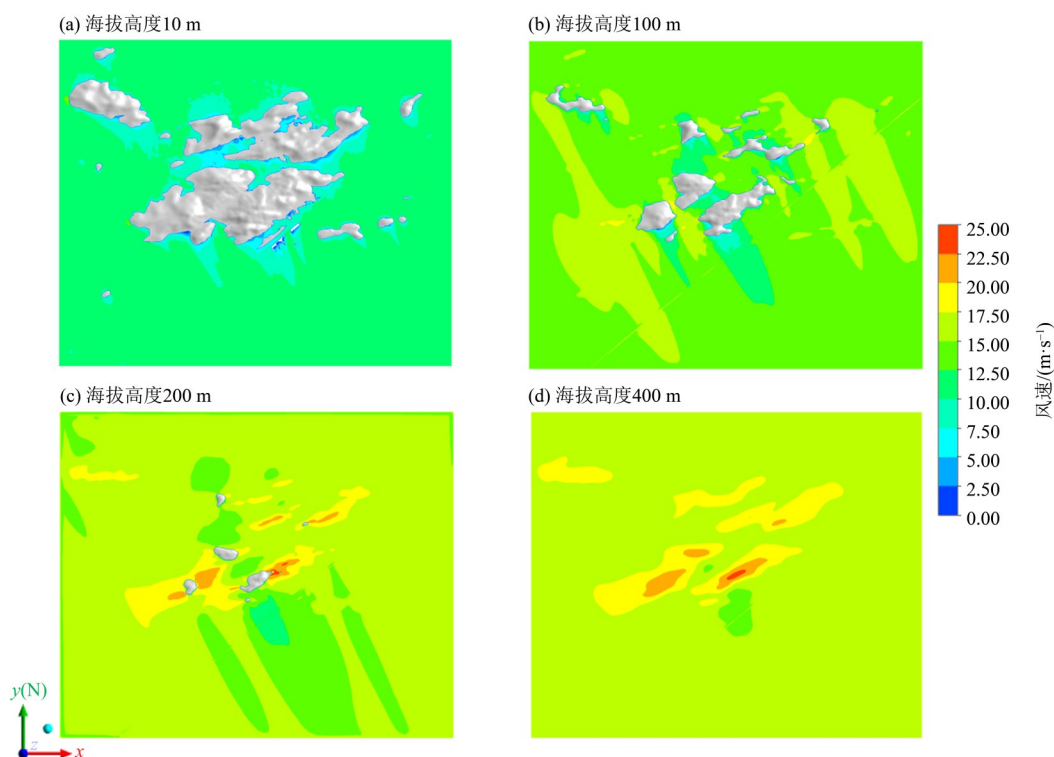


图8 不同海拔高度的风速分布(NNW工况)

Fig. 8 The wind speed for different altitudes (from NNW)

由图9(a~b)可以看出, 在跑道南端向外距端口2.5~3.0 km区间、跑道南端向外距端口0.5 km至向内距端口1.1 km区间、跑道中点附近约0.3 km区间和跑道北端向外距端口0.2~0.5 km区间分别有一个明显的小风速区, 并向上延伸至约300~400 m, 这些小风速区与带状尾流低风速区对应。500 m高度层以下风速线有明显波动, 尤其跑道南端附近、南端向外及北端向外3个小风速区附近波动明显, 且100 m高度层风速线变化最剧烈, 其中跑道南端附近的波动最显著。风速廓线图中(图9c~d)有地形和建筑影响时, 500 m高度层以下跑道南端风速显著减小, 跑道北端风速则略有增大。表明地形和建筑物会导致珠海机场跑道500 m高度层以下风速减小或增大, 且对跑道南端的影响更显著。

TKE剖面图中(图9e)在跑道南端附近风速波动最显著的区域100 m及以上高度有一个明显的TKE大值区, 曲线图中(图9f)该区域TKE剧烈波

动, 100 m高度层以上TKE显著增大, 300 m以上TKE值在 $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上, 最大值约为 $12.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, TKE沿着跑道逐渐减小, 但跑道中点附近风速剧烈波动的区域100 m及以上高度层TKE值仍维持较大, 进一步表明这两个区域100~500 m高度层有风速波动。TKE廓线图中(图9g~h)有地形和建筑影响时, 跑道南端TKE显著增大, 地面至400 m高度层TKE有一个显著增长的过程, 跑道北端TKE也有所增大, 但最大值不超过 $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 表明地形和建筑会导致机场区域TKE增大, 且其对跑道南端的影响更显著。跑道南端和中点附近风速波动最明显区域最大水平风差值均可达 3.5 m/s/km , 水平切变达到报警标准, 垂直方向每30 m最大风速差分别达3.0和2.0 m/s, 可能分别存在中度和轻度垂直切变(见表2)。因此, NNW风下, 跑道南端向外距端口0.5 km至向内距端口1.1 km区间风切变发生概率最大, 其次为跑道中点附近, 风切变也主要由地形引起。

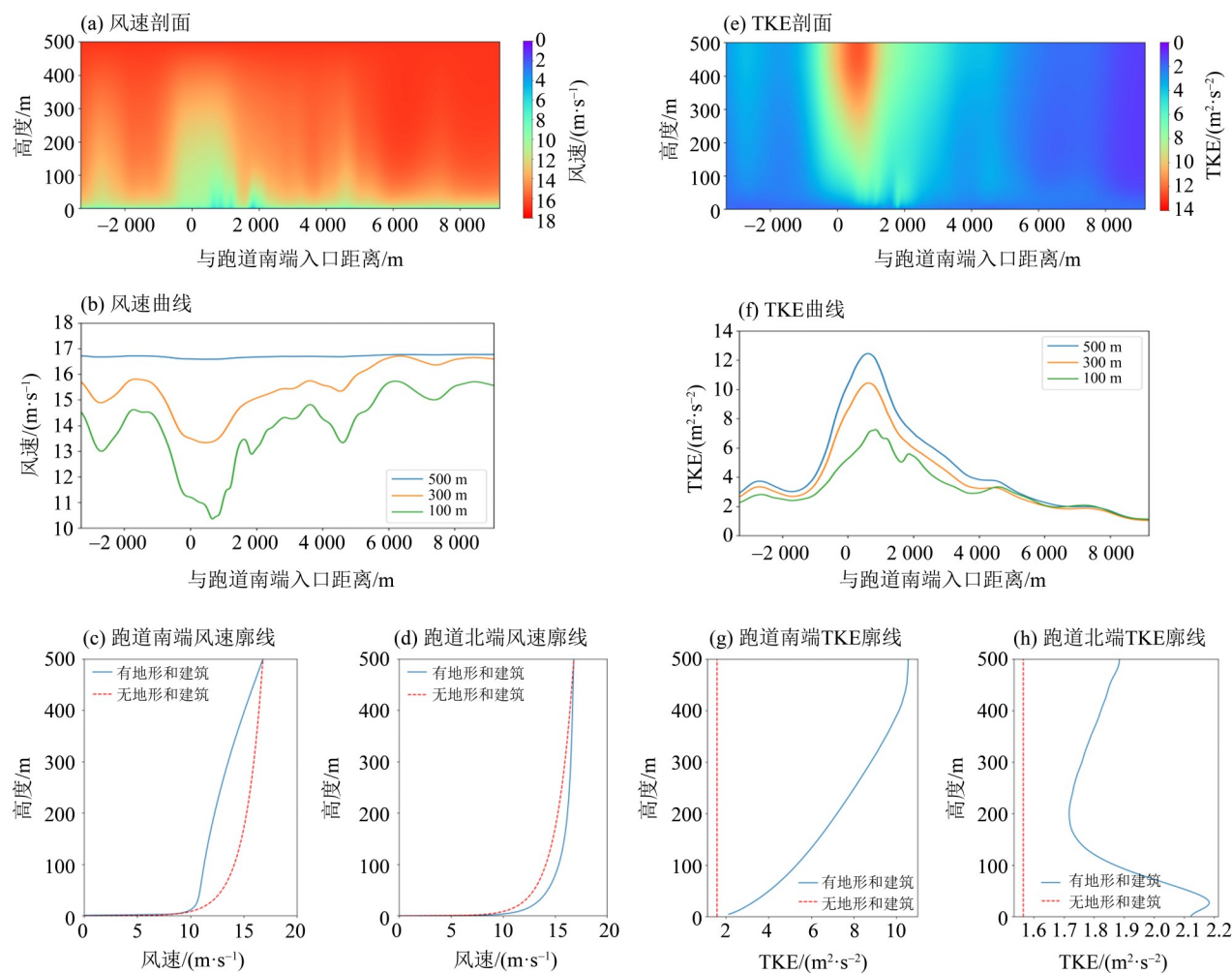


图9 沿着跑道的风速、TKE分布及跑道两端的风速、TKE廓线(NNW工况)

Fig. 9 The wind speed and TKE along the runway and the profile at the southern and northern ends of the runway(from NNW)

从图10跑道南、北端向内距端口约100 m处的风速剖面和不同高度的风速曲线可以看出,与N风时类似,NNW风下,跑道南、北端风速变化也平缓,无明显波动,TKE值也无明显波动(图略),表明跑道横向上风切变发生概率较低。

3.3 东北风下的CFD风环境模拟

由图11可以看出,NE风下,风向与山脉、建筑物和机场跑道夹角小,基本平行,受山体之间及山脉与建筑之间的风速加速效应影响,机场上空出现大风速区,且增大效应在100~300 m高度最明显,风场的不均匀性明显减弱。

由图12(a~b、e~f)可以看出,机场跑道上空的风速较周边区域略偏大,与山脉和建筑物导致的加速效应区域对应。风速的加速效应主要出现在500 m高度层以下,机场跑道区域300 m高度风速甚至超过500 m风速,但风速曲线变化整体平缓,

没有明显波动,整个跑道最大风速差约1 m/s。TKE没有明显波动,各高度层基本一致,维持在 $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以下,进一步表明机场区域没有明显风速波动。图12(c~d、g~h)也看出有地形和建筑影响时跑道南、北端风速略有增大,地面至500 m高度层TKE先增大后减小,但最大值不超过 $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$,表明由于地形和建筑的影响,机场跑道出现风速和TKE的增大或减小,但其变化整体平缓。跑道各区域最大水平、垂直风差值均较小(表2)。因此,NE风下,机场跑道区域风速无明显波动,机场跑道风切变发生概率较低。

图13中跑道南、北端不同高度的风速变化平缓,无明显波动,TKE也无波动(图略),表明跑道南、北端横向上没有风切变发生。从图中还可以看出,跑道南端300 m高度层风速高于500 m高度层,说明跑道南端受地形和建筑物影响更显著。

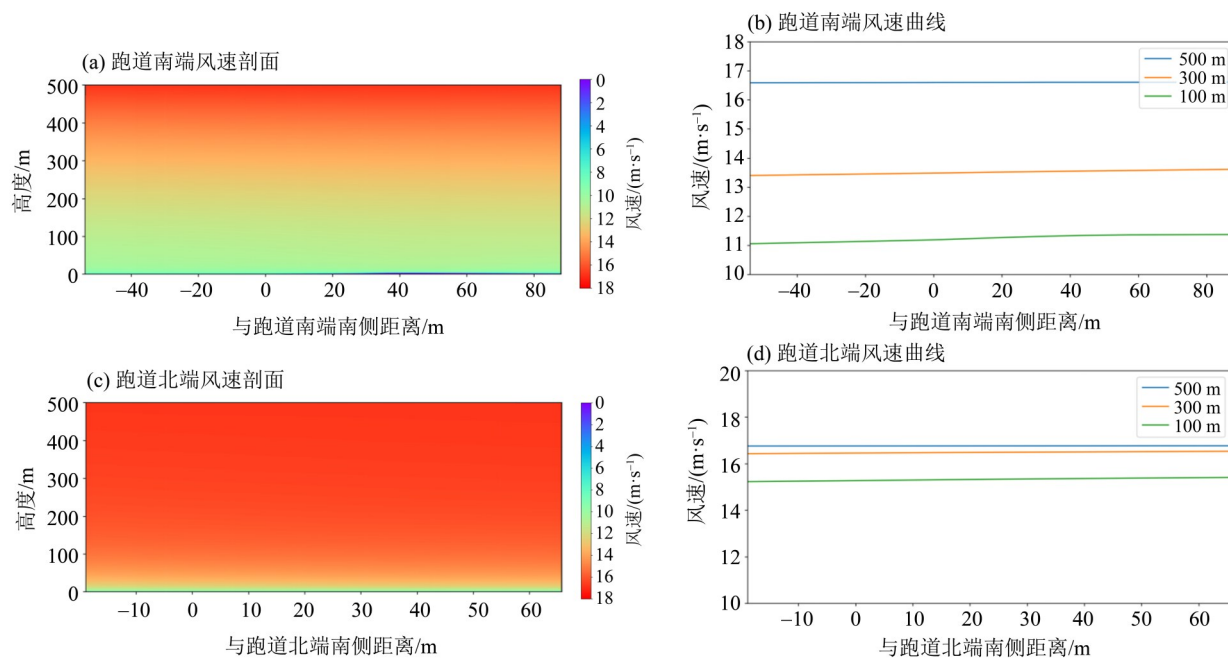


图 10 跑道两端的风速分布(NNW 工况)

Fig. 10 The wind speed at the southern and northern ends of the runway (from NNW)

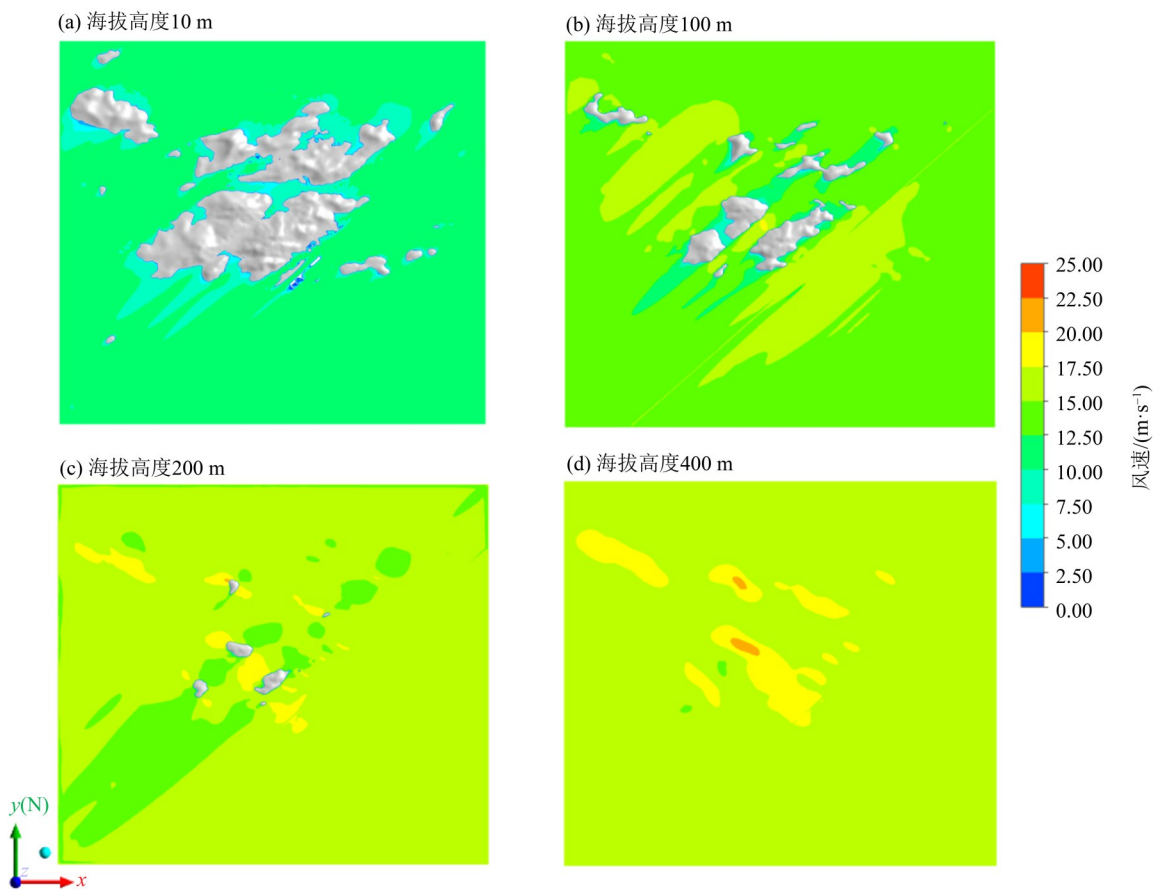


图 11 不同海拔高度的风速分布(NE 工况)

Fig. 11 The wind speed for different altitudes (from NE)

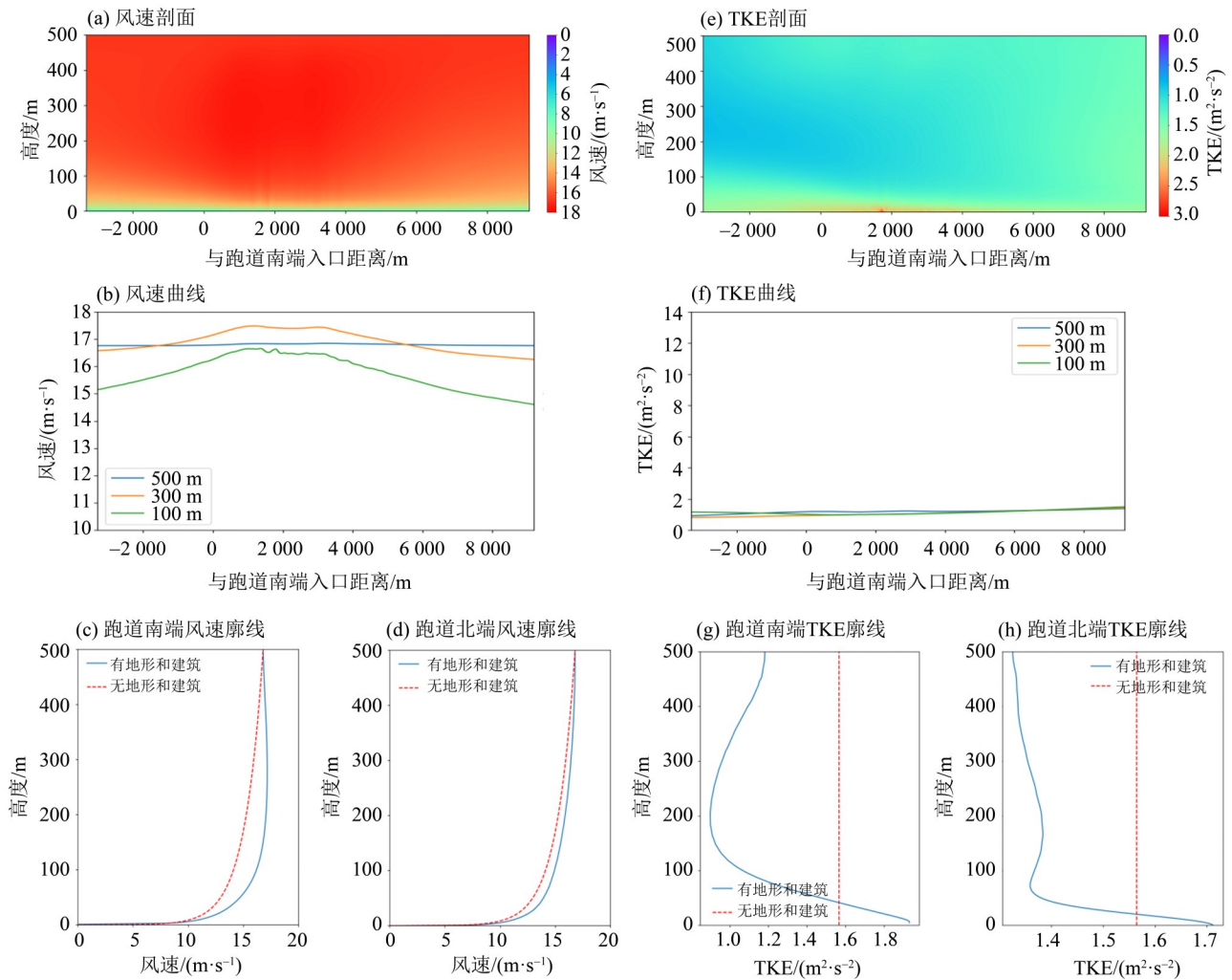


图 12 沿着跑道的风速、TKE 分布及跑道两端的风速、TKE 廓线(NE 工况)

Fig. 12 The wind speed and TKE along the runway and the profile at the southern and northern ends of the runway (from NE)

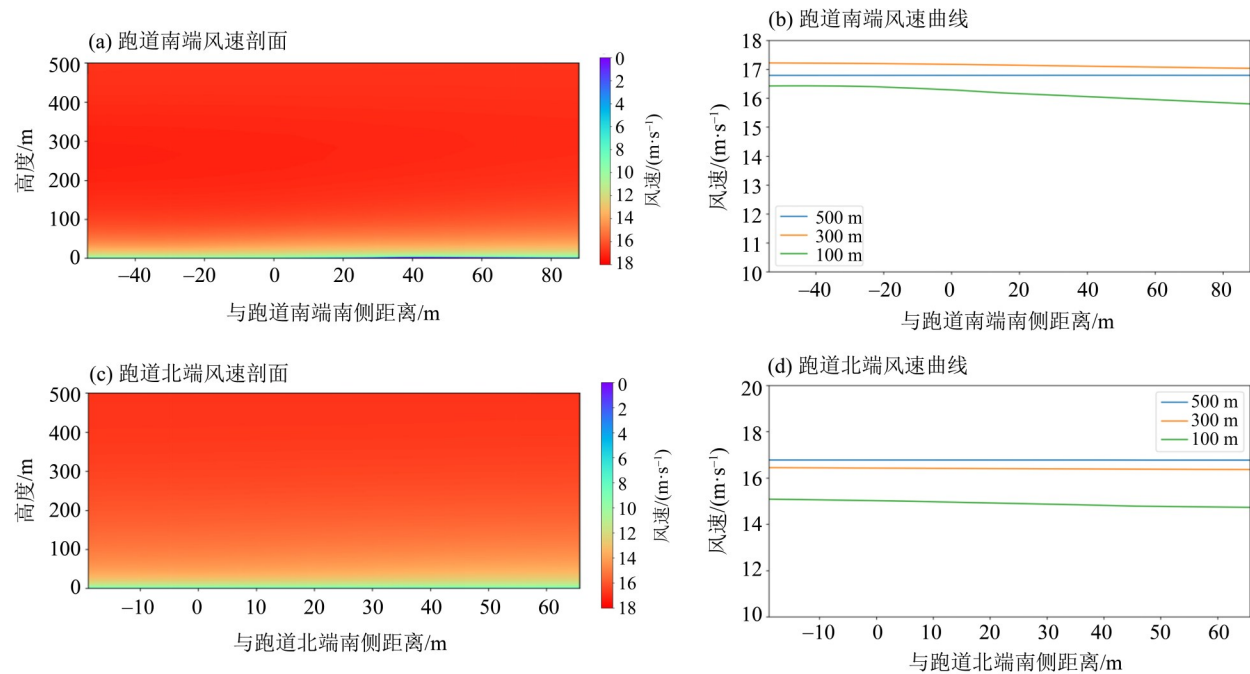


图 13 跑道两端的风速分布(NE 工况)

Fig. 13 The wind speed at the southern and northern ends of the runway (from NE)

4 结论

本文以N、NNW和NE风向为背景风,利用CFD软件FLUENT模拟了复杂地形和建筑物共存情况下珠海机场的风环境,对比分析了机场不同高度层及不同剖面的风速和TKE变化情况,得出不同背景风下机场跑道上空低空风切变的易发区。结论如下:

1) 3个风向下地形和建筑物引起的机场跑道的风速波动均出现在500 m高度以下,且均出现在沿着跑道的方向。

2) N风时,由于地形和建筑物背风面的尾流减速区主要出现在南侧,因此跑道中点及其以南的区域尾流低风速区较跑道北端明显,导致机场跑道风速不均匀且不同高度层的不均匀性有差异。跑道南端向外距端口0.5~1.4 km区间和跑道南端向内距端口0.2~1.5 km区间分别有1个小风速区,跑道中点至跑道北端也有2个小风速区,这些小风速区对应不同高度层的风速线也发生明显波动,跑道南端以外的风速波动最剧烈区域在100 m以上高度有一个TKE大值区,跑道南端附近风速变化最剧烈区域的TKE值也较大,进一步表明这2个区域风速有明显波动,这两个区域垂直方向的最大风速差也达到或接近轻度垂直切变,因此跑道南端向外距端口0.5~1.4 km区间风切变发生概率最大,其次为跑道南端向内距端口0.2~1.5 km区间,且可能发生在100~500 m高度层,主要由地形引起。

3) NNW风时,跑道南端向外距端口2.5~3.0 km区间、跑道南端向外距端口0.5 km至向内距端口

1.1 km区间、跑道中点附近约0.3 km区间和跑道北端以外距端口0.2~0.5 km区间分别有一个明显的小风速区,并向上延伸至约300~400 m,对应不同高度层的风速线也出现明显波动,跑道南端附近风速波动最显著的区域100 m及以上高度有一个显著的TKE大值区,跑道中点附近风速剧烈波动的区域100 m及以上高度层TKE值也维持较大,表明这两个区域风速有明显波动,这两个TKE大值区对应的水平方向最大风速差达到报警标准,垂直方向最大风速差也分别达中度和轻度垂直切变标准,因此跑道南端向外距端口0.5 km至向内距端口1.1 km区间风切变发生概率最大,其次为跑道中点附近,且可能发生在100~500 m高度层,主要由地形引起。

4) NE风时,风向与山脉、建筑物和机场基本平行,受山体之间及山脉与建筑之间的风速加速效应影响,机场上空出现大风速区,且增大效应在100~300 m高度最明显,但风场的不均匀性明显减弱。机场跑道上空500 m以下不同高度层风速均较周边略偏大,但风速、TKE变化平缓,没有明显波动,跑道各区域水平方向和垂直方向最大风速差均较小(最大为1 m/s),机场跑道风切变发生概率较低。

本研究结果可为珠海机场低空风切变的探测和预警提供基础,为风切变的防范提供依据,对今后的机场选址及航空安全气象风险评估有参考价值。但文中仅考虑动力作用,未考虑建筑、地形等的热力作用及海陆风对机场风场的影响,值得进一步研究。

参考文献:

戴丽莉,2010.探测微尺度风切变场的多普勒激光雷达研究[D].南京:南京理工大学.

范琪,郑佳锋,周鼎富,等,2020.基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法[J].红外与毫米波学报,39(4):462-472.

黄妍妮,陈丰,CHAN P W,2023.地形对香港国际机场起降航道低空风切变的影响[J].中国民航大学学报,41(3):31-40.

蒋立辉,田百全,熊兴隆,等,2012.基于多普勒激光雷达低空风切变的数值仿真[J].红外与激光工程,41(7):1761-1766.

蒋立辉,刘晓宇,李贞,等,2018.兰州中川机场周围地形和建

筑物对风场的影响研究[J].计算机与数字工程,46(3):561-565+626.

李磊,张立杰,张宁,等,2010.FLUENT在复杂地形风场精细模拟中的应用研究[J].高原气象,29(3):621-628.

刘晓英,吴松华,张洪玮,等,2020.基于相干多普勒测风激光雷达的不同成因类型的低空风切变观测[J].红外与毫米波学报,39(4):491-504.

马敏劲,林超,赵素蓉,等,2013.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),49(3):354-360.

彭笑非,2010.低空风切变对飞机进近着陆的影响分析[J].科技经济市场,(7):34-36.

- 齐静, 2010. 基于 CFD 风热环境模拟的小区规划方案研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学.
- 裘锦华, 2011. 珠海机场低空风切变成因及预报方法 [J]. 空中交通管理, (8): 53-56.
- 孙磊, 2003. 机场附近低空风切变的数值模拟预测 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(Suppl 2): 150-153.
- 单乃超, 周后福, 陈少清, 等, 2018. 合肥机场一次低空风切变机理分析 [J]. 气象科技, 46(6): 1240-1250.
- 王青梅, 郭利乐, 2012. 激光雷达在机场低空风切变探测中的应用 [J]. 激光与红外, 42(12): 1324-1328.
- 俞飞, 姬鸿丽, 2001. 低空风切变的分析与预报 [J]. 四川气象, 21(3): 18-19.
- 张伯寅, 桑建国, 吴国昌, 2004. 建筑群环境风场的特性及模拟——风环境模拟研究之一 [J]. 力学与实践, (3): 1-9.
- 中国工程建设标准化协会, 2012. 建筑结构荷载规范: GB 50009-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 30-33.
- 赵倩, 周后福, 单乃超, 2019. 合肥一次低空风切变的观测与分析 [J]. 气象科学, 39(5): 704-710.
- 张涛, 黎倩, 郑佳锋, 等, 2020. 激光测风雷达研究微下击暴流引发的低空风切变 [J]. 激光技术, 44(5): 563-569.
- CHAN P W, SHAO A M, 2007. Depiction of complex airflow near Hong Kong International Airport using a Doppler LIDAR with a two-dimensional wind retrieval technique [J]. Meteor Z, 16(5): 491-504.
- CHAN P W, LO W Y, LEUNG D Y C, 2010. Low level wind effects of the hangers at the Hong Kong International Airport [C]//The 5th international symposium on computational wind engineering. Chapel Hill, USA.
- CHAN P W, 2012a. Application of LiDAR-based F-factor in windshear alerting [J]. Meteor Z, 21(2): 193-204.
- CHAN P W, 2012b. An event of tail strike of an aircraft due to terrain-induced wind shear at the Hong Kong International Airport [J]. Meteor Appl, 19(3): 325-333.
- CHAN P W, HON K K, 2016. Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions [J/OL]. Adv Meteor, <https://doi.org/10.1155/2016/1454513>.
- FUJITA T T, 1979. Objectives, operation, and results of NIMROD [R/OL]. Chicago: University of Chicago.
- HANNON S M, CLARK T L, 1996. Lidar measurement of wind shear and turbulence and comparison with a predictive fine-mesh mesoscale model [C/OL]//Proceedings of SPIE of the International Society for Optical Engineering, 2737: 151-161.
- ICAO, 2010. Meteorological service for international air navigation: Annex 3 to the convention on international civil aviation [EB]. 16th ed. Montreal: ICAO.
- LEE Y F, CHAN P W, 2014. LIDAR-based F-factor for wind shear alerting: Different smoothing algorithms and application to departing flights [J]. Meteor Appl, 21(1): 86-93.
- LEUNG D Y C, LO W Y, CHOW W Y, et al, 2012. Effect of terrain and building structures on the airflow in an airport [J]. J Zhejiang Univ-Sci A, 13(6): 461-468.
- LI H, ZHOU M, GUO Q H, et al, 2018. Compressive sensing-based wind speed estimation for low-altitude wind-shear with airborne phased array radar [J]. Multidimens Syst Signal Process, 29(2): 719-732.
- LIU C H, LEUNG D Y C, MAN A C S, et al, 2010. Computational fluid dynamics simulation of the wind flow over an airport terminal building [J]. J Zhejiang Univ-Sci A, 11(6): 389-401.
- SHUN C M, CHAN P W, 2008. Applications of an infrared Doppler LiDAR in detection of wind shear [J]. J Atmos Ocean Technol, 25(5): 637-655.
- SHUN C M, CHENG C M, LEE O, 2003. LiDAR observations of terrain-induced flow and its application in airport wind shear monitoring [C]//International Conference on Alpine Meteorology (ICAM) and Mesoscale Alpine Programme (MAP) Meeting. Switzerland: 19-23.
- SZETO K, CHAN P W, 2006. High resolution numerical modelling of windshear episodes at the Hong Kong International Airport [C]//12th Conference on Aviation, Range, & Aerospace Meteorology. Atlanta, USA.
- WOLFSON M M, DELANOY R L, FORMAN B E, et al, 1994. Automated microburst wind shear prediction [J]. Linc Lab J, 7(2): 399-426.

(责任编辑 秦社彩)