

文章编号: 2096-1618(2020)06-0599-05

# 基于函数拟合的三维微下击暴流建模

何姣阳<sup>1</sup>, 赖 灿<sup>1</sup>, 李 静<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民用航空局第二研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**微下击暴流是一种可以产生近地面破坏性水平辐散气流的风暴局部性强下沉气流,越靠近地面风速越大,属于一种突发性、局地性的强对流破坏性天气。为减小或者避免微下击暴流所引起的低空风切变所带来的危害,常常建立风场模型,进行风场试验。利用工程模拟法,根据其流体力学特征,采用分段函数建立微下击暴流的数学模型,从而进行风场模拟,建立能较好反映其风场结构特征的三维风场模型。

**关键词:**微下击暴流;风场模型;数值模拟

**中图分类号:** TN957.52<sup>+</sup>9

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.003

## 0 引言

下击暴流是一类产生于强对流云团中较强的下沉运动,到达地面后受阻而快速向四周水平辐散,形成强烈的阵性水平出流,即水平风切变,对飞行安全构成极大威胁,对农作物、林木、建筑物等造成严重破坏。近年来,全球因下击暴流天气灾害所造成的损失巨大,据马爱平在《科技日报》的报道,2011年5月9日,11级大风突袭了新都泰兴、木兰两镇,上万户居民的房屋一夜之间屋顶被刮飞,不仅如此,家畜、树木和农作物也有不同程度的受损,木兰镇到泰兴镇沿途的农作物被吹成“一边倒”,大量树木也被拦腰折断,据证实,该大风由下击暴流引起。根据下击暴流产生近地面破坏性水平辐散出流的尺度范围,可以将其分为宏下击暴流与微下击暴流。最大出流水平尺度在4 km以上的下击暴流称为宏下击暴流,这类下击暴流的水平出流速度峰值可高达60 m/s,持续5~30 min,在地面引起范围宽广的龙卷破坏;最大出流水平尺度不足4 km的下击暴流称为微下击暴流,水平出流速度峰值可高达75 m/s,其跨地面辐散中心的峰-峰多普勒速度差必须超过10 m/s,由于微下击暴流水平尺度小,低层可出现较大的水平风切变,所以微下击暴流对飞行安全危害极大<sup>[1]</sup>。这类低空风切变持续时间短且发生突然,因此对其探测和准确预报有较大的难度和潜在危险,在对微下击暴流的研究中,应用精确的大气物流模型和相关资料<sup>[2]</sup>,采用数值模拟方法<sup>[3]</sup>对微下击暴流建立一个灵活多样的模拟风场<sup>[4]</sup>。

## 1 下击暴流的特征

### 1.1 下击暴流的结构

微下击暴流实拍图见图1。



图1 微下击暴流实拍图

到目前为止,国际上完成了4次下击暴流的大型实测研究<sup>[5]</sup>。图2是Hjelmfelt<sup>[6]</sup>在总结了JAWS的研究成果基础上,给出的一个经典的微下击暴流风速剖面结构图。如图2所示,下击暴流的风场的径向风速不仅有径向风剖面,同时还具有竖向风剖面<sup>[7]</sup>。其风速在近地面区域迅速增大至最大值,而后随着高度增加又迅速衰减,在高度为大概80 m处可达到速度最大值。

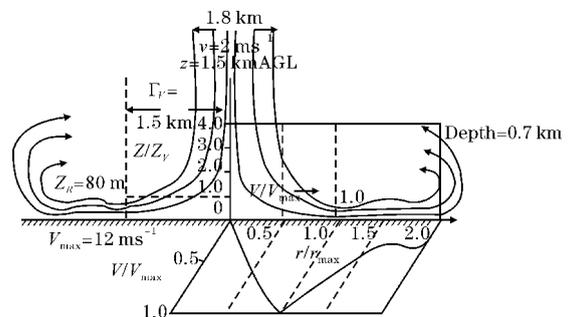


图2 下击暴流风速剖面图

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1733103)

下击暴流中的下沉气流在到达地面后迅速向四周辐散,形成近似于轴对称的水平出流。20世纪70年代中期,藤田教授首先从气象角度说明低空风切变的危险性,并且给出微下击暴流的概念,图3是下击暴流的一个大致的流场结构图,从该图可以看出,在出流前沿有一水平环状涡管,在涡环下方近地面水平速度达到极大值。下击暴流地面气流向外径向辐散,中心相对为高气压。

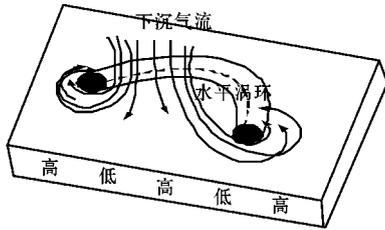


图3 下击暴流结构模型

## 1.2 下击暴流的基本风场模型

生成下击暴流基本风场的简单模型主要有涡环模型和冲击射流模型,两种风场模型如图4所示,涡环模型的原理为高速向下冲击的气流在撞击地面后,由于气流的相对运动而形成圆环;而冲击射流模型的原理为气流急剧下沉在冲击地面后迅速向四周辐散,这个过程大致包括自由射流区、冲击区、壁面射流区。其中用冲击射流模型得到的模拟风场的平均风速剖面与实测数据较吻合<sup>[8]</sup>。

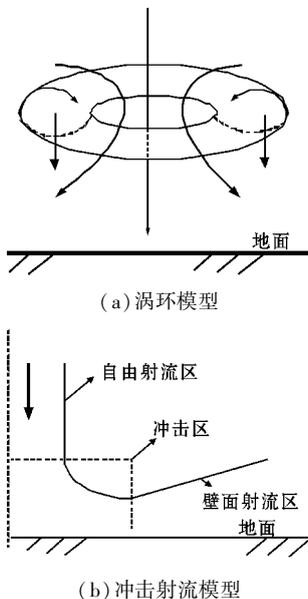


图4 涡环模型和冲击射流模型

## 2 风场建模

目前,在研究和模拟各种风场特征所用的方法中,以下5种方法最为常用<sup>[9]</sup>:(1)实测风场数据法;(2)大气动力学数值仿真法;(3)工程模拟法;(4)最坏风模型法;(5)飞行品质推荐的典型风模型<sup>[10]</sup>。这5种

方法分别有其优缺点,由实测风场数据法得到的风场数据真实可靠,但要耗费大量的人力物力,成本太高;大气动力学数值仿真法计算量较大且比较复杂;最坏风模型法比较单一,不能很好地表示真实风场特征;而飞行品质推荐的典型风模型形式过于简单,不能用来研究在风场影响下的飞行危险,但可以用来校验飞行品质;而工程模拟法比较简单直观,其本质就是从风场的结构特征出发,利用流体力学方程描述风场气流的流动规律,可以较好地反映真实风场的主要物理特征。因而文中也借鉴工程模拟法,利用数值模拟方式模拟微下击暴流的三维风场。

多普勒天气雷达在探测下击暴流时有一定的局限性,波速中心高度随距离的增加而增加,波速宽度随距离的增加而变宽,对于下击暴流的探测具有很大的影响。随着雷达距离的增加,对于识别下击暴流的难度也增加,一般设置雷达的最大探测范围为200 km,超过此范围的下击暴流很难被雷达识别。速度数据折叠也会在一定程度下影响下击暴流的识别。

以雷达位置为原点建立坐标系,给定下击暴流相对于雷达的位置,设置好雷达以及下击暴流的参数;利用数值模拟方式反演下击暴流的三维速度场,再利用雷达对其探测。计算下击暴流径向速度,以其在径向上的投影为该径向距离库上的值,即将反演得到的下击暴流数据映射到雷达径向数据中,得到其雷达径向速度PPI图。

### 2.1 模拟风场的参数设置

建立一个风场模型,首先要对其进行参数设置。对于一个下击暴流的三维风场模型,风场的中心位置,风场的横向、纵向以及高度上限,气流入口半径,这些参数大致确定了一个风场的范围。引入一个 $X$ 方向上的扭曲因子<sup>[11]</sup> $g_x$ 和一个 $Y$ 方向上的扭曲因子 $g_y$ (设 $g_r$ 为算术平均值, $g_r = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}$ )来描述一个更符合真实下击暴流风场的风切变风场特征,使其可以生成对称风场、逆风风场、顺风风场、侧风风场以及偏风风场等几种不同类型的风切变风场。风场基本参数初始化设置如表1所示。

表1 风场基本参数

参数	参数值
风场高度上限 $H_{\max}$	1000 m
风场 $X$ 方向尺度上限 $X_{\max}$	6000 m
风场 $Y$ 方向尺度上限 $Y_{\max}$	6000 m
气流入口半径 $R$	2000 m
大气初始风速 $V_0$	25 m/s

设置好以上这些参数后,就可以得到一个简单的下冲气流,规定向下为 $V_0$ 的正方向,于微下击暴流而言,其初始风速 $V_0$ 一般都是正值。反之,当其为负值时,就代表地面的一些上升气流。

### 2.2 下冲气流的垂直风速计算

以风场中心(设风场中心坐标为(0,0,0))为原点,建立一个三维笛卡尔坐标系。在 Z 轴方向,取风场任意一个横截面,设这个风场截面中心为(X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub>),则风场 X、Y 方向的尺度上限相对于风场截面中心位置为

$$X_0 = \frac{X_{\max}}{2}$$

$$Y_0 = \frac{Y_{\max}}{2}$$

设该截面上任意一点(x,y)到(X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub>)的距离为 D<sub>1</sub>,则

$$D_1 = \sqrt{(X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2}$$

假设并计算一个与下击暴流风场位置和扭曲因子有关的参量 ΔR,则

$$\Delta R = R \times \left( \frac{\Delta X}{D_1} g_x + \frac{\Delta Y}{D_1} g_y \right)$$

其中 ΔX=X-X<sub>0</sub>,ΔY=Y-Y<sub>0</sub>,设该点引入扭曲因子后对应的风场半径为 R<sub>s</sub>,R<sub>s</sub>=ΔR+√(ΔR<sup>2</sup>+R<sup>2</sup>×(1-g<sub>r</sub>)<sup>2</sup>)。

下击暴流风场在 Z 方向的径向速度分量 V<sub>zh</sub>满足:

$$\begin{cases} V_{zh} = G_0 \times V_0 & (H \geq H_{\max}) \\ V_{zh} = G_0 \times V_0 \times \left( 1 + \left( \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}} \right)^2 \right) & (H < H_{\max}) \end{cases}$$

式中 G<sub>0</sub>=1,根据微下击暴流的风场结构,利用数值模拟方式,可以将下冲气流垂直风速 V<sub>z</sub> 的变化用以下分段函数表示。具体分段区域就利用垂直气流的径向比

率 R<sub>r</sub>= $\frac{D_1}{R_s}$ 划分。

$$\begin{cases} V_z = V_{zh} & (R_r < 1) \\ V_z = V_{zh} \times \frac{(1 - \cos(R_r \times \pi))}{2} & (1 \leq R_r \leq 2) \\ V_z = 0 & (R_r > 2) \end{cases}$$

### 2.3 下冲气流的水平风速计算

由于气流急剧下沉,气流到达地面时会迅速向四周辐散,从而形成强烈的水平风切变,其水平风速的大小取决于出流所形成的水平风切变的风速风量。出流口的径向风速分量 V<sub>ro</sub>在 R<sub>r</sub> 为 1 的条件下,由高度 H 和大气初始风速 V<sub>0</sub> 决定,由以下分段函数表示:

$$\begin{cases} V_{ro} = 0 & (H \geq H_{\max}) \\ V_{ro} = G_0 \times V_0 \times \Delta R \times \frac{(H_{\max} - H)}{H_{\max}^2} & (H < H_{\max}) \end{cases}$$

根据前面对微下击暴流的风速剖面在近地面区域的描述,在高度大概为 80 m 处可达到速度最大值,继而风速开始衰减,所以对 V<sub>ro</sub> 进行改进,即

$$V_{ro} = V_{ro} \times (0.75 + 0.005 \times H) \quad (H \leq 80 \text{ m})$$

相对于下冲气流垂直轴的径向风速 V<sub>r</sub> 与前面计算下冲气流的垂直风速类似,也可以用分段函数拟合,

同样,利用 R<sub>r</sub> 划分不同的拟合区域,则

$$\begin{cases} V_r = V_{ro} \times R_r & (R_r < 1) \\ V_r = V_{ro} \times (R_r - 1.3 \times (R_r - 1)^3 + 0.45(R_r - 1)^6) & (1 \leq R_r \leq 2) \\ V_r = \frac{2.3 \times V_{ro}}{R_r} & (R_r > 2) \end{cases}$$

在上述分段函数中,在 1 ≤ R<sub>r</sub> ≤ 2 区域,等式右边为余弦函数在 R<sub>r</sub>-1 处的幂级数展开形式。综上,便可以计算得出风场 X、Y 方向上的速度分量 V<sub>x</sub>、V<sub>y</sub>,即

$$\begin{cases} V_x = \frac{\Delta X \times V_r}{D_1} \\ V_y = \frac{\Delta Y \times V_r}{D_1} \end{cases}$$

### 2.4 微下击暴流风场仿真

根据表 1 所设置的风场参数,再改变扭曲因子的大小,利用 MATLAB 仿真,可以得出以下几种微下击暴流的三维风场模型:

(1) 假设 X 方向上的扭曲因子 g<sub>x</sub> 和 Y 方向上的扭曲因子 g<sub>y</sub> 都等于 0,即没有偏移量,则可以得到一个对称的三维微下击暴流的风场模型,如图 5 所示。

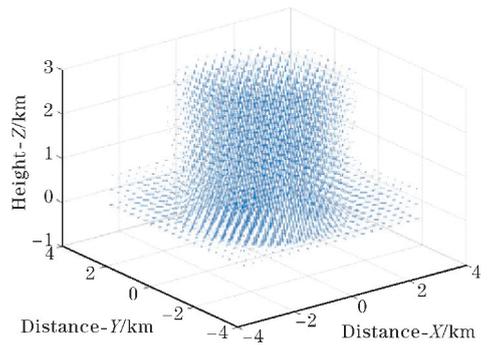


图 5 三维微下击暴流的风场模型

以雷达位置为坐标原点,设置雷达仰角为 0.5°,最大探测距离为 50 km,以对称微下击暴流为例,通过几何投影算法,将反演得到的下击暴流速度场映射到多普勒雷达扫描锥面上,可以得到其多普勒雷达径向速度 PPI 图,如图 6 所示。

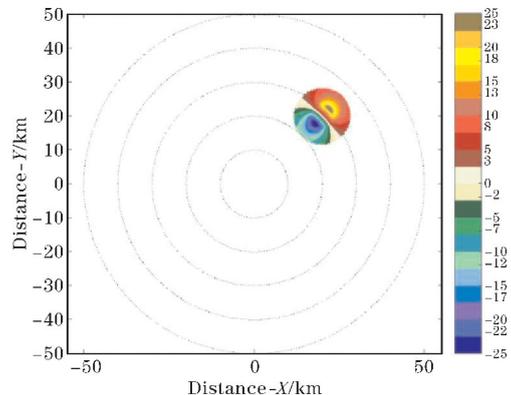


图 6 多普勒雷达径向速度 PPI 图

(2)分别设置  $g_x=0.5$  和  $-0.5, g_y=0$ , 则可以得到微下击暴流的顺风风场和逆风风场, 如图7所示。

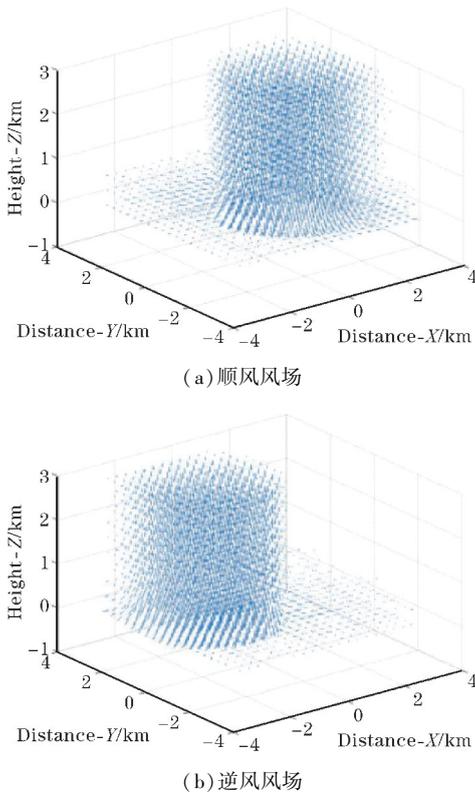


图7 微下击暴流的风场

由此可知, 只要设置不同的扭曲因子, 可以得到不同复杂程度的三维风场模型。

### 2.5 多个下击暴流的风场模型仿真

一般云雹母体能产生多个微下击暴流单体, 假设产生两个微下击暴流, 对其进行仿真。当两个微下击暴流的中心相距较远时, 它们互不影响, 根据数学模型, 可以仿真得到风场图如图8所示。

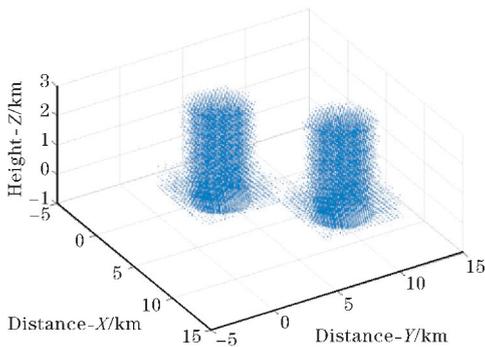


图8 风场图

当两个微下击暴流的中心相距较近时, 两股下冲气流在接地时, 向外扩散的气流在流场中心位置相遇, 从而形成一股向上的上升气流, 其风速随着高度的增加而增至一个最大值, 然后风速又开始急剧减小至趋于平稳。

### 2.6 微下击暴流模型分析

利用函数拟合, 建立能够较好反映下击暴流风场结构特征的三维模型。根据该模拟风场, 可以知道, 下击暴流的影响范围大。在建立的风场模型中, 箭头大小代表风速大小, 箭头方向代表风向, 从模拟好的对称风场中, 截取一个侧面风速图如图9所示, 该风场的风速大小和方向都是关于中心对称的, 从图9可以看出微下击暴流的下冲气流的下冲趋势, 到达地面时, 气流向四周扩散, 和实际观测到的下击暴流所反映的特征一致。

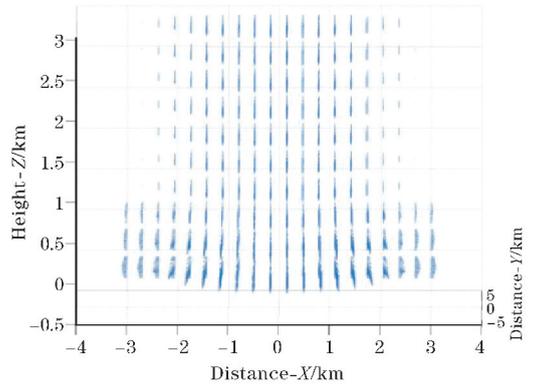


图9 截取的侧面风速图

## 3 应用

微下击暴流所带来的风切变对飞机的飞行危害巨大, 在飞机飞行时遇到微下击暴流时, 其升力先是遇到逆风风切变使升力增加, 而后是垂直风切变和顺风风切变使升力减小, 由于飞机的飞行速度快, 所以其飞行轨迹很容易受升力的影响<sup>[12]</sup>, 飞机在遇到微下击暴流时的飞行轨迹如图10所示。不仅如此, 飞机在进入风场后, 还会受侧风风切变的影响, 但其危害程度视飞机与风场的相对位置而定。一般而言, 微下击暴流的侧风风切变对飞机的飞行轨迹影响不大, 但由强烈的微下击暴流所带来的侧风风切变会产生很大的滚动力矩<sup>[13]</sup>。所以, 对于航空领域来说, 微下击暴流的三维风场建模, 研究其内部风场特征很重要。在没有提前探测到微下击暴流, 而飞机进入其中时, 可以根据风场的结构特征改变飞机的飞行轨迹, 从而避免灾难的出现。

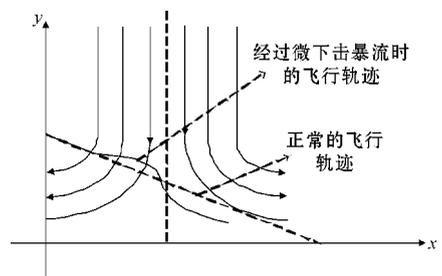


图10 遇到微下击暴流时的飞行轨迹

## 4 结束语

基于冲击射流模型,使用分段函数模拟风场的风速变化,利用数值模拟方式建立风场的三维模型,修改扭曲因子的值,可以得到不同类型的风场模型,还提出了多个微下击暴流同时存在的想法,暂时只对同时存在两个微下击暴流进行简单建模,在后续的研究中,将对同时存在多个微下击暴流进行建模,并研究其相互影响。综上,所建立的风场模型是构造数学模型<sup>[14]</sup>,与多普特雷达反演<sup>[15]</sup>的实际风场相比,不用雷达直接进行探测,就可以得到风场的雷达PPI图。通过仿真软件模拟<sup>[16]</sup>,设置不同的参数可以得到不同的风场模型,用以研究不同类型的风场对飞行的影响,在实验室就可以完成此类研究,降低了研究成本。

## 参考文献:

[1] 张培昌. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 1988.

[2] 邹进上. 大气物理基础[M]. 北京:气象出版社, 1982.

[3] Doviak R J, Zrníc D S, Schotland R M. Doppler Radar and Weather Observations[J]. Applied Optics, 1994, 33(21):4531.

[4] 俞玮. 变化风场的建模与大展弦比无人机飞行仿真[D]. 西安:西北工业大学, 2004.

[5] Alahyari A, Longmire E K. Dynamics of experimentally simulated microbursts [J]. Aiaa Journal, 1995, 33(11):2128-2136.

[6] Hjelmfelt M R. Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27(8):900-927.

[7] 王轩. 下击暴流风场的数值模拟分析[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

[8] Vermeire B C, Orf L G, Savory E. Improved modeling of downburst outflows for wind engineering applications using a cooling source approach [J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2011, 99(8):801-814.

[9] 王文龙. 大气风场模型研究及应用[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.

[10] 刘卫华, 王行仁, 李宁. 综合自然环境(SNE)建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2004(12):3-7.

[11] 刘畅, 李滔, 梅江涛, 等. 微下击暴流的三维建模与预警仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(12):47-52.

[12] 吴扬. 虚拟试验风场建模及应用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.

[13] Zhao Y J. Extracting Energy from Downdraft to Enhance Endurance of Uninhabited Aerial Vehicles [J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 1971, 32(4):1124-1133.

[14] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar (Principles and applications) || Dual-polarized radar systems and signal processing algorithms [J]. 2001(6):294-377.

[15] 王丽. 多普勒雷达回波模拟器的设计与实现 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2016.

## Three-dimensional Microburst Modeling based on Function Fitting

HE Jiaoyang<sup>1</sup>, LAI Can<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Micro-downburst is a kind of local strong downdraft in thunderstorm clouds, which will produce a linear gale when it reaches the ground, and the closer it is to the surface, the greater the wind speed will be, which is a kind of sudden and local strong convective destructive weather. In order to reduce or avoid the harm caused by low-level windshear caused by microburst, wind field models are often established and wind field tests are carried out. In this paper, by using the engineering simulation method, according to its hydrodynamic characteristics, the mathematical model of micro-downburst is established by piecewise function, thus the wind field is simulated, and a three-dimensional wind field model which can better reflect the structural characteristics of wind field is established.

**Keywords:** micro-downburst; wind field model; numerical simulation