

龙卷风风场的试验模拟

王 锦, 周 强, 曹曙阳, 操金鑫

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为试验研究龙卷风气流特性及其作用于结构上的风荷载, 建立了新型龙卷风模拟器(TVS). 该模拟器主要由顶部悬吊的控制风机、环状管道以及导流板组成; 并设置水平轨道, 使其可以 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的最大速度在水平方向移动. 基于该龙卷风模拟器, 试验中采用眼镜蛇探头测试了涡流比从 0.11 到 0.54(导流板角度 $20^\circ \sim 60^\circ$) 情况下的龙卷风风场, 并与 1998 年 5 月 30 日发生在南达科他州 Spencer 的龙卷风, 1999 年 5 月 3 日发生在俄克拉荷马州 Mulhall 的龙卷风以及 2003 年 6 月 24 日发生在南达科他州 Manchester 的龙卷风多普勒雷达观测数据进行了比较. 结果表明切向速度和静压均符合真实龙卷风分布. 由此说明该模拟器可产生稳定的龙卷风涡旋, 可用于龙卷风风场的模拟.

关键词: 龙卷风模拟器; 龙卷风涡旋; 流场结构; 涡流比

中图分类号: O355

文献标志码: A

Physical Study on Tornado-like Flow Based on Tornado Vortex Simulator

WANG Jin, ZHOU Qiang, CAO Shuyang, CAO Jinxin

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Tornado vortex simulator (TVS) in Tongji University was constructed to generate translating tornado-like vortices for the physical simulation of tornado-like vortex and quantifying tornado-induced aerodynamic loads on structures. A controlled fan, an annular duct and turning vanes suspended from the overhead crane composed the main parts generating tornado-like vortex, which could also be translated as a whole along a ground plane at the maximum speed of $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The tornado-like flows with swirl ratios ranging from 0.11 to 0.54 achieved by changing vane angle ($\theta_v = 20^\circ \sim 60^\circ$) were simulated by the simulator and measured with TFI Cobra Probes. The flow structures of the vortices were validated by comparing with the mobile Doppler radar observations of three major tornados happened in

Spencer, South Dakota May 30, 1998 and Mulhall, Oklahoma May 3, 1999 and Manchester, South Dakota June 24, 2003 respectively. The structures of the tangential velocity and the surface pressure of the simulated tornado-like flow were found to agree well with the measured data of the tornados, indicating that this simulator could generate stable tornado-like vortex and be used to simulate tornado-like flow physically.

Key words: tornado vortex simulator (TVS); tornado-like vortex; flow structure; swirl ratio

作为特异风的一种, 龙卷风是自然界中最为强烈的风暴之一, 并常带有很大的瞬时风速和气压下降, 还常常带有冰雹、闪电、强降雨等, 给建筑结构造成巨大破坏和重大人员伤亡. 美国是龙卷风的故乡, 每年大约有 800~1 000 起龙卷风发生^[1]. 而在中国的中东部地区, 同样观察到灾害性龙卷风的发生^[2] (图1). 据相关文献^[3]报道中国每年大约有 10~100



图 1 1980~1993 年间部分灾害性龙卷风分布^[2]

Fig. 1 Locations of partial severe tornadoes during 1980~1993^[2]

收稿日期: 2013-12-06

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036300); 国家自然科学基金面上项目(51278366)

第一作者: 王 锦(1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为桥梁与结构抗风. E-mail: 11wangjin@tongji.edu.cn

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

起龙卷风发生. 相关统计结果表明 90% 的龙卷风强度都不高于 F2 级, 3 s 阵风风速都不大于 $71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [1]. 对于常规结构而言, 在它服务期间受到龙卷风袭击或影响的可能性极小. 但是对于核电站、医院以及机场等具有重要社会影响的结构, 一旦发生龙卷风灾害, 其后果常常很严重, 会造成极大的社会损失和影响. 因而有效地评估龙卷风对重要结构抗风性能的影响, 或者在进行抗风设计时考虑龙卷风荷载的影响是十分重要的研究工作.

目前, 主要有三种方法用于研究龙卷风风场特性: 现场实测、试验研究以及数值模拟. 现场实测要求必须及时追踪到龙卷风的发生位置, 而且具有一定的危险性. 因此, 试验研究和数值模拟成为研究龙卷风涡旋的重要手段. 龙卷风具有很强的旋转特性, 在常规直线型边界层风洞中是无法模拟的. 已有的研究已经表明[4-6,11], 受龙卷风作用的结构风荷载特性无法在常规风洞中得到准确模拟, 因此需要建立龙卷风模拟器(tornado vortex simulator, TVS), 以研究龙卷风的风场特性及其对结构的作用.

Chang 等[4]是最早建立龙卷风模拟器, 并对龙卷风涡旋进行试验研究的学者. 他们通过 TVS 得到龙卷风涡旋内的切向速度及径向速度剖面. 基于 Chang 的理念, Ward[7]在模拟器顶部安装了控制风机来产生上升气流, 开发出了日后应用最广的 Ward 型模拟系统, 该系统主要包括三个部分: 汇流区、对流区以及集散区. 基于 Ward 型模拟系统, 有许多学者开展了对龙卷风涡旋结构的试验研究[8-12]和数值模拟研究[13-14]. Haan 等[1]设计了一种新型龙卷风模拟器, 该模拟器可以提供更方便的测试条件.

为研究龙卷风对桥梁、建筑结构的作用, 同济大学建立了新型 TVS. 本文基于新型 TVS 开展龙卷风试验模拟研究, 将升降平台高度固定在 400 mm 处, 通过改变模拟器的导流板角度($20^\circ \sim 60^\circ$)得到不同涡流比的龙卷风涡旋, 然后测试了距离升降平台不同高度处的风场特性, 从而获取了切向速度和风压分布剖面, 并与实测结果及 Rankine 涡模型进行比较.

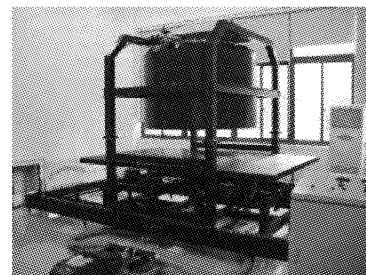
1 试验仪器与设备

1.1 龙卷风模拟器

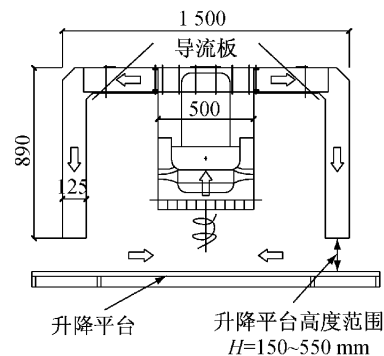
大多数龙卷风模拟器都是基于 Ward 型模拟系统的原理建造, 以用于研究龙卷风动力特性及涡旋结构. Ward 型模拟系统在操作平台上方安装有可产

生上升气流的风机, 而在操作平台四周设有可产生旋转气流的导流板. 该系统无法考虑龙卷风的水平移动, 并且使得近地表区域的龙卷风流场特性的测量变得不方便, 而此区域气流的流场特性对风工程是十分重要的. 为此, Haan 等[1]设计了一种新型龙卷风模拟器, 将风机以及导流板都安装在模拟器顶部, 并通过移动台架来模拟龙卷风的水平运动.

图 2 给出了同济大学土木工程防灾国家重点实验室的新型龙卷风模拟器[15]. 该龙卷风模拟器(TVS)基于 Haan 等[1]的设计原理而建造, 整个系统由三个同轴圆筒状构成, 风机和导流板放置在模拟器顶部, 这样气流经风机吸收, 通过导流板和外围圆筒, 在升降平台与蜂窝网间形成龙卷风涡旋, 因此此类模拟器为回流式风洞. 试验平台为开口式, 可以更方便研究龙卷风动力特性以及对结构的影响.



a 实图



b 示意图

图 2 同济大学龙卷风模拟器(单位:mm)

Fig.2 The TVS in Tongji University (unit: mm)

通过改变模拟器的不同控制参数, 从而调控龙卷风风场: 改变导流板角度 θ_v 、升降平台高度 H 可以得到不同涡流比、不同尺度的龙卷风; 改变风机转速 n 可以得到不同速度、不同流量的龙卷风. 此外由于该龙卷风模拟器能够在水平方向移动(最大移动速度 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 因此可以模拟龙卷风的水平移动, 从而可以更好地模拟自然界真实状态的龙卷风.

1.2 流场测试设备

为研究龙卷风涡旋的流场特性, 需要对其涡旋

结构进行测量. 本文中采用的测量仪器是澳大利亚 TFI 公司生产的三维脉动风速测试仪 (Cobra Probe) 及其动态压力测量系统 (DPMS). 该 TFI 四孔眼镜蛇探头可以测量龙卷风风场中的切向速度、径向速度、轴向速度以及静压. 该探头最大测量风速为 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向测量范围为 $\pm 45^\circ$ 锥体. 风速测量精度随着来流风速大小、倾角以及偏角的不同而不同. 在风向角介于 $\pm 24^\circ$ 、风速小于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况下风速测量精度略高于 $\pm 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 倾角和偏角的绝对误差小于 1° .

2 龙卷风风场模拟

目前, 已有的对龙卷风风场的试验研究大都以静态无水平移动的龙卷风为对象, 为此本文着重研究静态龙卷风风场特性. 本试验在未考虑龙卷风水平移动的情况下, 改变导流板角度, 测量了距升降平台不同高度处的风场特性.

根据同济大学龙卷风模拟器的控制参数的特点, 为了获取龙卷风涡旋的流场特性, 在每一高度处进行如表 1 所示工况设计.

表 1 试验工况

Tab. 1 Experimental cases

工况	导流板 角度($^\circ$)	风机转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	平台高度 H/mm	涡流比
工况 1	20	1 500	400	0.11
工况 2	30	1 500	400	0.18
工况 3	40	1 500	400	0.26
工况 4	50	1 500	400	0.37
工况 5	60	1 500	400	0.54

龙卷风流场中, 来流高度、来流角度以及风速是主要的控制变量. 基于这些控制变量, 得到了影响龙卷风的主要参数.

(1) 高宽比 a 表达式进行如下定义:

$$a = H/r_0 \quad (1)$$

式中: r_0 为上升气流的半径. 本文试验中 $H = 400 \text{ mm}$, $r_0 = 250 \text{ mm}$, $a = 1.6$.

(2) 径向雷诺数 (Re) 可以按如下定义计算:

$$\text{Re} = Q/(H\nu) \quad (2)$$

式中, Q 为气流流量; ν 为空气运动粘性系数, 根据模拟器所能达到的最大流量估计, 本文试验的雷诺数大约为 3.47×10^5 .

(3) 涡流比

对于龙卷风涡旋, 涡流比是最重要的参数, 以前的研究中都有过对涡流比研究的涉及^[1,7,16-17].

Mitsuta 和 Monji^[18] 提出涡流比可以按如下定义:

$$S = \frac{r_0}{2H} \tan \theta_v = \frac{1}{2a} \tan \theta_v \quad (3)$$

本文试验中导流板的角 θ_v 调节范围 $20^\circ \sim 60^\circ$, 则涡流比的范围为 $0.11 \sim 0.54$.

3 结果与讨论

龙卷风风场可以用切向速度、径向速度、轴向速度以及气压降来描述. 切向速度是三个速度分量中最主要的分量, 气压降常常是造成结构破坏的主要原因, 因此本文试验中着重对切向速度及气压降进行分析研究.

3.1 平均切向速度

图 3 给出了 $z/r_0 = 0.2$ (z 为测点距升降平台的高度) 时工况 5 的切向速度 (V_t) 剖面, 并给出了最大切向速度与涡核半径的定义. 图中相对龙卷风中心的距离 (r) 由龙卷风涡核半径 r_c (最大切向速度出现的半径) 进行量纲一化, 最大切向速度则采用两侧最大切向速度的平均值进行统计. 从图 3 中发现采用龙卷风模拟器得到的龙卷风涡旋, 其平均切向速度分布呈现近似“M”形状, 即在涡核半径内, 切向速度随着离涡核中心距离的增加而增大, 而在涡核半径外, 切向速度随着距离的增大而减小, 最大切向速度接近 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这种分布符合真实龙卷风的切向速度分布.

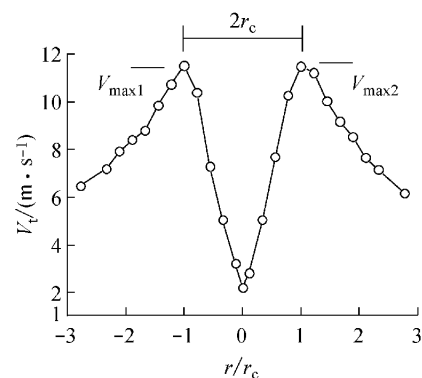


图 3 最大切向速度 V_{max} 及涡核半径 r_c 的定义

Fig. 3 Definitions of maximum tangential velocity V_{max} and core radius r_c

最大切向速度:

$$V_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max1}} + V_{\text{max2}}}{2} \quad (4)$$

图 4 给出了 $z = 0.56r_c$ 高度下 vane 5 工况的切向速度剖面同现场实测数据以及其他试验结果的比较. 相对龙卷风中心的距离由 r_c 进行量纲一化, 切向

速度由最大切向速度 V_{\max} 进行量纲一化. 试验结果与真实龙卷风(1998 年 5 月 30 日发生在南达科他州 Spencer 的龙卷风^[19], 以下简称 Spencer 龙卷风; 以及 1999 年 5 月 3 日发生在俄克拉荷马州 Mulhall 的龙卷风^[20], 以下简称 Mulhall 龙卷风)的实测数据吻合较好. 从图中可以发现本试验结果与实测数据稍有区别, 主要原因可能是真实龙卷风存在水平移动及地面粗糙度的影响, 而本试验的龙卷风是在静止状态时光滑平面下模拟得到. 尽管本文试验的雷诺数远小于实际情况的雷诺数, 但是其切向速度分布结果与真实龙卷风数据吻合较好. 此外, Spencer 龙卷风和 Mulhall 龙卷风的尺度分别为 200~400 m、800 m^[1], 因此可以认为该龙卷风模拟器可以模拟自然界不同尺度的龙卷风.

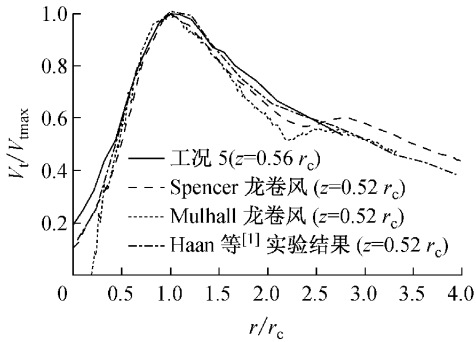


图 4 量纲一化的平均切向速度剖面的比较

Fig.4 Comparison of normalized mean tangential velocity profiles

涡流比是影响龙卷风风场的主要参数, 图 5 比较了 $z=0.2r_0$ 高度下, 不同工况(涡流比)的切向速度剖面. 在涡核半径内, 切向速度的梯度在高、低涡流比情况下略有不同, 高涡流比下更接近于直线.

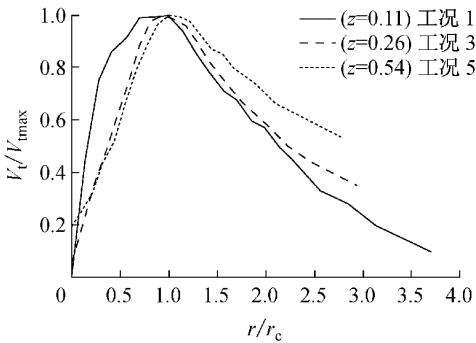


图 5 不同涡流比下量纲一化的平均切向速度剖面

Fig.5 Normalized mean tangential velocity profiles for different swirl ratios

图 6 给出了不同涡流比下的最大切向速度, 从图中发现最大切向速度随着涡流比的增加而增加,

在涡流比较小时增加幅度较大, 在涡流比较大时增加幅度较为平缓.

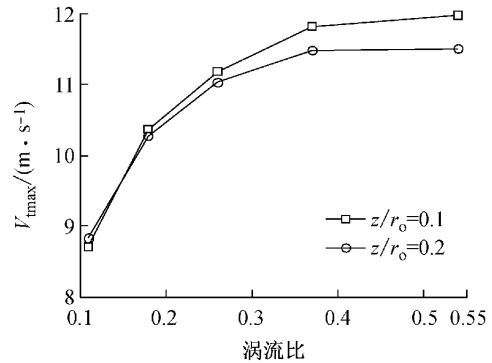


图 6 不同涡流比下的最大切向速度

Fig.6 Maximum tangential velocity with different swirl ratios

3.2 涡核半径

图 7 给出了涡核半径在不同高度下随涡流比的变化. 由图可以看出, 各个高度平面处的涡核半径均随着涡流比的增加而增大, 在低涡流比的范围内增幅激烈; 而在高涡流比的范围内, 涡核半径的增幅趋于平缓. 在低涡流比下, 涡核半径基本随着高度的增加不断增大, 形成锥形涡旋, 呈现出漏斗状. 在高涡流比下, 涡核半径在靠近地表附近, 随着高度的增加, 呈现漏斗状上升涡旋; 然而在远离地表区域增幅明显减小, 但仍然呈现锥状上升气流.

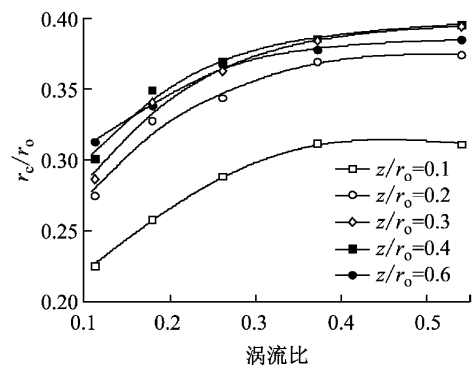


图 7 不同涡流比下的涡核半径

Fig.7 Core radius with different swirl ratios

3.3 风压分布

作为经典的涡旋模型, Rankine 涡模型是一种不考虑轴向流运动的二维涡流, 依据气旋平衡方程, 其压力梯度可以表示如下:

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{V_t^2}{r} \tag{5}$$

式中: $\frac{dP}{dr}$ 表示离龙卷风涡旋中心 r 处的压力梯度; ρ 为空气密度; V_t 为切向速度. 引入 Rankine 涡旋模

型,其切向速度如下式所示:

$$V_t = \frac{r}{r_c} V_{tmax}, 0 \leq r \leq r_c$$

$$V_t = \frac{r_c}{r} V_{tmax}, r > r_c \quad (6)$$

因此,其风压分布剖面可表达为

$$P = -\frac{1}{2} \rho V_{tmax}^2 \left(2 - \frac{r^2}{r_c^2}\right), 0 \leq r \leq r_c$$

$$P = -\frac{1}{2} \rho V_{tmax}^2 \frac{r_c^2}{r^2}, r > r_c \quad (7)$$

将风压 P 和距离涡旋中心的距离 r 分别由最小风压的绝对值 P_{min} 和涡核半径 r_c 进行量纲一化,得到如下表达式:

$$\frac{P}{P_{min}} = -\frac{1}{2} \left(2 - \frac{r^2}{r_c^2}\right), 0 \leq r \leq r_c$$

$$\frac{P}{P_{min}} = -\frac{1}{2} \frac{r_c^2}{r^2}, r > r_c \quad (8)$$

式中: V_{tmax} 为最大切向速度; r_c 为涡核半径.

Lee 等^[21]根据实测数据得到了 2003 年 6 月 24 日发生在南达科他州 Manchester, 级别为 F-4 的龙卷风(简称 Manchester 龙卷风)的风压分布剖面. 图 8 给出了 $z/r_o = 0.2$ 的高度下量纲一化风压分布剖面. 该龙卷风模拟器得到的风压分布剖面与 Manchester 龙卷风数据结果较为吻合, 同时与 Rankine 涡模型的结果也较为一致. 但发现试验结果和 Manchester 龙卷风实测数据有明显差别, 这可能是由于真实的龙卷风(Manchester 龙卷风)存在水平移动速度, 而本试验没有考虑龙卷风的水平移动^[10].

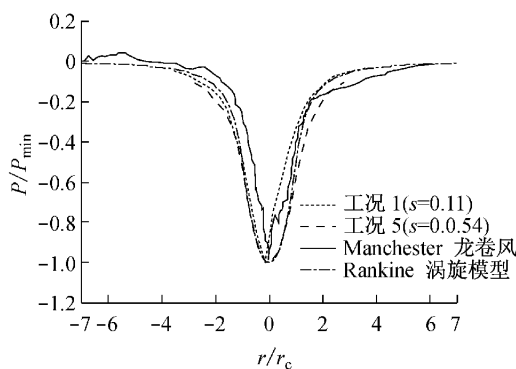


图 8 量纲一化的平均风压剖面比较

Fig. 8 Comparison of normalized mean surface pressure profiles

图 9 给出了 $z/r_o = 0.2$ 的高度下不同涡流比时的风压剖面, 离涡旋中心的距离经涡核半径进行量纲一化. 试验结果表明风压绝对值随着涡流比的增加而增大, 高涡流比(工况 5)时压力梯度在涡核中心 ($r=0$) 附近随之减小, 对应的曲线变得更加平缓. 这

一现象表明在高涡流比时可能存在双核涡旋^[1].

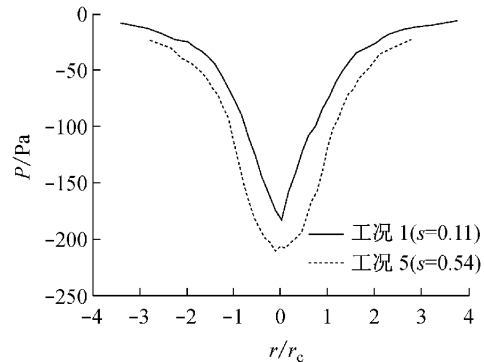


图 9 工况 1 及工况 5 的风压剖面

Fig. 9 Surface pressure for Vane 1 and Vane 5

4 结论

本文介绍了同济大学土木工程防灾国家重点实验室的新型龙卷风模拟器(TVS), 并基于该新型 TVS, 采用 TFI 眼镜蛇探头对龙卷风风场进行试验研究. 得到以下结论:

(1) 在同济大学龙卷风模拟器中模拟得到的龙卷风涡旋, 其平均切向速度分布呈现近似“M”形状, 即在涡核半径内, 切向速度随着离涡核中心距离的增加而增大, 而在涡核半径外, 切向速度随着距离的增大而减小. 这种分布符合真实龙卷风的切向速度分布;

(2) 基于新型 TVS 得到的平均切向速度剖面与 Spencer 龙卷风以及 Mulhall 龙卷风数据吻合很好, 而风压分布剖面与 Manchester 龙卷风数据吻合很好, 该模拟器可以用于模拟真实龙卷风风场. 通过风压分布特征可以证明高涡流比下的龙卷风涡旋可能存在双核结构;

(3) 最大切向速度及涡核半径均随着涡流比的增加而增加, 涡核半径同时随着高度的增加, 呈现出漏斗状, 并且在低涡流比的范围内增幅激烈, 高涡流比的范围内增幅平缓;

(4) 改变龙卷风模拟器的参数可以得到不同尺度、不同强度的龙卷风涡旋, 对龙卷风作用下建筑结构的抗风性能研究起到十分重要的作用.

参考文献:

[1] Haan Jr 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.
- [2] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 1995, 21(5): 36.
WEI Wenxiu, ZHAO Yamin. The characteristics of tornadoes in China[J]. Meteorological Monthly, 1995, 21(5): 36.
- [3] Goliger A M, Milford R V. A review of worldwide occurrence of tornadoes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 111.
- [4] Chang C C. Tornado wind effects on buildings and structures with laboratory simulation [C]//Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo: [s. n.], 1971: 213-240.
- [5] Bienkiewicz B, Duthia P. Physical modeling of tornado-like flow and tornado effects on building loading[C]//Proceedings of 7th US National Conference on Wind Engineering. Los Angeles: [s. n.], 1993: 95-106.
- [6] Sabareesh G R, Matsui M, Tamura Y. Dependence of surface pressures on a cubic building in tornado like flow on building location and ground roughness [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 103: 50.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lund D E, Snow J T. Laser Doppler velocimeter measurements in tornadolike vortices [J]. Geophysical Monograph Series, 1993, 79: 297.
- [10] 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 and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8): 1243.
- [11] 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 and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8): 1258.
- [12] Cleland J D. Laboratory measurements of velocity profiles in simulated tornado-like vortices [J]. The Journal of Undergraduate Research In Physics, 2001, 18(2): 51.
- [13] Lewellen D C, Lewellen W S. Near-surface intensification of tornado vortices[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2007, 64(7): 2176.
- [14] 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 and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(4): 239.
- [15] Zhou Q, Cao S, Wang J, et al. Experimental study on the flow structures of tornado-like vortices[C/CD]//The 12th American Conference on Wind Engineering. Seattle: [s. n.], 2013.
- [16] Hashemi Tari P, Gurka R, Hangan H. Experimental investigation of tornado-like vortex dynamics with swirl ratio: The mean and turbulent flow fields [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 936.
- [17] Matsui M, Tamura Y. Influence of incident flow conditions on generation of tornado-like flow [C/CD]//Proceedings of the 11th American Conference on Wind Engineering. Puerto Rico: [s. n.], 2009.
- [18] Mitsuta Y, Monji N. Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices[J]. Natural Disaster Science, 1984, 6(1): 43.
- [19] 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.
- [20] Lee W C, Wurman J. Diagnosed three-dimensional axisymmetric structure of the Mulhall tornado on 3 May 1999 [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(7): 2373.
- [21] Lee J J, Samaras T P, Young C R. Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado[C/CD]//Preprints of the 22nd Conference on Severe Local Storms. Hyannis: American Meteorological Society, 2004.