

龙卷风风场的数值模拟研究

王蒙恩¹, 曹曙阳², 操金鑫²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于同济大学研制的龙卷风物理模拟装置, 运用数值模拟方法构建了物理模拟器的数值计算模型, 并通过对比龙卷风风场的物理试验模拟结果和现场实测结果, 验证了数值计算模型的可行性。在此验证基础上, 研究了 3 种不同涡流比条件下的龙卷风风场结构, 对比了不同涡流比条件下龙卷风的三维风场速度(切向速度、径向速度和轴向速度)分布形态、风压分布、龙卷风涡核半径和气流脉动特性。研究结果表明: 随着涡流比的增大, 龙卷风风场最大切向风速逐渐增大, 涡核中心气压降明显降低, 涡核半径随之变大, 涡核中心附近切向风速的标准差变小; 涡流比的增大使龙卷风单涡核逐渐破碎, 发展到双涡核。

关键词: 龙卷风; 计算流体动力学; 大涡模拟; 涡流比; 流场结构

中图分类号: O355

文献标志码: A

Numerical Study of Tornado-Like Flow

WANG Meng¹, CAO Shuyang², CAO Jinxin²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A numerical computational fluid dynamics (CFD) model to simulate tornado-like vortices was proposed. The tornado-generation mechanism was similar to that of the physical generator developed at Tongji University. The feasibility of this numerical model was verified by comparing the simulation results associated with tornado-like vortices with the experimental and field observation data. Furthermore, the three wind velocity components at tangential, radial and axial directions, wind pressures, vortex radii and turbulence characteristics of tornado-like vortices at three swirl ratios were investigated. The result shows that, with the increase of swirl ratio, the maximum tangential velocity and the radius of vortex core increase when the pressure and the standard deviation of tangential velocity

around the tornado-like vortex center decrease. In addition, the single tornado-like vortex gradually breaks down and develops into a double-core structure.

Key words: tornado; computational fluid dynamics (CFD); large eddy simulation; swirl ratio; flow structure

联合国防灾署的统计资料表明我国是世界上自然灾害经济损失最严重的 3 个国家之一, 风灾因发生频率高且影响范围大成为防灾减灾工作的重点对象之一^[1]。龙卷风的机理区别于常规直线型大气边界层强风, 具有旋转剧烈、突发性强、风速变化剧烈等特点, 表现出强烈的三维流场特性。相对于其他风致灾害, 龙卷风的发生将会导致更加严重的风灾。近年来, 在我国东部和南部地区出现过多次较为严重的龙卷风事件, 导致众多低矮民居、输电线塔和工业厂房等发生较为严重的破坏甚至倒塌^[2]。因此, 有必要明确龙卷风的近地面风场结构, 并在重要建筑结构的抗风设计考虑龙卷风的荷载效应。

自 20 世纪 90 年代始, 移动多普勒雷达被广泛运用于监测龙卷风。1998 年 5 月 30 日, 美国南达科他州发生了至少两起强龙卷风, 其中经过 Spencer 的一起龙卷风经 DOW(doppler on wheels)移动雷达观测得到了珍贵的风速数据, 龙卷风中心非常靠近 DOW-3 观测点^[3]。但由于实测龙卷风风险较大, 机会极少, 且雷达无法准确观测到近地面的风场数据^[4], 因而目前的研究多以物理试验研究和数值模拟研究为主。

Ying 等^[5]建立了世界上第一台可用于龙卷风旋涡模拟的设备, 并研究了龙卷风旋涡内的切向速度和径向速度的剖面。基于 Ying 等^[5]的理念, Ward^[6]在模拟器顶部安装了控制风机来产生上升气流, 开发出了应用最广的 Ward 型龙卷风模拟装

收稿日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(51878503, 51878504)

第一作者: 王蒙恩(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁与结构抗风。E-mail: meng_wang@tongji.edu.cn

通信作者: 曹曙阳(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁与结构抗风。E-mail: shuyang@tongji.edu.cn

置,此模拟器考虑了径向入流与切向环流的比例引起的龙卷风单涡结构变化,并预测了多涡结构的可能,较好地重现了实际龙卷风的结构.基于 Ward 型模拟系统,较多学者开展了对龙卷风旋涡结构的物理试验研究^[7-11].美国爱荷华州立大学的 Haan 等^[12]基于 Ward 型模拟器的设计理念,将导流板设置在模拟器的顶部,利用排风扇产生上升气流,设计出一种新型龙卷风模拟器,该模拟器还能实现模拟现实中龙卷风的移动效应. Hangan 等^[13]研制了一种新型的三维风洞实验室 WindEEE(wind engineering, energy and environment) Dome,该设备可用于模拟不同类型的风场,诸如龙卷风、下击暴流和阵风锋面等.为了研究龙卷风对桥梁、建筑结构的作用,同济大学也建立了新型龙卷风模拟器^[14].该模拟器基于 Haan 等^[12]的设计原理建造,可以方便地研究龙卷风风场特性以及对结构的荷载效应.

土木结构风荷载和效应的数值模拟及数值风洞是结构风工程研究中具有战略意义的发展方向,也是当前国际风工程研究的一个热点^[15-16]. Diamond 等^[17]通过数值模拟的方法研究了粗糙度对龙卷风涡结构的影响,发现粗糙度会加强风速但会减小涡流比. Lewellen 等^[18]采用大涡模拟方法研究了相关参数对龙卷风风场的影响,发现即使是相同涡流比的情况下,龙卷风涡结构特性也会因诸多参数的不同而不同,主要包括粗糙度、龙卷风移动速度、入流边界情况等. Lewellen 等^[19]通过数值模拟的方法研究了涡流比及粗糙度对风场的影响,发现增加入流会减小涡流比. Ishihara 等^[20]采用大涡模拟方法研究了龙卷风涡结构特性,其选用了 Ward 型龙卷风模拟器原型,并成功模拟出单涡及双涡类龙卷风涡结构.李雪^[21]基于 Ward 型龙卷风模拟器的数值模型生成了与台风涡类似的涡结构.徐枫等^[22]建立了龙卷风发生装置的数值计算模型,对具有单涡结构的龙卷风风场进行了研究.

本文采用数值模拟的研究手段,运用大涡模拟方法模拟了 3 种不同涡流比条件下的龙卷风风场结构.运用物理试验模拟数据和现场实测龙卷风风场数据验证了数值模拟的可行性.研究了龙卷风三维风场速度在不同方向上的分布、龙卷风风压分布、龙卷风涡核半径和龙卷风气流的脉动特性,探讨了涡流比对龙卷风风场的影响效应.

1 研究方法与数值模型

1.1 控制方程

大涡模拟首先在湍流控制方程中将小尺度涡滤

掉,其次通过考虑附加应力项来再现湍流流场.本文运用开源计算软件 OpenFOAM,采用大涡模拟方法,亚格子模型选用标准 Smagorinsky 模型,控制方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} + 2\nu_e \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

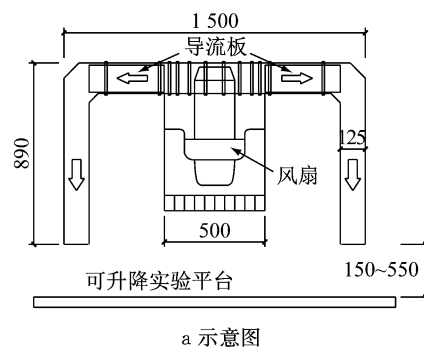
$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

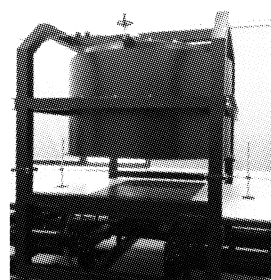
式(1)~(5)中:带有上划线的量为滤波后的场变量; x_i, x_j 和 x_k 分别为三维方向; u_i 为 x_i 方向的速度; t 为时间; p 为压强; τ_{ij} 为亚格子应力; Re 为雷诺数; δ_{ij} 为克罗内克符号,当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$,当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$; \bar{S}_{ij} 为应变速度张量; ν_e 为湍流黏性系数; C_s 为 Smagorinsky 常数,本文取 0.1; Δ 表示大涡模拟的滤波宽度.

1.2 数值模型与边界条件

同济大学龙卷风模拟器是国内首个 ISU (Iowa State University) 型龙卷风模拟器,如图 1 所示.整个系统由 3 个同轴圆状筒构成,风机和导流板放置在模拟器顶部,这样气流经风机吸收,通过导流板和



a 示意图



b 实体图

图 1 同济大学龙卷风模拟器(单位:mm)

Fig.1 Tornado vortex simulator in Tongji University(unit:mm)

外围圆筒,在升降平台与蜂窝网间形成龙卷风涡旋. 此类模拟器为回流式风洞,试验平台为开口式,可以更方便地研究龙卷风动力特性以及对结构的影响.

基于同济大学龙卷风模拟器,建立数值模型,如图 2 所示. 数值模型尺寸与物理模拟器尺寸一致.

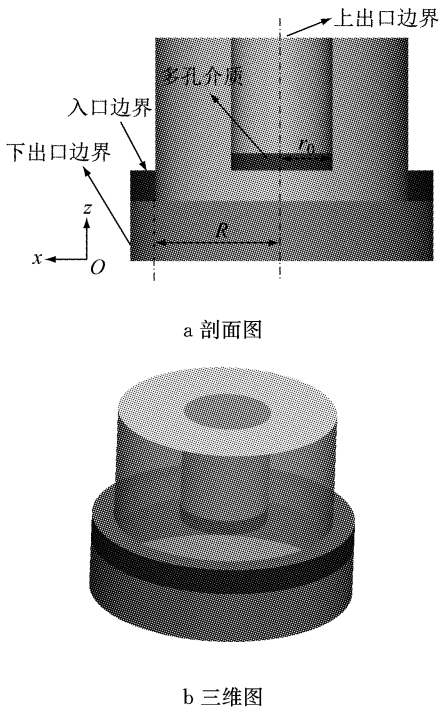


图 2 数值计算模型

Fig.2 Numerical simulation model

数值计算模型网格划分如图 3 所示. 在竖直方向,近地面风场特性为研究重点,因此在地面附近的网格最为精细,竖直方向网格尺寸以小于 1.2 的比例增加. 在水平方向,涡核中心和涡核半径附近的流场特性也是研究重点,因此中心网格最为精细,水平方向网格也以小于 1.2 的比例增大,网格总数为 120 万左右.

边界条件设置见表 1. 其中,入口边界给定初速度,由轴向速度和切向速度组成. 轴向速度 $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,切向速度不定,通过改变切向速度大小可得到不同的涡流比结果. 上出口边界条件压力为定值 0.

表 1 边界条件设置汇总

Tab.1 Setup of boundary conditions

边界名	速度边界条件	压力边界条件
入口边界	定值	零梯度
上出口边界	零梯度	定值
下出口边界	出入口混合	零梯度
其他边界	无滑移边界	无滑移边界

注:出入口混合边界物理意义为当该边界的速度方向朝外时,速度定值为零;当该边界的速度方向朝内时,速度边界为零梯度.

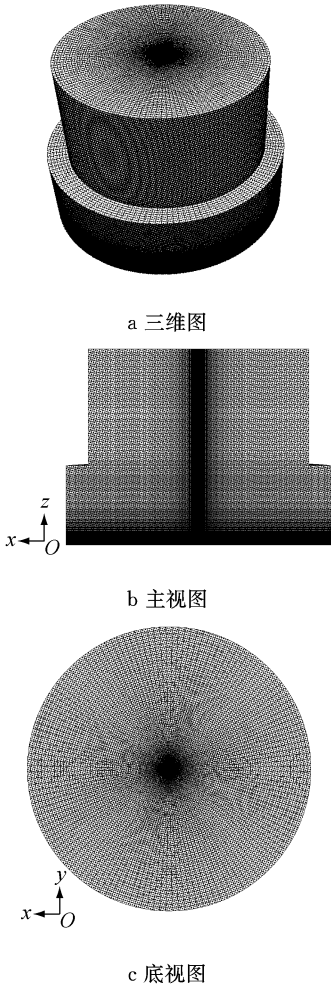


图 3 数值计算模型网格

Fig.3 Mesh of numerical simulation model

1.3 求解格式

本文采用有限体积法进行计算,差分格式采用二阶中心差分,采用 PIMPLE 算法. 计算到 $t=7\text{ s}$ 时流场已经稳定. 本文所有算例均取 $t=10\sim30\text{ s}$ 时间间隔内的数据进行统计分析.

2 参数定义与试验工况

龙卷风风场特性受诸多因素的影响,主要有:涡流比、高宽比、径向雷诺数等. 其中,涡流比是影响龙卷风风场特性最重要的参数^[13],随着涡流比的增大,流场从层流过渡为湍流,从单涡核结构过渡到双涡、多涡结构. 涡流比的定义如下:

$$S = \frac{\Gamma}{2Qa} = \frac{2\pi R \int_0^H U_t dh}{2Qa} \tag{6}$$

式中: Γ 为环向流量; Q 为单位时间内通过模拟器的气流流量; a 为高宽比, $a=H/r_0$; H 为入流高度,本文设置为 0.2 m ; r_0 为上升气流半径,本文设置为

0.25 m; R 为模拟器入流半径, 本文设置为 0.625 m; U_t 为平均切向速度; h 为相对地面的高度。

径向雷诺数的定义如下:

$$Re = \frac{Q}{H\nu} \quad (7)$$

式中: ν 为空气运动黏度, 取值为 $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

本文主要研究了 3 种不同涡流比条件下的龙卷风风场特性。算例参数汇总如表 2 所示。表中, $U_{t \max}$ 为流场中最大平均切向速度; h_{\max} 为 $U_{t \max}$ 发生处平面的高度; R_{\max} 为 $U_{t \max}$ 发生处相对涡核中心的距离, 即 h_{\max} 高度处的涡核半径。

表 2 数值模拟算例参数

Tab.2 Parameters of numerical simulation cases					
算例	S	Re	$U_{t \max} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	R_{\max} / m	h_{\max} / m
算例 1	0.235	1.82×10^5	3.074	0.023	0.058
算例 2	0.546	1.82×10^5	4.917	0.043	0.028
算例 3	0.768	1.82×10^5	5.120	0.070	0.031

3 计算结果分析

3.1 数值模拟结果验证

将数值模拟结果与物理试验结果和现场实测结果进行对比分析, 以验证数值模拟的可行性。龙卷风风场可以用三维速度和气压降进行描述。三维速度分量中切向速度为最主要的分量, 气压降往往是造成结构破坏的最主要因素。因此, 数值结果的验证主要针对切向速度分量和气压降进行分析。

图 4 为 $h=0.5h_{\max}$ 高度平面的数值模拟龙卷风切向速度沿径向的分布 ($S=0.235$, $S=0.546$ 和 $S=0.768$) 与物理试验结果^[23] ($S=0.74$)、现场实测结果^[13] (Spencer 龙卷风和 Muhall 龙卷风) 和理论

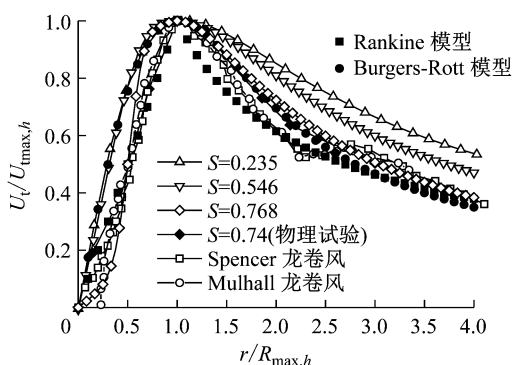


图 4 量纲一化平均切向速度沿径向分布的对比

Fig.4 Comparison of normalized mean tangential velocity as a function of radial distance

模型^[24] (Rankine 模型和 Burgers-Rott 模型) 的对比。其中, r 为相对涡核中心的距离。图中纵、横坐标分别基于当前高度平面的最大切向速度 ($U_{t \max, h}$) 和对应的涡核半径 ($R_{\max, h}$) 进行了量纲一化处理。图示表明, 通过数值模拟得到的龙卷风切向速度分布与通过物理试验以及现场实测得到的结果具有一定的 consistency。

图 5 为不同研究方法之间关于风压分布的对比。其中, p 为平均风压, $|p_{\min}|$ 为流场平均风压绝对值的最大值, $r_{0.5 p_{\min}}$ 为 0.5 倍 p_{\min} 发生位置相对涡核中心的距离。根据 Karstens 等^[25] 的现场实测结果, Webb 龙卷风的涡核形态不明确, Tipton 龙卷风为双涡核龙卷风。根据图 5a, 数值模拟低涡流比 ($S=0.235$) 工况的计算结果和物理试验^[23] ($S=0.23$) 的研究结果、Webb 龙卷风实测数据吻合较好。根据图 5b, 数值模拟高涡流比 ($S=0.546$) 工况的计算结果和物理试验^[23] ($S=0.52$) 的研究结果、Tipton 龙卷风实测数据吻合较好。

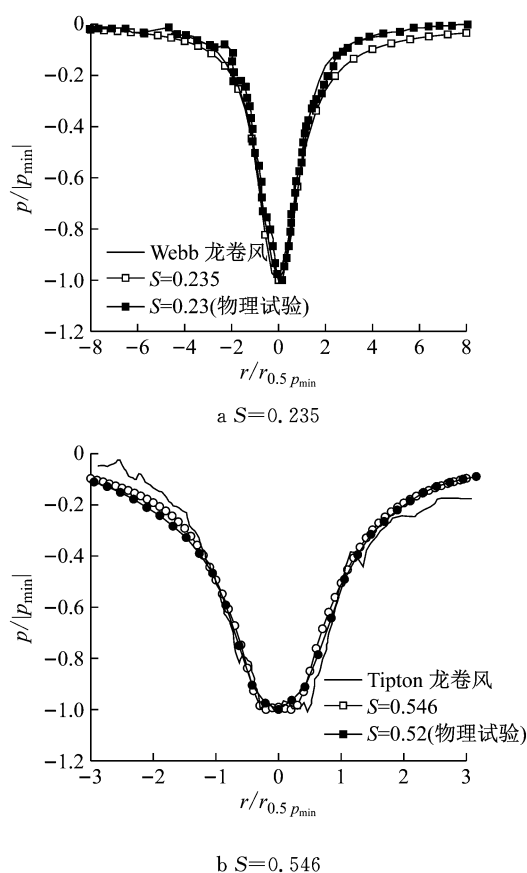


图 5 量纲一化平均风压沿径向分布的对比

Fig.5 Comparison of normalized mean pressure deficit as a function of radial distance

通过以上关于切向速度分布和气压降分布的对比分析, 验证了数值模拟龙卷风的可行性。

3.2 流场平均特性

图 6 给出了量纲一化平均切向速度沿径向的分布. 其中纵、横坐标分别对 $U_{t \max}$ 和 R_{\max} 进行了量纲一化处理. 可以发现, 不同高度平面的切向速度分布形式存在差异. 在涡核半径内部, 高度越高, 切向速度增长率越小; 在涡核半径外部, 高度越高, 切向速度衰减率越小. 随着高度的增加, 涡核半径逐渐变大, 不同高度平面内最大切向速度先增大后减小. 不同涡流比条件下的平均切向速度分布大致相同.

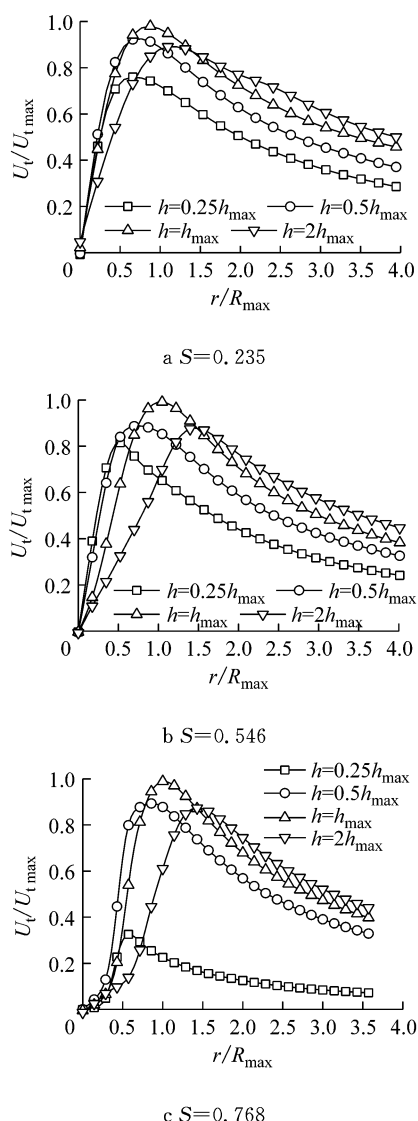


图 6 不同高度量纲一化平均切向速度沿径向的分布
Fig.6 Normalized mean tangential velocity as a function of radial distance at different heights

图 7 给出了量纲一化平均切向速度沿轴向的分布. 低涡流比 ($S=0.235$) 条件下, 涡核半径内外的切向速度分布与大气边界层风剖面接近. 高涡流比 ($S=0.546$ 、 $S=0.768$) 条件下, 涡核半径内部包括涡核半径位置, 切向速度的轴向剖面均呈现一定的速度

剪切特性, 即最大切向速度发生在近地面高度, 该现象与大气边界层风剖面存在较大差异. 涡核半径外部, 切向速度剖面与大气边界层风剖面较为接近.

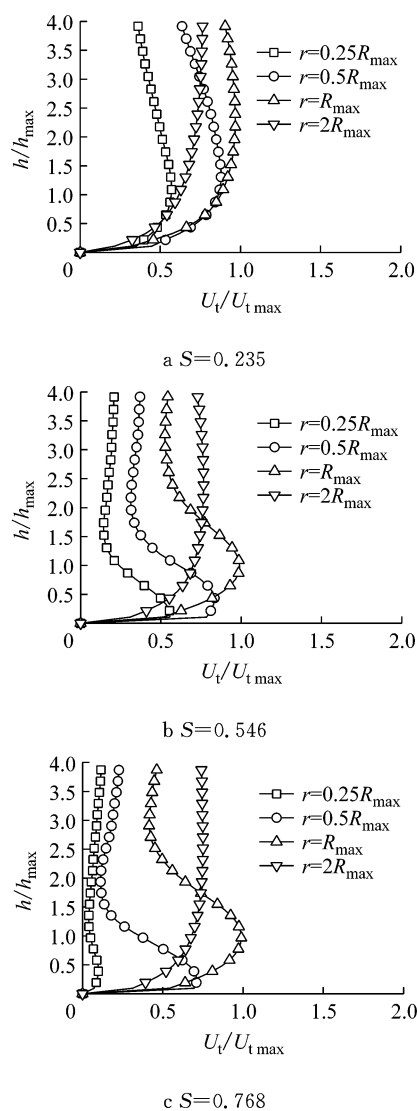


图 7 不同径向位置量纲一化平均切向速度沿轴向的分布
Fig.7 Normalized mean tangential velocity as a function of axial distance at different radial locations

图 8 为量纲一化平均径向速度沿径向的分布情况. 其中, U_r 为平均径向速度. 低涡流比 $S=0.235$ 工况下, 径向速度全为负, 且沿径向变化较小, 说明龙卷风气流全部向涡核中心汇集. 结合图 9, 随着高度的增加, 径向速度先增大后减小, 最大径向速度发生在近地面, 达到 $0.5U_{t \max}$. 涡流比 $S=0.546$ 工况下, 近地面高度的径向速度沿径向先增大后减小, 较高处, 径向速度出现正值, 说明龙卷风气流在较高处出现向外流的现象; 沿高度方向, 如图 9b 所示, 涡核半径处径向速度先沿负向增至最大, 随后沿正向增至最大. 涡流比 $S=0.768$ 工况的径向速度分布与 $S=0.546$ 工况类似, 但涡核中心附近径向速度减小.

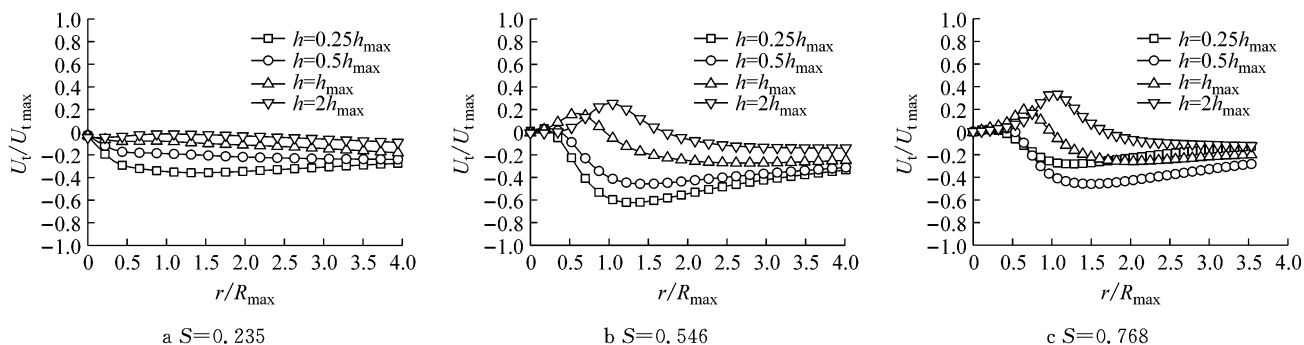


图 8 不同高度量纲一化平均径向速度沿径向分布

Fig.8 Normalized mean radial velocity as a function of radial distance at different heights

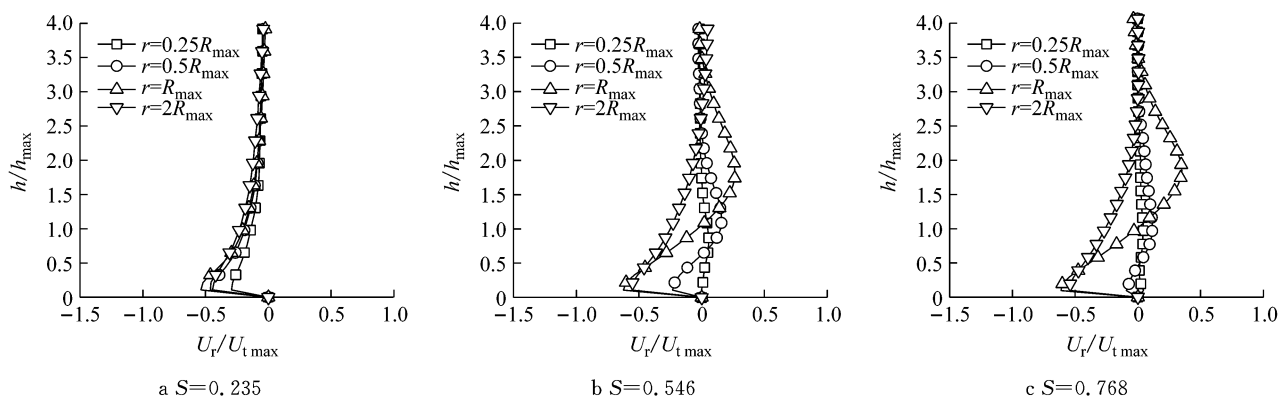


图 9 不同径向位置量纲一化平均径向速度沿轴向分布

Fig.9 Normalized mean radial velocity as a function of axial distance at different radial locations

图 10 为量纲一化平均轴向速度沿径向的分布. 其中, U_v 为平均轴向速度. 涡流比 $S=0.235$ 条件下, 轴向速度在涡核中心附近出现最大值, 随着与涡核中心的距离加大, 轴向速度逐渐减小. 且从图 11a 可以发现, 轴向速度沿轴向在涡核中心附近先增大后减小, 远离涡核中心处, 轴向速度较小. 涡流比 S

$=0.546$ 条件下, 轴向速度在涡核中心附近出现负值, 说明龙卷风气流出现向下的流动, 沿着径向, 不同高度处的轴向速度在 $0.5R_{max}$ 附近出现极大值. 在 $S=0.768$ 工况下, 近地面高度 ($h=0.25h_{max}$) 和涡核中心附近 ($r=0.25R_{max}$), 轴向速度接近于 0.

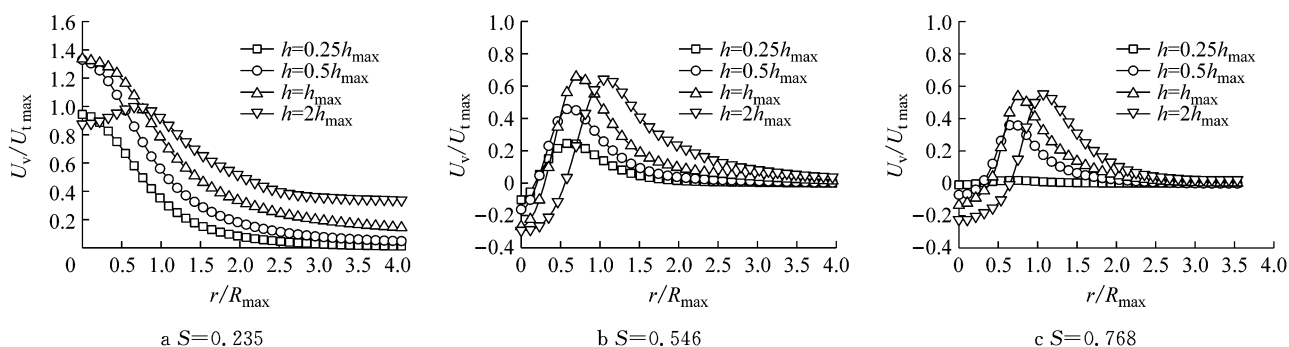


图 10 不同高度量纲一化平均轴向速度沿径向分布

Fig.10 Normalized mean axial velocity as a function of radial distance at different heights

龙卷风中心极强的负压是导致建筑结构破坏的重要原因之一. 图 12 为不同涡流比条件下风压沿径向的分布. 其中, 纵坐标为数值计算得到的平均压力 p 减去入口边界的平均压力 p_{ref} . 在 $S=0.235$ 工况下, 涡核中心出现负压极值. 在 $S=0.546$ 工况下, 负

压在涡核中心附近未出现明显的极值, 但涡核中心气压降有较大幅度增大. 涡流比 $S=0.768$ 工况相比 $S=0.546$ 工况, 涡核中心气压降减小, 负压在涡核中心两侧分别出现极值, 说明龙卷风的单涡结构可能发生破碎, 逐渐发展成双涡核结构.

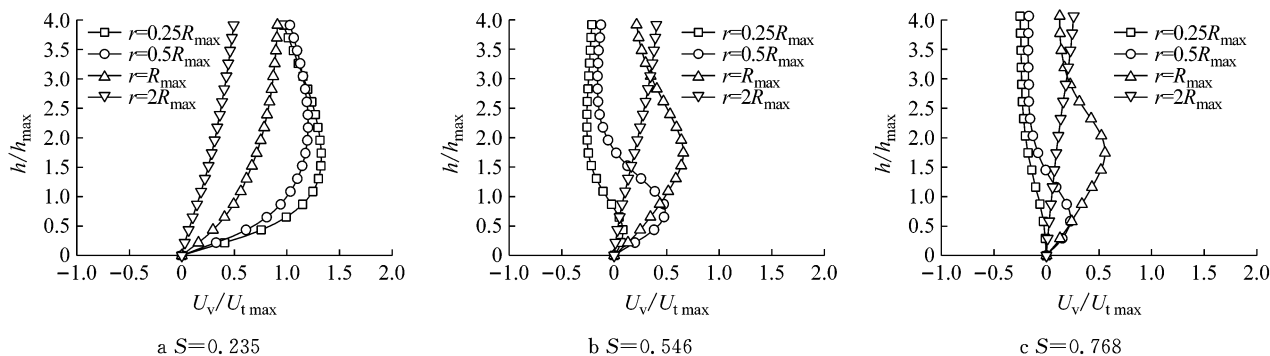


图 11 不同径向位置量纲一化平均轴向速度沿轴向的分布

Fig. 11 Normalized mean axial velocity as a function of axial distance at different radial locations

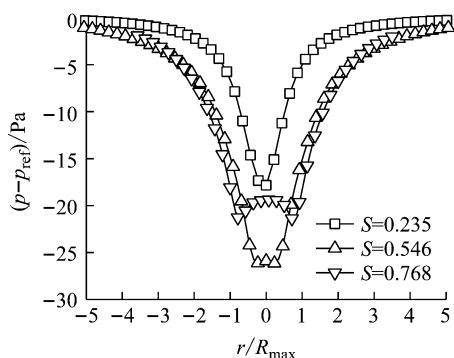


图 12 不同涡流比工况平均风压沿径向的分布

Fig. 12 Mean wind pressures of different swirl ratio cases as a function of radial distance

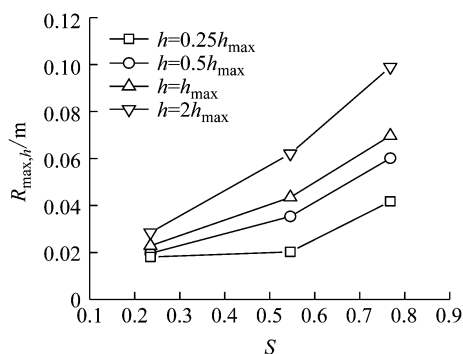


图 13 不同高度涡核半径随涡流比的改变

Fig. 13 Vortex core radius as a function of swirl ratio at different heights

涡核半径是表述龙卷风尺寸的一个重要参数.

图 13 为不同高度平面涡核半径($R_{\max,h}$)随涡流比的改变. 可以发现, 涡核半径在不同高度平面均随涡流比的增大而增大. 龙卷风的涡核半径随着高度的增高而增大, 但在不同涡流比条件下的增大趋势不同.

3.3 流场脉动特性

龙卷风气流在涡核内部表现出较强的脉动特性. 图 14 为切向速度标准差沿径向的分布. 其中,

$U_{t,\text{std}}$ 为切向速度标准差. 涡流比 $S=0.235$ 条件下, 涡核中心处 $U_{t,\text{std}}$ 最大, 近地面高度的 $U_{t,\text{std}}$ 大于较高高度处. 涡流比 $S=0.546$ 和 $S=0.768$ 条件下, $U_{t,\text{std}}$ 减小, 极值点偏离了涡核中心. 图 15 为用测量点平均切向速度 $U_{t,\text{loc}}$ 量纲一化处理的切向速度标准差沿轴向的分布. 量纲一化切向速度标准差随着远离涡核中心而逐渐减小. 随着涡流比的提高, 切向速度脉动最大的点出现在最大切向速度发生的高度附近.

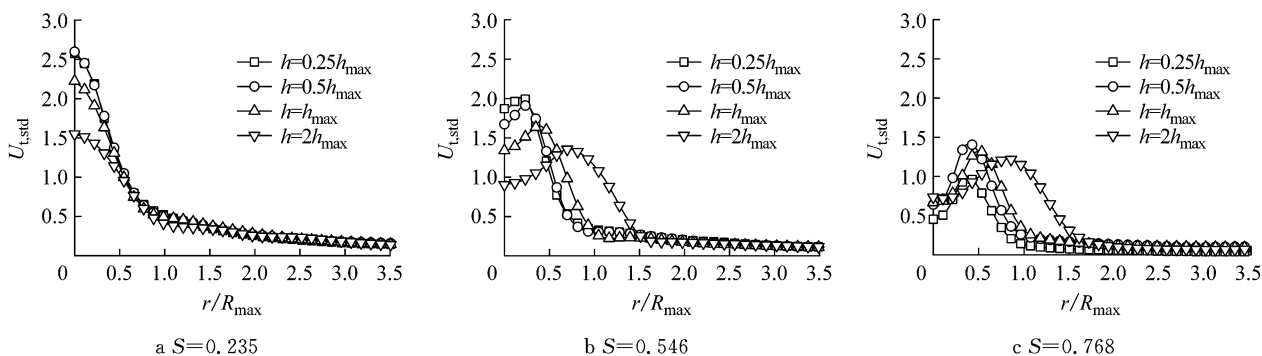


图 14 不同高度切向速度标准差沿径向的分布

Fig. 14 Standard deviation of tangential velocity as a function of radial distance at different heights

图 16 为量纲一化处理的风压标准差沿径向的分布. 其中, σ_p 为风压标准差. 涡流比 $S=0.235$ 条件

下, 风压标准差在涡核中心出现极大值, 说明涡核中心附近压力脉动特性显著. 随着涡流比的增大, 涡核

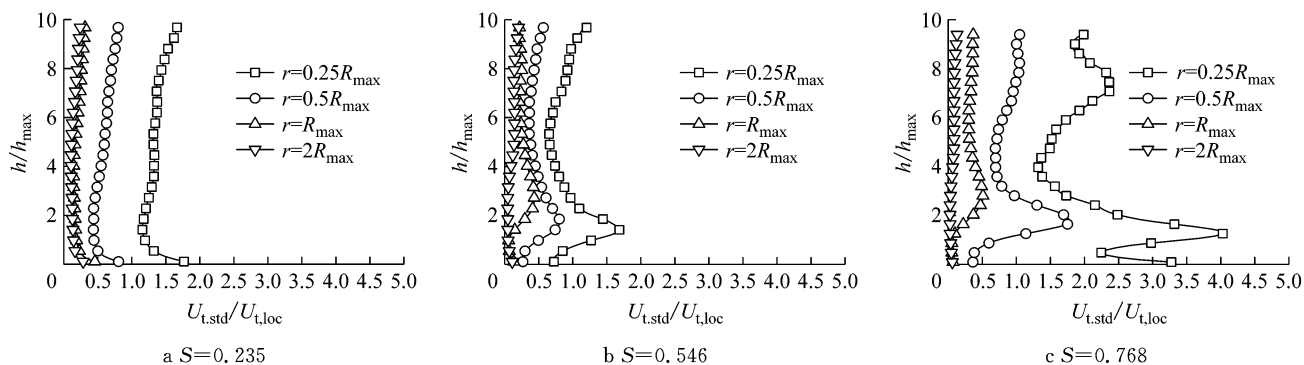


图 15 不同径向位置量纲一化切向速度标准差沿轴向的分布

Fig. 15 Normalized standard deviation of tangential velocity as a function of axial distance at different radial locations

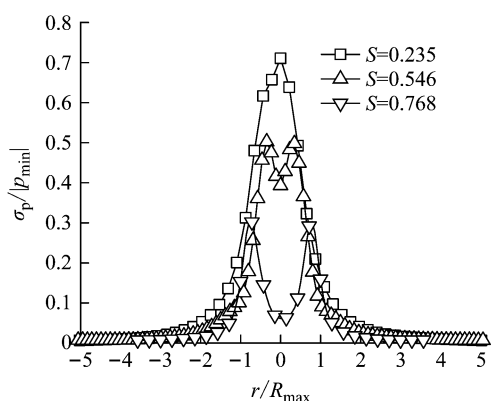


图 16 不同涡流比工况量纲一化风压标准差沿径向的分布

Fig. 16 Normalized standard deviation of wind pressures of different swirl ratio cases as a function of radial distance

中心风压脉动特性减弱,但在涡核中心两侧出现新的极值.在涡流比 $S=0.768$ 条件下,涡核中心两侧出现明显的极大值.说明,随着涡流比的增大,龙卷风单旋涡破碎,逐渐演变为双涡形态.

4 结论

以同济大学龙卷风模拟器为原型,运用计算流体动力学方法构建了龙卷风风场的数值计算模型.通过与物理试验结果和实测结果的对比,验证了数值模拟的可行性.以涡流比为重点研究参数,探究了 3 个不同涡流比条件下的龙卷风风场结构.主要结论如下:

(1) 在涡核半径内,平均切向速度随着距涡核中心距离的增加逐渐增大;在涡核半径外,平均切向速度随着距离的增加而减小.随着涡流比的增大,龙卷风风场内的最大平均切向速度变大;涡核中心附近位置的平均切向速度轴向分布出现了明显的速度

剪切现象.

(2) 随着涡流比的增大,4 倍涡核半径范围内的平均径向速度出现了正值,平均轴向速度出现负值;即随着涡流比的增大,原来沿径向向内流动、沿轴向向上流动的龙卷风气流发生改变,出现了沿径向向外、沿轴向向下流动的现象.

(3) 龙卷风气流在涡核中心出现明显的气压降,随着涡流比增大,涡核中心负压极值先逐渐消失,而后在涡核中心两侧出现新的负压极值;涡核半径随着离地面高度的增大而逐渐变大,符合真实龙卷风旋涡的形态.

(4) 龙卷风涡核内部的速度和风压均表现出了强烈脉动特性.涡核中心附近切向速度脉动成分极大.随着涡流比增加,切向风速标准差极值点偏离原涡核中心.

(5) 随着龙卷风涡流比的增大,龙卷风单涡核结构发生破碎,逐渐发展为双涡核结构.

参考文献:

- [1] CAO S, WANG J. Statistical summary and case studies of strong wind damage in China [J]. Journal of Disaster Research, 2013, 8(6):1096.
- [2] XUE M, ZHAO K, WANG M, *et al.* Recent significant tornadoes in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11):1209.
- [3] ALEXANDER C R, WURMAN J. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, Storm. part I: the structural evolution and environment of the tornadoes [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133 (1):72.
- [4] LE K, HAAN F L, GALLUS W A, *et al.* CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements [J]. Wind & Structures An International Journal, 2008, 11 (2):75.
- [5] YING S J, CHANG C C. Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,

- 1970, 27 (1):3.
- [6] WARD N B. The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29 (6): 1194.
- [7] CHURCH C R, SNOW J T, BAKER G L, *et al.* Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: a laboratory investigation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1979, 36(9): 1755.
- [8] LUND D E, SNOW J T. Laser doppler velocimeter measurements in tornadolike vortices [J]. *Washington Dc American Geophysical Union Geophysical Monograph*, 1993, 79: 297.
- [9] MISHRA A R, JAMES D L, LETCHFORD C W. Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, part A: flow field characterization [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8):1243.
- [10] MISHRA A R, JAMES D L, LETCHFORD C W. Physical simulation of a single-celled tornado-like vortex, part B: wind loading on a cubical model[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8):1258.
- [11] CLELAND J D. Laboratory measurements of velocity profiles in simulated tornado-like vortices [J]. *Journal of Undergraduate Research in Physics*, 2001, 18(2): 51.
- [12] HAAN J F L, SARKAR P P, GALLUS W A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30 (4): 1146.
- [13] HANGAN H, REFAN M, JUBAYER C, *et al.* Novel techniques in wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2017, 171:12.
- [14] 王锦, 周强, 曹曙阳, 等. 龙卷风风场的试验模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(11):1654.
WANG Jin, ZHOU Qiang, CAO Shuyang, *et al.* Physical study on tornado-like flow based on tornado vortex simulator[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42 (11):1654.
- [15] 顾明. 土木结构抗风研究进展及基础科学问题——建筑、环境与土木工程 II [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
GU Ming. The research process and basic scientific issues about civil structure-architectural, environmental & civil engineering II [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [16] 罗凯文, 杨易, 谢壮宁. 基于 $k-\epsilon$ 模型模拟平衡态大气边界层的比较研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(2):21.
LUO Kaiwen, YANG Yi, XIE Zhuangning. A comparative study on the simulation of neutral atmospheric boundary layer based on the $k-\epsilon$ turbulence model[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2):21.
- [17] DIAMOND C J, WILKINS E M. Translation effects on simulated tornadoes [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1984, 41(17): 2574.
- [18] LEWELLEN W S, LEWELLEN D C, SYKES R I. Large-eddy simulation of a tornado's interaction with the surface [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(5): 581.
- [19] LEWELLEN D C, LEWELLEN W S, XIA J. The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(4): 527.
- [20] ISHIHARA T, OH S, TOKUYAMA Y. Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4):239.
- [21] 李雪. 基于数值模拟系统的台风涡结构模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LI Yue. Simulation of vortex structures of typhoons with numerical simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [22] 徐枫, 肖仪清, 李波, 等. 龙卷风风场特性的 CFD 数值模拟 [J]. *空气动力学报*, 2013, 31(3):350.
XU Feng, XIAO Yiqing, LI Bo, *et al.* CFD numerical simulation of tornado wind field characteristics [J]. *ACTA Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(3): 350.
- [23] WANG J, CAO S, PANG W, *et al.* Experimental study on effects of ground roughness on flow characteristics of tornado-like vortices [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 162 (2):319.
- [24] TANG Z, FENG C, WU L, *et al.* Characteristics of tornado-like vortices simulated in a large-scale Ward-type simulator[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017(9):1.
- [25] KARSTENS C D, SAMARAS T M, LEE B D, *et al.* Near-Ground pressure and wind measurements in tornadoes [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(7): 2570.