

文章编号: 2096-1618(2021)05-0508-04

基于 FLUENT 的下击暴流三维风场建模

李 静¹, 何姣阳², 李田家¹, 王海江²

(1. 新疆和田地区气象局, 新疆 和田 848000; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:微下击暴流是一种突发性强且破坏力巨大的局地灾害性大风, 为避免或减小其带来的灾害, 研究了微下击暴流的风场结构特征, 通过计算流体力学建模软件 CFD (computational fluid dynamics) 建立出能反应风场内部特征的三维模型。基于单个微下击暴流的三维风场模型, 提出并模拟了两个入口初速度不同的微下击暴流的三维风场模型, 并研究了其相互影响。通过 FLUENT 软件的后处理器得到了速度云图、压力云图等产品。

关键词:微下击暴流; 风场结构; FLUENT

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.05.006

0 引言

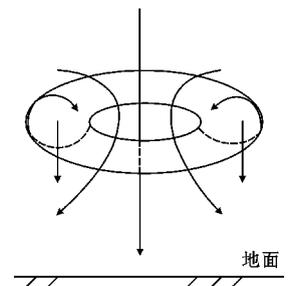
下击暴流是一种发生突然的局地灾害性大风, 其水平出流尺度以4 km为边界, 分为微下击暴流与宏下击暴流^[1]。Fujita 教授将这种局地灾害性大风命名为下击暴流^[2], 并在20世纪70年代中期, 最早提出了微下击暴流这个概念, 同时从气象方面说明了低空风切变的危害性^[3]。一般对飞行安全造成威胁的为4 km以下的微下击暴流^[4], 1974-1985年, 美国因其造成的灾难就有11起之多^[5]。因微下击暴流发生突然且持续时间较短, 雷达一般难以提前探测到, 所以有必要对微下击暴流建立相应的三维风场模型, 以供气象工作者对其进行深入研究。

目前, 对于微下击暴流风场建模主要有以下几种方式: (1) 风场实测数据法。根据实际测得的风场数据对微下击暴流进行仿真, 这种方法得到的风场模型真实, 但灵活性较差, 且所建立的风场数据库需要较大的内存, 花费的成本也较高^[6]。(2) 工程模拟法。以风场特征为依据, 建立相应的数学模型, 再使用例如 MATLAB 等软件进行仿真, 此法简单, 但其采用的拟合函数精度不高^[7]。大多数工程化模型并非基于理论建模, 而是来源于长时间对大气扰动现象的观测与统计^[8]。各种工程化模型需要能够真实地反应出实际研究的大气风场的特点, 模型应该简单便于处理且具有较强的灵活性。(3) 使用计算流体力学建模软件 (computational fluid dynamics, CFD) 建立下击暴流的三维风场模型, 得到的风场模型可以比较准确地反应风场结构特点, 由其处理后得到的产品也较多。文中采用第三种方式, 利用商业 CFD 软件 FLUENT^[9] 建立微

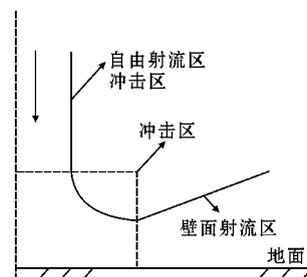
下击暴流的三维风场模型。

1 风场基本模型

目前, 对微下击暴流建模采用的基本模型主要有以下两种: (1) Woodfield 与 Ivan^[10] 首先给出的微下击暴流风场的涡环原理结构模型, 其原理为下沉气流以较高的速度抵达地面后, 由气流的相对运动而形成圆环。(2) 冲击射流模型: 气流急剧下沉, 在到达地面后, 快速向四周辐散开来, 整个过程可以分为自由射流区、冲击区以及壁面射流区。两种基本风场模型如图1所示, 采用冲击射流模型得到的三维风场模型更为吻合实测风场数据^[11]。



(a) 涡环模型



(b) 冲击射流模型

图1 风场基本模型示意图

2 FLUENT 软件及 CFD 数值求解过程介绍

FLUENT 软件是现在使用频率较高的商业 CFD 软件,可以用于模拟外形复杂的流体流动以及热传导,使用的场景较多,灵活性较强。该软件主要包括以下 3 部分^[12]:

前处理器。建立待处理问题的几何模型及计算域,对其进行网格划分。在早期的软件版本中,使用 GAMBIT 软件来完成这一步骤。现在,因 FLUENT 软件整合进 ANSYS 软件包,所以一般使用软件包中的 DesignModeler 软件完成几何模型的建立,通过 Meshing 软件完成网格划分。

求解器。求解器是 FLUENT 软件最重要的组成部分。将划分好的网格导入 FLUENT 中,求解过程包括设定边界、选定基本模型、网格优化等等。

后处理器。FLUENT 软件具有强大的后处理功能,可以将得到的结果以多种形式进行显示,例如速度、压力云图。

在运用 CFD 方法对问题进行求解时,通常需要设置工作环境、边界条件以及算法,其中算法的选择尤为重要,选择一个合适的算法,可以使模拟效率更高、准确度更好。随着计算机技术的不断发展,很多问题可以采用区域离散化数值方法进行求解,比较常用的离散方法有:有限差分法、有限单元法以及有限体积法。文中选用的离散方法为有限体积法^[13]。CFD 数值模拟过程一般可以分为 5 步:(1)建立待求解问题的物理模型,同时将其抽象为数学、力学模型。确定待分析几何模型的空间影响范围。(2)建立几何模型与空间影响范围,即计算域的 CAD 模型,并对其网格划分。网格划分的疏密度及网格单元的形状都会影响计算结果,所以在求解问题时,一般根据需求选择不同的网格密度及形状。(3)设置求解的初始条件。(4)选择合适的算法。(5)选择合适的后处理器对计算结果进行分析并显示。

3 计算模型

3.1 建立几何模型

选用 19.2 版本的 FLUENT 软件。大量研究数据显示^[14],当下击暴雨速度入口高度大于在地面产生的环状涡流尺寸、径向直径大于 $10D$ ($D=1000\text{ m}$)、竖向尺寸大于风场入口高度时,风场的整个计算域的大小对下击暴雨风剖面的影响很小,基本可以不计。对于单个微下击暴雨的建模时,以三维长方体为基础,建立风场的几何模型,设置计算域的尺寸为 $X(14D)\times Y(14D)\times Z(3D)$,喷嘴的直径设置为 $1D$,速度入口高度

设置为 $2D$,通过 DesignModeler 软件仿真得到风场的几何模型如图 2 所示。

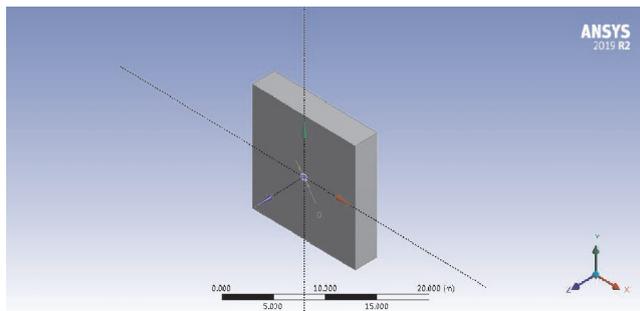


图 2 单个下击暴雨风场的几何模型

然而,在实际环境中,一般会有多个下击暴雨风场同时存在的情况,所以文中模拟了同时存在两个微下击暴雨风场时的三维模型。风场的几何模型选取尺寸为 $X(14D)\times Y(14D)\times Z(3D)$ 的三维长方体,两个下击暴雨的核心之间的距离设置为 $6D$,同样采用 DesignModeler 软件,仿真得到该风场的几何模型如图 3 所示。

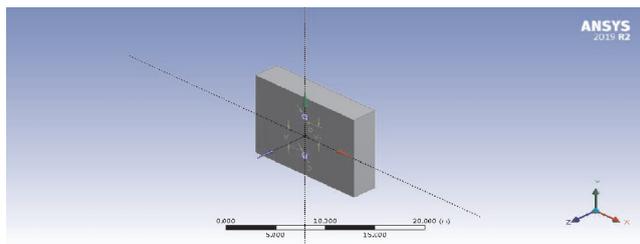


图 3 同时存在两个下击暴雨风场的几何模型

以单个下击暴雨为例,将风场几何模型以二维的形式展示如图 4 所示,可以更加直观地表现风场几何模型的尺寸。

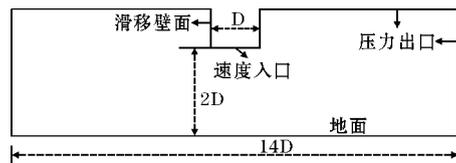


图 4 单个下击暴雨风场几何模型的二维显示

3.2 网格划分

将建好的风场几何模型导入 Meshing 软件中进行网格划分,网格单元形状选用三角形网格。由软件自动生成的网格一般都较为粗糙,不能满足求解过程中的精度。计算射流问题时,可以依据需求对网格进行部分加密,在初始网格第一次迭代计算完成、迭代曲线达到平稳后,加密网格。采用梯度自适应与等值自适应对网格进行部分加密。模拟了单个下击暴雨的三维风场模型与同时存在两个下击暴雨的三维风场模型,由于两个模型的网格划分图类似,所以只对后者的网格划分图进行了显示,如图 5 所示。

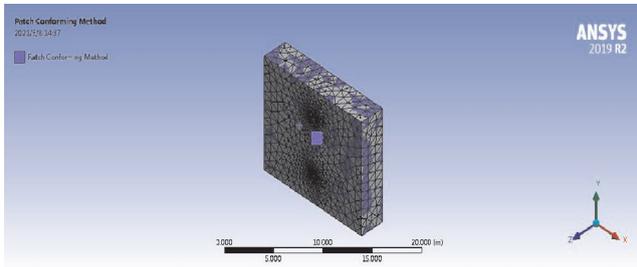


图5 同时存在两个下击暴流风场几何模型的网格划分

4 数值参数选择及风场仿真

将划分好的网格导入 fluent 软件中,选择合适的模型,并同时设置计算求解过程中用到的基本参数。选择基于压力的求解器,湍流模型选用了 RNG $k-\varepsilon$ 模型,RNG $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\varepsilon$ 模型在形式上较为相近,但在计算功能方面做了优化^[15]。

标准 $k-\varepsilon$ 模型是通过计算湍动能(k)与耗散率(ε)方程,得到 k, ε 的解,再根据 k, ε 的值计算得到湍流粘度,然后利用 Boussinesq 假设从而获得雷诺应力的值,基于标准 $k-\varepsilon$ 模型,RNG $k-\varepsilon$ 模型主要优化了以下几点:(1)在耗散率(ε)方程中增添了一个附加项,可以在求解一些速度梯度比较大的流场时,使得计算精度更好;(2)将旋转效应也纳入计算影响因子,以此可以提高计算强旋转流动的精度;(3)在标准 $k-\varepsilon$ 模型仅用户定义的常数的基础上,增加了计算湍流 Prandtl 数的解析公式;(4)可以用于求解低雷诺数效应。在求解计算过程中不需要考虑能量方程,压力场和速度场的耦合方程选择 SIMPLEC 算法进行求解,SIMPLEC 算法是在 SIMPLE 算法的基础上优化了通量修正方法,使得计算的收敛速度更快,而且 SIMPLEC 算法具有更好的稳定性,可以在求解过程中适当放大亚松弛因子。雷诺应力、动量、耗散率、湍动能的离散格式使用二阶迎风格式,其保留了泰勒级数的前两项,精度为二阶,较一阶迎风格式来说,其精度更高。喷嘴的入口速度设置为 30 m/s,湍流强度设为 1%,水力半径的值设为 1000,设置压力出口处的湍流强度为 1%,水力半径则设为 30。将参数初始化后,保持残差监视的值为默认值,设定计算迭代次数为 200 然后开始计算,计算结果趋于平稳即可,如图 6 所示。

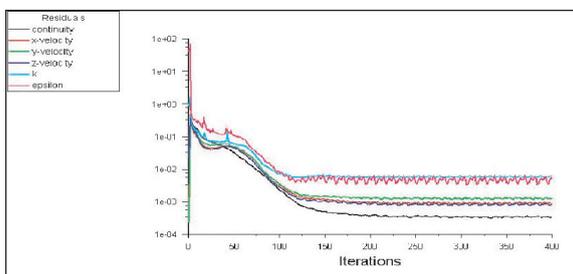


图6 单个微下击暴流的计算迭代完成的效果图

计算完成后,就可以对结果进行展示,设置箭头的大小与间隔,可以得到如图 7 所示的风场速度矢量图。

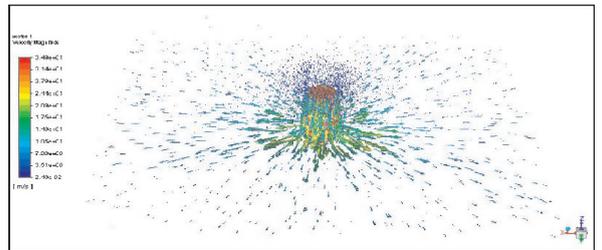


图7 单个下击暴流的速度矢量图

从图 7 可以看出,下沉气流在到达地面后向四周辐散,这与下击暴流的风场特征是符合的。同时存在两个下击暴流的模型的参数设置除速度设置与上文不一样外,其余参数选择均一样,将其中一个微下击暴流的入口初速度设为 25 m/s,另一个的入口初速度设为 35 m/s,设置计算迭代次数为 200 开始计算,使计算结果趋于平稳,如图 8 所示。

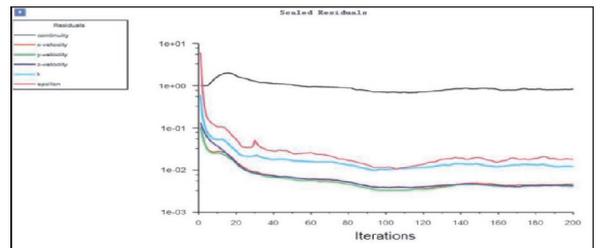


图8 同时存在两个微下击暴流的计算迭代完成的效果图

计算完成后,设置合适的箭头大小与间隔,可以得到同时存在两个微下击暴流的三维风场模型如图 9 所示。

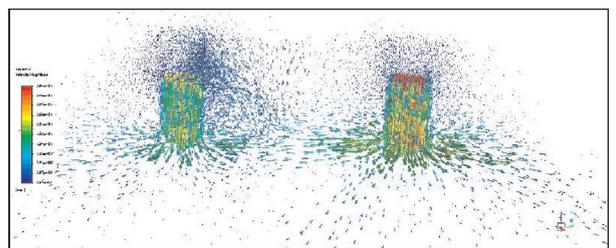


图9 同时存在两个微下击暴流的三维风场模型

由图 9 可以看出,两个微下击暴流的下沉气流在冲击地面后向四周散开,水平出流在整个流场的大约中心位置相遇,相遇位置便形成了与下冲气流方向相反的上升气流。如图,左边的下击暴流的入口初速度为 25 m/s,右边的入口初速度为 35 m/s,明显看出右边的风场速度大于左边的风场风速,右边的风场对左边的风场影响更大。

FLUENT 的后处理器的功能非常强大,通过在后处理器中建立合适的平面,然后根据不同的选项便可以得到速度云图(图 10)、压力云图(图 11)等一系列产品,用户可以根据自己的需求去选择合适的产品。

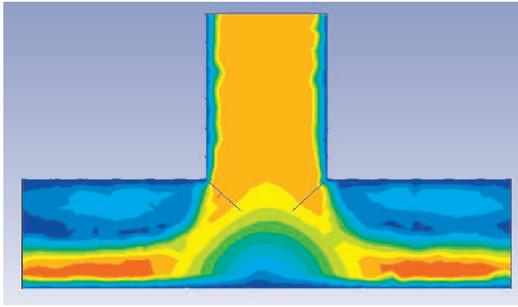


图10 速度云图

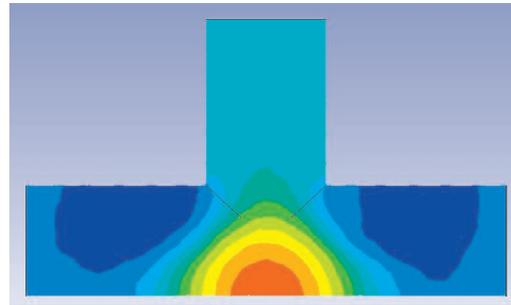


图11 压力云图

5 结束语

基于计算机流体建模,采用计算机流体力学建模软件(computational fluid dynamics,CFD)模拟了微下击暴流的三维风场模型,首先建立风场的几何模型并设定相应计算域,然后对模型进行网格划分,最后将网格导入FLUENT中进行处理,便可以得到微下击暴流的风场模型。在此基础上,模拟了两个入口初速度不同的微下击暴流风场存在的情况,可以更接近真实环境中的大气风场,模拟风场的特征与真实风场所表现的特征一致。通过FLUENT后处理器的简单操作,便能得到例如速度云图、压力云图等等一系列产品,为研究人员提供多种方式去深入研究下击暴流风场。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Fujita T T. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1990, 36(1):75-86.
- [3] Fujita T T. Microbursts as an aviation wind shear hazard. Aiaa Journal [C]. AIAA 19th AEROSPACE SCIENCES MEETING, 1981.
- [4] 张培昌. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,1988.
- [5] 陈延良. 现代运输机航空气象学[M]. 北京:气象出版社,1992:488-491.
- [6] W Forst. Simulation Flight Through JAWS Wind Shear [J]. Journal of Aircraft, 1984, 21(10):797-802.
- [7] Wingrove R, Bach R. Severe winds in the DFW microburst measured from two aircraft [J]. Guidance, Navigation and Control Conference. 1987, 28(3):498.
- [8] 葛成. 三维矢量场可视化方法研究[D]. 江苏:南京师范大学,2011.
- [9] 丁欣硕,焦楠. FLUENT 14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [10] Woodfield A A, Woods J F. Worldwide Experience of Wind Shear during 1981-1982 [C]. AGARD Flight Mechanics Panel Conference on 'Flight Mechanics System Design Lessons from Experience', 1983:347.
- [11] Vermeire B C, Orf L G, Savory E. Improved modelling of downburst outflows for wind engineering applications using a cooling source approach[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(8):801-814.
- [12] 王月明,乔雨轩,王楠楠,等. 国内CFD模拟在城市微气候中的应用综述[J/OL]. 中国城市林业. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5061.S.20210406.1717.004.html>, 2021-04-13:1-12.
- [13] 陶毅涵. 基于CFD的规则波中船舶波浪力模型研究[D]. 辽宁:大连海事大学,2014.
- [14] Stelling P, Foster I, Kesselman C, et al. A fault detection service for wide area distributed computations[J]. Cluster Computing, 1998, 2(2):117-128.
- [15] 刘斌. Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2019.

Three-dimensional Wind Field Modeling of Downburst based on FLUENT

LI Jing¹, HE Jiaoyang¹, LI Tianjia¹, WANG Haijiang²

(1. Xinjiang Hotan Prefecture Meteorological Bureau, Hotan 848000, China; 2. College of electronic engineering, Chengdu University of information technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The micro-burst is a kind of local catastrophic wind with strong suddenness and great destructive power. In order to avoid and reduce the disasters caused by it, this paper studied the characteristics of the wind field structure of the micro-burst. The computer fluid dynamics modeling software CFD (Computational fluid dynamics) established a three-dimensional model that can reflect the internal characteristics of the wind field. Based on the three-dimensional wind field model of a single micro-burst, this paper proposed and simulated the three-dimensional wind field model of two micro-bursts with different initial velocities at the entrance, meanwhile this paper studied their mutual influence. Through the post-processor of the FLUENT software, product such as speed cloud graph and pressure cloud graph are obtained.

Keywords: microburst; wind field structure; FLUENT