

## 深圳机场低空风场的工程仿真方法

唐 矗 洪冠新

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京, 100191)

**摘要:**为综合研究复杂地形、复杂气象等多种因素共同作用下深圳机场附近低空风场的分布形式,文章基于流体力学位势流理论提出了一种低空三维风场工程仿真方法。该方法利用变形后的半球体模拟山体,在此基础上引入圆球绕流模型结合线性变换技术来考虑风场中的过山气流;采用涡环模型考虑复杂气象条件产生的下击暴流;利用经验公式方法描述烟气流对风场的影响。文章以深圳机场实际情况为例,对机场附近的低空三维风场进行了数值建模与计算分析。分析结果表明,该方法可较好地显示出地形作用下风场速度的大小和方向的变化规律,兼顾下击暴流、烟气流的影响。该模拟方法简单合理、便于工程应用,可用于飞行模拟器以及飞机飞行动力特性评估。

**关键词:**复杂环境;低空三维风场;过山气流;下击暴流;烟气流

中图分类号:V212.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)02-0283-07

## Engineering Simulation Method for Low-Level Wind Field of Shenzhen Airport

Tang Chu, Hong Guanxin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China)

**Abstract:** To study the influence of complex terrains and climate conditions on the characteristics of the wind field, a 3-D numerical simulation method for the wind field at low-altitude is developed based on the potential flow theories in fluid dynamics. Mountains are simulated by transformed hemispheroids. Airflow over mountain is calculated by using the linear potential flow result of airflow around a hemispheroid combining linear transform method. Downburst is formed by the vortex ring model. Furthermore, the gas current of a chimney is describe by the experiential formula. Shenzhen airport is taken as an example to simulate and analyze the wind field by this method. The numerical analysis indicates that the wind field can be well described by this simulation method with considering the characteristics of the airflow over mountain, downburst and gas currents. It is suitable and convenient for engineering use by providing a 3-D wind field at low-altitude for flight simulators, and it is also applicable for flight dynamics characteristics analysis of aircrafts.

**Key words:** complex terrains; 3-D wind field; airflow over mountain; downburst; smoke airflow

深圳宝安国际机场是国内较为繁忙的机场之一,该机场位于中国大陆的南缘、珠江入海口的东岸,正处于海陆界面上,地形与气候条件复杂多样。复杂的地形和气象条件会改变机场上空的风场分布形式,影响其上空飞机的飞行姿态,严重的还有

可能危及飞行安全。因此,对复杂地形和气象条件影响下的风场分布形式的研究工作至关重要。

目前,相关学者对于简单地形和天气条件引起的变化风场建模方法已经有了一定的研究。如陈平等<sup>[1]</sup>从大气物理学角度出发采用计算流体动力

学的数值模拟方法对二维及三维的山地丘陵地形及风场进行了模拟与仿真;Kessler<sup>[2]</sup>采用能量学与热力学的相关理论对中尺度环境的多种天气进行了数值模拟。上述两类方法可实现较为准确的地形模拟,并对近地面区域的风场进行有效的仿真,但其方程运算复杂,数学处理的难度较大,不适合飞行力学问题的工程应用。洪冠新等<sup>[3]</sup>从流体力学的角度出发,将圆柱体外部绕流的任意一条流线视为固定壁面,通过改变形状因子的方法模拟山体轮廓,得到了过山气流的二维模拟方法;刘刚<sup>[4]</sup>在此基础上利用多个圆柱外部绕流的线性叠加实现了二维多重山体的过山气流模拟,并且借助坐标变换将原有的二维风场拓展到适用于飞行剖面的三维情况。高静<sup>[5]</sup>则采用函数生成法建立地形模型,并基于圆球外部绕流进行三维过山气流的工程模拟。

与仅考虑地形引起变化风场的研究不同,目前可综合考虑复杂地形、天气条件及建筑物等多种影响因素的低空风场建模方法的研究较少。因此,有必要在上述研究的基础上结合实际地形与工程需要,建立可综合考虑地形与天气等复杂环境的三维风场模型,为飞行安全保障、飞机性能评估等工作提供支持。本文以深圳机场附近的复杂地形模拟为基础,建立可同时考虑过山气流、下击暴流、烟气流等多种形式的复杂风场模型。

## 1 复杂地形与风场建模技术

复杂地形上空风场的仿真研究一般以中尺度地形模拟为主,所得到的风场是典型的三维矢量场。为更好地表现地形特征及依随地形产生的风场属性,需要对复杂地形与风场环境进行建模。本文根据工程实际需求,提出复杂风场的工程建模方法,并编写相关软件,用于研究复杂环境风场仿真研究,其中包含复杂地形引起的过山气流、下击暴流及烟气流等多个风场模型。

本文采用的风场模型均基于位势流理论,假设风场为不可压、无粘、无旋的位流场,且不考虑温度变化<sup>[6]</sup>。选取大地坐标系  $Oxyz$  为全局坐标,原点  $O$  为海平面任意一点, $Ox$  轴沿水平向东, $Oy$  轴水平向北, $Oz$  轴垂直于海平面向上,表示海拔高度。

### 1.1 复杂地形模拟

常规三维地形模拟方法如栅格网格模型、非规则三角形网格模型等<sup>[5,7]</sup>,虽均能直接、真实、精确

地描述地形特征,但不利于风场仿真计算。本文采用简单的半球体模拟实际地形,通过引入线性变换,使模拟地形贴近于实际地形,从而满足地形模拟的要求。

将复杂地形看做由多个单独山体按一定形式在空间位置分布组成。因此,针对每个山体建立各自独立的局部坐标  $o_m x_m y_m z_m$  如下,以单个山体最高点在海平面上的投影位置为局部坐标系原点  $o_m$ ,其  $x_m y_m$  平面与海平面重合,山体的长短轴分别为局部坐标的  $x_m$  轴和  $y_m$  轴,山体的海拔高度为  $z_m$  轴。该局部坐标系原点在全局坐标下为  $(x_i, y_i, 0)$ , $o_m x_m$  轴与  $Ox$  轴之间的夹角为  $\theta$ 。

对局部坐标系下的半球体各轴向坐标值作如下线性变换

$$\begin{cases} \xi = ax_m \\ \eta = by_m \\ \zeta = cz_m \end{cases} \quad (1)$$

式中  $a, b, c$  为变形参数,可通过与实际地形的对比分析确定。若令半球体半径为单位 1,那么  $a, b$  表示山体底面的横向与纵向长度, $c$  表示该山体高度。在实际地形中,一般山体占地面积较大且形状较为复杂,相关变形参数可根据  $k = \Delta h / \Delta l$ ,山体坡度的平均值确定

$$\begin{cases} a = \frac{2c}{k_a} \\ b = \frac{2c}{k_b} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $k_a, k_b$  表示在  $x_m$  和  $y_m$  方向山体坐标系下的平均坡度。

已知单个山体在局部坐标系下的表述形式,结合各山体局部坐标系与全局坐标系之间的坐标转换关系,即可得到大地坐标系下,复杂地形的计算模型。

### 1.2 风场描述

#### 1.2.1 过山气流

复杂地形影响气流的主要因素是地形,其次才是障碍物及地表粗糙度<sup>[8]</sup>。由地形引起的过山气流是复杂风场的主要表现形式。

根据开尔文定理,当忽略外力场时,圆球在无界静止的不可压缩理想流体中运动,所驱动的流场是单连域内的无旋流。当圆球做匀速直线运动时,它在动力学上等价于圆球前方均匀来流绕过圆球的定常无旋流动<sup>[9]</sup>。选择偶极子作为圆球的基本解,由速度势可计算出绕圆球无旋流动的速度场,

通过相应的线性变换和线性叠加,得到  $n$  座任意位置的山体。在空间任意一点的诱导速度表示为

$$\begin{aligned}
 u_m &= U + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{x}{a} - x_i \right)^2 + \left( \frac{y}{b} - y_i \right)^2 + \left( \frac{z}{c} - z_i \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} - \frac{3}{2} \sum_{i=1}^n UR_a^2 \left( \frac{x}{a} - x_i \right)^2 \\
 &\quad \left[ \left( \frac{x}{a} - x_i \right)^2 + \left( \frac{y}{b} - y_i \right)^2 + \left( \frac{z}{c} - z_i \right)^2 \right]^{-\frac{5}{2}} \\
 v_m &= -\frac{3}{2} \sum_{i=1}^n UR_a^2 \left( \frac{x}{a} - x_i \right) \left( \frac{y}{b} - y_i \right) \\
 &\quad \left[ \left( \frac{x}{a} - x_i \right)^2 + \left( \frac{y}{b} - y_i \right)^2 + \left( \frac{z}{c} - z_i \right)^2 \right]^{-\frac{5}{2}} \\
 w_m &= -\frac{3}{2} \sum_{i=1}^n UR_a^2 \left( \frac{x}{a} - x_i \right) \left( \frac{z}{c} - z_i \right) \\
 &\quad \left[ \left( \frac{x}{a} - x_i \right)^2 + \left( \frac{y}{b} - y_i \right)^2 + \left( \frac{z}{c} - z_i \right)^2 \right]^{-\frac{5}{2}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $U$  为常值风; $(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个山体局部坐标原点在局部坐标系下的位置; $R_a = 1$ ;  $a_i, b_i, c_i$  为第  $i$  个山体的变形参数。

### 1.2.2 下击暴流

受地理、环境等多重因素的影响,在地形较为复杂的地区常常会出现对流天气,甚至强对流天气。在强对流天气中,雷暴极易产生下击暴流。本文采用涡环模型模拟下击暴流。涡环所诱导的流场为轴对称流场,因此选取柱坐标(图 1)作为下击暴流的局部坐标系。下击暴流的中心在地面的投影为局部坐标系的原点,其在全局坐标中表示为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 对称轴为柱坐标的  $z_r$  轴,  $x_r$  轴为垂直于  $z_r$  轴平面内过  $(x_0, y_0)$  的直线。

在适当高度与水平位置布置一系列涡环,令第  $i$  个涡环的圆心的高度坐标为  $H_i$  和水平方向坐标为  $x_i$ , 其强度为  $\Gamma_i$ , 涡环半径为  $r_v$ , 空间任意一点  $P(r, z_r)$  到涡心的距离表示为  $r_1, r_2$ , 那么涡环流函数<sup>[10]</sup>为,

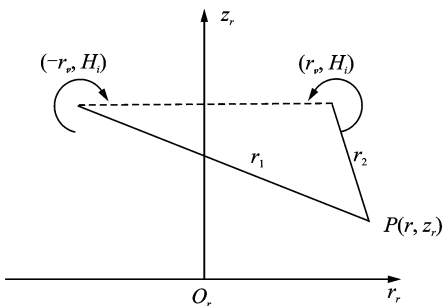


图 1 涡环模型局部坐标示意图

$$\psi = -\frac{\Gamma}{2\pi} (r_1 + r_2) [F_1(\lambda) - E_1(\lambda)] \tag{4}$$

式中,  $F_1(\lambda)$  和  $E_1(\lambda)$  为椭圆积分, 且  $0 \leq \lambda^2 \leq 1$ 。  $F_1(\lambda) - E_1(\lambda)$  通常使用近似值公式<sup>[11]</sup>

$$[F_1(\lambda) - E_1(\lambda)] \approx \frac{0.788\lambda^2}{0.25 + 0.75\sqrt{1-\lambda^2}} \tag{5}$$

根据流函数的性质, 可计算空间任意一点  $P(r, z_r)$  的诱导速度。当  $P$  不在涡环对称轴上时,  $P$  点的诱导速度  $V_r$  为

$$\begin{cases} V_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ V_{rz} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \end{cases} \tag{6}$$

若空间任意一点位于涡环对称轴上, 那么有  $r_1 = r_2$ , 涡环在该点诱导速度为

$$\begin{cases} V_{rr} = 0 \\ V_{rz} = \frac{\Gamma}{2r_v} \left[ 1 + \left( \frac{z_r}{2r_v} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \end{cases} \tag{7}$$

式(6,7)构成空间任意一点由涡环模型诱导的速度场。因此, 在局部直角坐标系下, 空间点  $(x_r, y_r, z_r)$  的速度如式(8), 其中,  $r = [x_r^2 + y_r^2]^{1/2}$ 。

$$\begin{cases} V_{rx} = V_{rr} \frac{x_r}{r} \\ V_{ry} = V_{rr} \frac{y_r}{r} \\ V_{rz} = V_{rz} \end{cases} \tag{8}$$

为模拟地面边界条件, 涡环模型以地面为对称面成对出现。与单对涡环模型相比, 多对涡环模型能更好地模拟下击暴流得外流特征, 通常采用 3 对涡环模拟。

### 1.2.3 烟气流

烟气流是一种上升气流, 是一股温度高于环境大气、气体结构不同于环境大气、且具有一定能量的运动烟团<sup>[12]</sup>。烟气流的上冲流速和由于温差造成的热气抬升流速叠加后在飞机飞行高度上存在一定的上冲流速, 这种上冲流速可能对飞行的安全性产生影响。在静风的条件下, 烟气流可在柱坐标下描述, 因此, 对此局部柱坐标有如下定义, 原点  $O_s$  为烟囱出口的中心,  $h_s$  轴为烟囱的轴线,  $r_s$  轴为烟囱出口平面内过原点的任意一条直线, 如图 2 所示。

在实际应用中常常统计长期的烟气排放总量, 大多数情况下并非连续排放, 因此所求的出口速度较实际速度低。烟囱相关参数的经验计算关系为



图2 烟气流局部坐标示意图

$$V_s = \frac{Q}{\pi V} \quad (9)$$

式中:  $V_s$  表示出口速度;  $V$  为烟囱的体积;  $Q$  表示烟气排放量。

中科院大气所首先在石景山电厂测试烟气有关数据以验证计算模式, 然后根据妈湾电厂的实际环境状况进行数据模式计算, 并经数值仿真拟合方法构成高度和水平距离的函数。局部坐标系下, 式(10)表示烟气流的速度变化率<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \dot{V}_{sh} = \frac{\partial V_h}{\partial h} \dot{h} + \frac{\partial V}{\partial r} \dot{r} \\ \dot{V}_{sr} = \frac{\partial V_r}{\partial h} \dot{h} + \frac{\partial V}{\partial r} \dot{r} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $V_{sh}$ ,  $V_{sr}$  分别为烟气流上口出口速度的水平和垂直方向的分量。转换到全局直角坐标下的方法与下击暴流的变换方法一致, 其速度为  $u_s$ ,  $v_s$ ,  $w_s$ 。

## 2 深圳机场复杂环境模拟

### 2.1 深圳机场运行环境

深圳宝安机场西临珠江口宽阔的水面, 周边地势东南高西北低, 平均海拔在 70~120 m, 东南部主要为低山; 中部和西北部主要为丘陵, 山间有较大冲击平原; 西南部主要为较大片的滨海冲击平原, 西移而来的雷暴在移过水面时得到大量的能量, 移至机场上空后, 受到山脉的抬升作用, 具有较大强度<sup>[14]</sup>。

从地理位置上看, 深圳机场地处亚热带向热带的过渡地带, 具有亚热带和某些热带地区的气候特征。受亚热带海洋性气候影响, 夏季多为季风低压、热带气旋所影响, 盛行偏东南季风, 高温多雨; 其余季节多受蒙古高压影响, 盛行东北季风, 天气较为干燥<sup>[15]</sup>。深圳机场恰处于这种季风雨带位

置, 雷暴次数多, 对流亦趋活跃。统计表明, 影响深圳机场的对流天气在一年中持续有 10 个月之多。这样长时期的对流性天气的气候特征, 极有可能产生低空风切变。

此外, 为解决深圳迅速发展带来的能源不足的问题, 在深圳已建立了多个电厂, 其中以妈湾电厂因其厂址处于飞机进场与飞机转弯处而备受关注。中国工程咨询公司就妈湾电厂的选址问题组织了论证<sup>[16]</sup>。

从上述描述可以看出, 深圳机场处于地形、天气、建筑物条件复杂的运行环境中。影响飞机飞行安全的低空风切变包括地形引起的过山气流, 对流天气引起的下击暴流, 以及电厂烟囱引起的烟气流等。

### 2.2 数值仿真

深圳机场复杂环境下的低空风场受复杂地形、天气、建筑物等多种因素影响, 因此, 其风场模型可将上述 2 种基本模型风场线性叠加得到, 那么空间任意一点的速度即可表示为

$$\begin{cases} u = u_m + u_r + u_s \\ v = v_m + v_r + v_s \\ w = w_m + w_r + w_s \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $u, v, w$  为全局坐标中沿坐标方向的风速分量; 下标  $m, r, s$  分别表示过山气流、下击暴流和烟气流的影响。

在实际情况的处理过程中, 由于烟气流的影响高度较低, 且衰减较快, 若其未处于起降航线上或飞行高度较高时可以不考虑。同样, 若天气条件较好, 无雷暴天气, 即不用考虑下击暴流模拟。此时, 低空风场主要受地形和常值风的影响。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 模型模拟基本数据

#### 3.1.1 地形模拟数据

深圳机场附近地形图如图 3 所示。在仿真计算过程中, 以机场为坐标原点建立地坐标系, 选择其附近 30~40 km 为模拟范围。机场的海平面高度为 90 m。

深圳机场附近山体参数如表 1 所示。其中:  $(x_0, y_0)$  表示山体所在的位置;  $z_0$  表示海平面高度;  $\theta$  为山体坐标相对地坐标的夹角;  $k_a, k_b$  分别表示在山体坐标系下沿轴方向的坡度, 坡度对山体形状的模拟有重要作用。

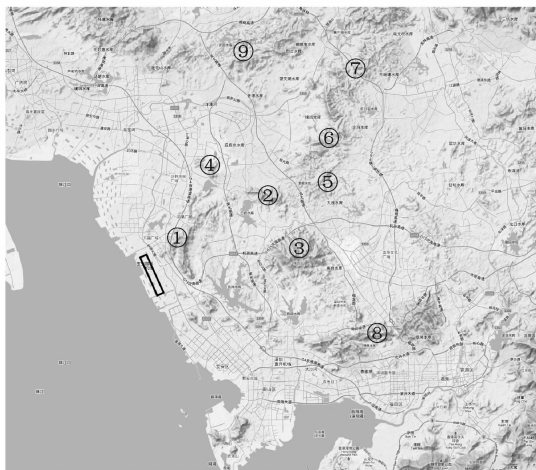


图 3 深圳机场附近地形图

表 1 深圳机场附近山体参数

序号	$k_a$	$k_b$	$c/m$	$x_0/m$	$y_0/m$	$\theta/(^\circ)$
1	0.234 8	0.077 1	350	2 802.3	4 055.9	-25
2	0.062 5	0.166 7	230	9 144.0	7 811.7	-20
3	0.163 6	0.200 0	530	11 508.2	2 077.9	-5
4	0.162 5	0.260 0	210	4 209.4	11 212.0	0
5	0.123 8	0.185 7	210	13 249.2	8 834.0	5
6	0.077 8	0.090 3	220	13 062.2	12 545.4	-20
7	0.255 6	0.083 6	310	13 904.5	16 723.6	7
8	0.057 5	0.230 0	310	16 761.0	-6 278.3	5
9	0.152 4	0.065 3	400	7 992.3	23 201.9	50

### 3.1.2 风场模拟数据

深圳机场附近的常值风沿跑道方向,即与东方向的夹角为  $117^\circ$ ,常年的平均风速为  $U=3\text{ m/s}$ 。假设盛行东北季风的条件下,在跑道的一端出现雷雨天气,并且考虑在飞机进场、转弯处电厂位置有烟气流存在。

下击暴流的基本参数见表 2,其中, $\theta, \phi, \varphi$  分别表示涡环坐标系与地坐标系之间的欧拉角;烟气流的初始模拟数据可通过烟气排放总量和烟囱的体积间的相互关系得到,妈湾电厂烟囱及烟气排放参数为烟囱高度 210 m,上口计算直径 7.5 m,烟气排放量  $2.730\ 3 \times 10^5$ ,出口流速 20.63 m/s。

表 2 机场跑道一段出现下击暴流的参数

序号	$\Gamma$	$x_0/m$	$y_0/m$	$z_0/m$	$\theta, \phi, \varphi/(^\circ)$	$r_v/m$
1	-10 000	-1 135	2 228	1 000	0	2 000
	10 000					-1 000
2	-1 0000	-1 135	2 228	1 000	0	2 500
	10 000					-1 000
3	-10 000	-1 135	2 228	-1 000	0	3 000
	10 000					1 000

## 3.2 地形与风场模拟

根据测量得到的机场附近实际地形数据,采用 3.1 节提到的复杂地形建模方法模拟出的仿真等高线图,如图 4 所示。

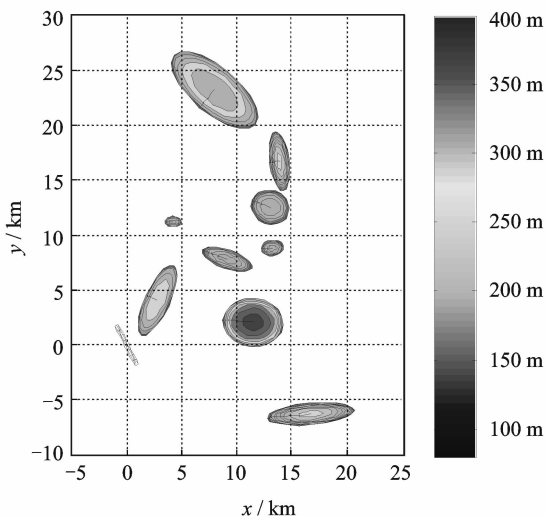


图 4 深圳机场模拟仿真等高线图

深圳机场附近复杂天气情况下的三维风场模拟结果如图 5 所示,图中设定的视角是沿机场方向气流的流动方向。从图中可以看出,过山气流的绕爬特性,且在下击暴流出现的区域出现明显的速度变化。由于烟气流相对影响的范围较小,且沿垂直与水平变化消散较快,因此在图中表现不明显。

图 6 表示沿机场跑道速度场的剖面图。图中下击暴流引起的速度变化较为明显。

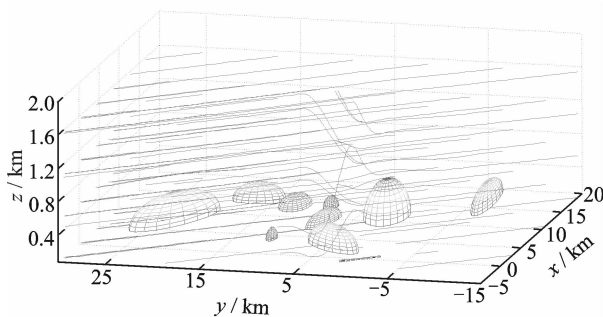


图 5 深圳机场附近三维风场

## 3.3 速度二维剖面图分析

深圳机场虽位于对流活跃的地区,但相对日常飞行活动,雷暴出现次数相对较少,故地形和烟气流为日常飞行时风场的主要影响因素。表 3 给出了只考虑地形和烟气流两种影响因素下,机场上空 350,530 和 800 m 的风场速度二维剖面图。

从图中可以看出,随着高度的升高,由地形引

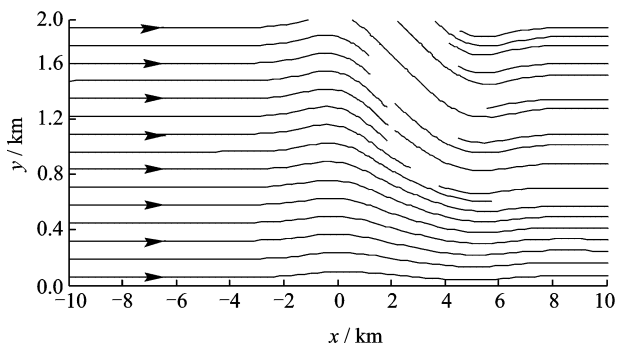


图 6 沿机场跑道剖面的速度场流线图

起的 3 个方向的速度变化逐渐减小, 其中在 800 m 以下地形对风场的影响较为严重; 在 800 m 的图中可以看到有一处出现速度变化量较大的区域, 此变化是烟气流引起的; 在烟囱上空, 烟气流引起的风场变化会随着地形影响逐渐变小而逐渐表现出

来, 在此高度以上, 地形和大型建筑物对风场影响已很小。

不同高度条件下, 速度变化量的最大值统计如表 4 所示。从表格数据中可以看出, 随着高度的升高, 3 个方向的速度变化量逐渐减小。350 m 处于大多数山体的上空, 水平方向两个速度变化明显; 530 m 处 3 个方向的速度较 350 m 都有明显的下降; 800 m 处垂直速度发生较大变化, 这是烟气流引起的, 与水平方向的变化量相比较明显, 在此高度地形对速度的影响已较小。

通过速度的剖面图中可以得到, 在地形环境复杂的地区, 垂直速度随山形而变化, 其量级小于水平风速, 但对于飞行的影响不可忽视。为保证飞行安全, 应在安全高度以上飞行; 如需低空飞行也应避免穿越山体交界处; 在地形复杂地区起降需要远离山体, 并且需要回避大型建筑物。

表 3 二维速度剖面图

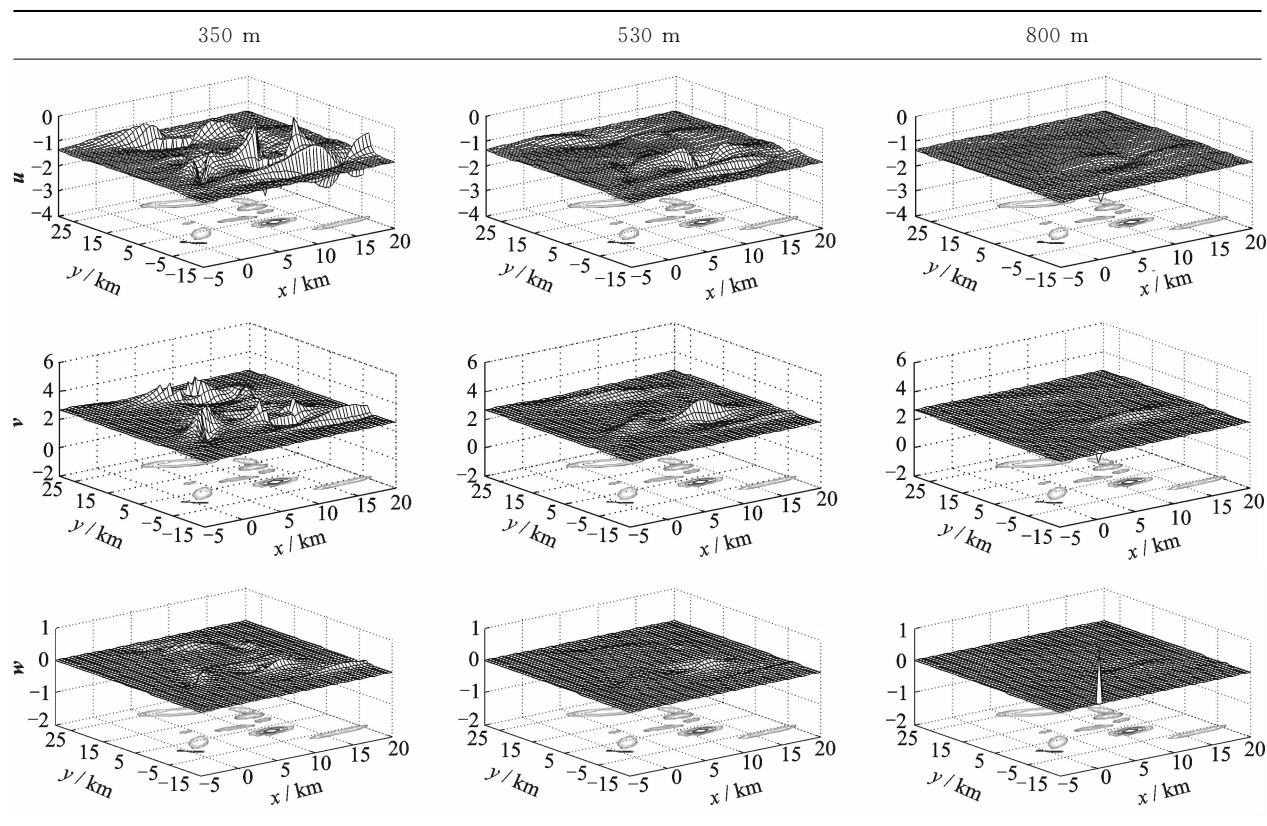


表 4 速度变化量表

	200 m	350 m	530 m	800 m	1 100 m	1 400 m
$\Delta u_{max} / (m \cdot s^{-1})$	5.22	1.50	0.68	0.38	0.15	0.03
$\Delta v_{max} / (m \cdot s^{-1})$	3.93	1.42	1.22	0.73	0.28	0.06
$\Delta w_{max} / (m \cdot s^{-1})$	0.39	0.31	0.24	1.63	0.62	<0.01

### 4 结 论

本文运用工程方法对复杂地形进行了模拟, 并基于流体力学位势流理论, 以深圳机场实际情况为例, 对含有过山气流、下击暴流及烟气流等复杂环境下的低空三维风场进行了综合模拟。通过深圳机场上空风场特性的数值建模与计算分析, 相关结论整理如下:

(1)采用改进变形半球体模拟地形的方法能够较为形象地模拟出山体形状,简化模拟参数,且便于工程计算。

(2)以地形模拟为前提,模拟过山气流可以较好地显示地形作用下风场速度的大小和方向的变化规律,能够满足工程上复杂地形上空流场的模拟要求。

(3)通过模拟不同高度处的速度的二维剖面,可以较直观地显示出风场速度随高度的变化趋势。

该方法提供了一种低空三维风场模型的生成方法,可用于工程应用中飞机低空飞行动力学特性的分析与研究。目前,这种模拟方法在模拟复杂地形时有一定的局限性,在模拟连绵山脉方面尚有不足,有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈平. 地形对山地丘陵风场影响的数值研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.  
Chen Ping. Numerical study of terrain influence on the airflow over hilly land[D]. Hangzhou:Zhenjiang University,2007.
- [2] Kessler E. Thunderstorm morphology and dynamics [M]. Oklahoma: University of Oklahoma Press, 1992.
- [3] 洪冠新,董海宁,金长江. 过山气流的一种模拟方法[J]. 飞行力学,1998,16(2):24-28.  
Hong Guanxin, Dong Haining, Jin Changjiang. An engineering simulation model of airflow over mountain[J]. Flight Dynamic, 1998, 16(2):24-28.
- [4] 刘刚. 用于任务规划系统的地形和风场的数值仿真研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2002.  
Liu Gang. Numerical simulation of terrain and wind-field for MPS[D]. Beijing:Beihang University,2002.
- [5] 高静. 复杂地形低空三维风场数值仿真方法及应用[D]. 北京:北京航空航天大学,2006.  
Gao Jing. Numerical simulation method for 3-D wind field over complex terrain at low altitude[D]. Beijing:Beihang University,2006.
- [6] 肖业伦,金长江. 大气扰动场中的飞行原理[M]. 北京:国防工业出版社,1993.  
Xiao Yelun, Jin Changjiang. Flight theory in atmospheric turbulence[M]. Beijing: National Defence Industry Press,1993.
- [7] 王永明. 地形可视化[J]. 中国图象图形学报,2000,5(6):449-456.
- Wang Yongming. Overview of terrain visualization [J]. Journal of Image and Graphics, 2000,5(6):449-456.
- [8] 刘如琛. 平地与高山风速转换的数值研究[J]. 电力勘测,1997(13):54-61.  
Liu Ruchen. Numerical study of plains and mountain speed conversion [J]. Magazine Office of Electric Power Survey and Design,1997(13):54-61.
- [9] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,1999.  
Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang. Fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1999.
- [10] Robinson P A. The modeling of turbulence and downbursts for flight simulators[R]. Report No. 339. Toronto: University of Toronto,1991.
- [11] Iven M. A ring-vortex downburst model for flight simulators[J]. Journal of Aircraft, 1986, 23(3): 232-236.
- [12] 王刚峰. 妈湾电厂烟囱对飞机安全是否构成威胁的论证[J]. 电力建设,1995(1):10-12.  
Wang Gangfeng. Chimney of Mawan power plant argument on aircraft safety[J]. Electric Power of Construction, 1995(1):10-12.
- [13] 金长江,洪冠新,韩潮. 烟气流对飞机进场着陆影响的数值仿真研究[J]. 航空学报,1996,17(7):52-54.  
Jin Changjiang, Hong Guanxin, Han Chao. Numerical simulation of influence of hot-stream on aircraft's approach flight[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(7):52-54.
- [14] 张小灵. 机场低空风切变气象服务探索[J]. 空中交通管理,2006(8):28-30.  
Zhang Xiaoling. Weather service of the airport at low altitude[J]. Air Traffic Management, 2006(8): 28-30.
- [15] 庄松寿. 深圳机场低空风切变分析[J]. 河南气象, 1996(1):17-18.  
Zhuang Songshou. Analysis of low altitude wind shear at shenzhen airport[J]. Meteorology Journal of Henan, 1996(1): 17-18.
- [16] 金长江. 妈湾电厂烟气流对深圳机场起落飞行安全的影响论证工作已通过鉴定[J]. 飞行力学,1992(6): 92.  
Jin Changjiang. Effect of Mawan power plant on taking-off and landing flight safety at shenzhen airport [J]. Flight Dynamic, 1992(6):92.

