

文章编号:1005-4642(2020)08-0050-05

基于 Ward 模型的低成本人造龙卷风发生装置 及涡旋参量的三维测量

叶智丰,陈若琳,黄慧敏,曾启文,李翠莹,彭 力

(华南师范大学物理与电信工程学院,广东 广州 510006)

摘 要:搭建了基于 Ward 模型的低成本人造龙卷风发生装置. 改变进风角度、进风量可改变涡流比,产生不同形态的稳定的可视化涡旋. 通过智能车带动热敏风速探头对龙卷风风场参量进行探测,分析不同涡流比下龙卷风不同高度横截面的切向、径向、纵向速度和核心半径等涡旋参量. 实验结果表明,龙卷风切向风速随半径先升高后降低,纵向和径向风速随高度的增加而减小.

关键词:人造龙卷风;涡流;Ward;智能车;三维测速

中图分类号:O4-39;P445.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.08.010

龙卷风是大气中一种较强的涡旋现象,有极强的科研价值和科普意义. 对其进行现场的观测和分析具有一定的难度,因此在实验室中使用龙卷风模拟装置进行小尺度探索是研究龙卷风的重要方法之一,而可视化的人造龙卷风生成有利于龙卷风风场特性的大众化科普教育. 目前龙卷风发生装置主要通过大型风扇的结构化组装实现,例如传统的 Ward 型龙卷风生成装置及 Church 等人在普渡大学建立的 4 m 宽、7 m 高的改进型龙卷风产生装置^[1]. 而方明^[2]等人制作的科普级别的发生装置造价数千至万元,张冀喆^[3]设计的简易龙卷风生成装置又有不能改变涡旋参量的局限性,Refan^[4]等人设计的 MWD 实验室研究级别的超高精度模拟器更是达到数万元. 更重要的是,龙卷风风场的实验室测量主要使用激光雷达形式实现^[5],造价十余万元至两三百万元不等. 因此急需成本相对较低、生成效果较好且能实时改变涡旋形态和进行数值分析的龙卷风发生和测量装置,用于普通实验室的龙卷风分析研究或教学、科普演示. 本文采用易于获取的材料,设计出性价比高且可以实时改变涡流比的龙卷风发生和测量装置.

1 实验原理

1.1 稳定涡旋及龙卷风的发生

1.1.1 诱导机理

根据汤姆孙定理,无旋的理想流体在流动过程中始终无旋. 这是因为理想流体不表现出黏性,无法形成切向应力,不能传递旋转运动. 但由于实际流体具有黏性,所以可以通过黏性切应力或湍流切应力来传递旋转运动. 因此想要产生特定的旋转运动,就要产生可控的诱导旋流^[6],这是产生稳定且可控的人造龙卷风的必要条件.

1.1.2 自由涡与龙卷风生成机理

龙卷风中部气流在自下而上的旋转上升的过程中,底部必须得到流体不断地补充用以维持龙卷风风场的持续性,如图 1 所示. 由此我们认为龙卷风底部 A 区,若忽略较小的轴向速度,其流动规律可看作二维点涡(图 2). 而该区域的流体其流动规律应类似于固体涡和自由涡的叠加. 在这一区域中诱导旋流不断自四周向内汇聚,旋转上升. 而要形成稳定且可控的龙卷风涡旋,则需形成喷射方向、喷射强度可控的诱导流体,并且通过设置诱导流体的喷射方向和喷射强度阈值使流

收稿日期:2020-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61975058);广州市科技计划项目(No. 201704020137);蓝盾科技项目(No. LD20170209)

作者简介:叶智丰(1999-),男,广东广州人,华南师范大学物理与电信工程学院 2017 级本科生.

通讯作者:彭 力(1978-),男,湖南桑植人,华南师范大学物理与电信工程学院讲师,硕士,研究方向为光电技术及应用. E-mail:pengli27@126.com



体向内汇聚时依然保有旋转运动,能够形成涡旋^[7-8].

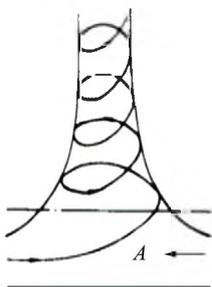


图 1 三维点涡

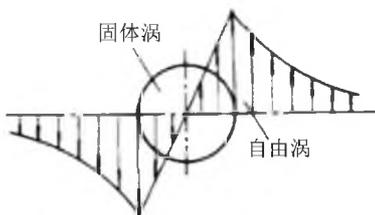


图 2 二维点涡速度分布

由此,总结形成稳定龙卷风的 2 个条件:

- 1) 形成涡旋生成区,使流体有向内汇聚的趋势,进而形成诱导旋流;
- 2) 有上升气流.

龙卷风的生成机理在后面的装置中会有所体现.

1.2 二维理想模型

在研究热带气旋和龙卷风形成机理和风场特性的过程中,人们利用流体力学相关知识,结合实测风场数据,建立风场模型,模拟风场特性. 这些模型都有其局限性,与实际龙卷风风场的拟合存在一定偏差. 但结合数据模拟与观测数据,相互验证,能得到更接近真实的风场描述.

理想化的 Rankine 涡模型^[9],其表达式为

$$v = \begin{cases} c_1 v_R \frac{r}{r_m}, & 0 \leq r \leq r_m; \\ c_2 v_R \left(\frac{r_m}{r}\right)^\chi, & r_m \leq r. \end{cases} \quad (1)$$

其中, r 为测量点位置, r_m 为涡旋的核心半径, v_R 为涡旋的最大切向速度, c_1 和 c_2 为调幅参量, χ 的取值范围为 $0.4 \sim 0.6$.

Rankine 涡模型是只讨论切向速度的涡旋模型. 只存在切向速度的流体无法形成涡旋,因此该模型在实际中并不存在^[10]. 该模型虽无法反

映龙卷风的全貌. 但对于切向速度的描述是符合实际涡旋特征的. 在本实验中,将 Rankine 模型与实测龙卷风速度的切向分布进行分析比较,可验证该方案的科学性及其实验结果的合理性.

1.3 涡流比

涡流比是可以表征龙卷风风场特征的无量纲参量. 在本实验中用涡流比来表征不同结构的龙卷风风场.

入风角度和入风速度会改变近地面的核心半径大小及最大切向风速,从而导致涡旋的涡流比发生变化,进而影响龙卷风的风场强度. 距离入风口某一高度截面上的涡流比为

$$S = \frac{\pi R^2 v_R}{Q}, \quad (2)$$

其中, R 为该高度上的核心半径, v_R 为该高度上的最大切向速度, Q 为单位时间总的入风流量.

2 装置设计

2.1 龙卷风模拟发生装置及测量装置的设计

本实验设计的涡旋发生装置是基于 Ward 模型的龙卷风模拟装置,如图 3 所示,分为进风区、对流区和出风区 3 部分.

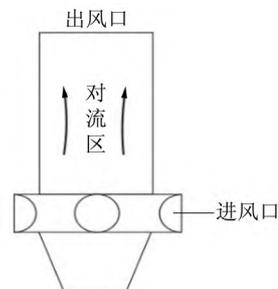


图 3 涡旋发生装置结构图

在进风区放置 8 个轴流风机送风. 如图 4 所示,送风口前有 16 片一定角度的导流片. 在风机和导流片的共同作用下,流体获得径向和切向速度,产生诱导旋流,流体有向内汇聚的趋势. 在对流区方向不同的气流相撞,旋转获得向上的纵向速度,相互缠绕,气体旋转产生旋转核心. 由于后续气体的补充,在发展对流区形成稳定的柱状旋转涡旋^[11]. 由此,满足了形成稳定龙卷风的 2 个条件:具有向内汇聚趋势的诱导旋流;上升气流.

如图 5~6 所示,在装置顶部由小车装载风速仪探头测量风速. 小车设置周期性移动以测量涡旋直径上不同点的风速.

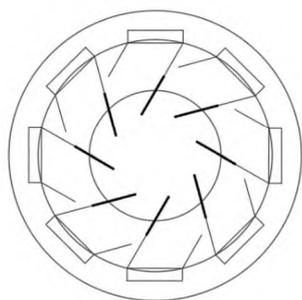


图4 导流片剖面图

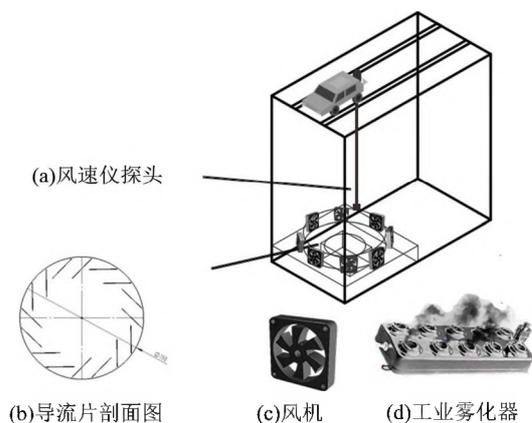


图5 装置设计图



图6 装置实物图

在实验中,为实现龙卷风的可视化,借助工业超声波雾化器产生水蒸气,得到以水蒸气为介质的龙卷风。

2.2 导流片角度实时连续改变装置实现

如图7~8所示,发生装置由固定下盆和旋转上环组成。导流片一端与固定下盆连接,一端与轴流风机连接,两端均可绕轴自由旋转。轴流风机固定于旋转上环,且可绕风机的竖直中心轴旋转。由此,转动旋转上环时,各导流片可实时连续转过相同角度。

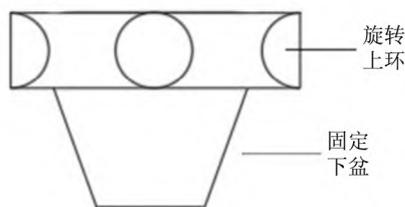


图7 涡旋发生装置图



图8 发生装置内部图

2.3 实验步骤

1)启动发生装置和测量装置,形成稳定龙卷风测量涡旋截面各点切向、径向和纵向速度。改变探头高度,测得龙卷风不同高度三维速度。

2)改变导流片角度,重复上述实验,探究龙卷风核心半径、各位置速度与涡流比的关系。

设计的装置可以控制进风量、进风角度以及测量高度,从而改变涡流比,即改变风场结构,进而测量切向、径向和纵向三维速度,从而研究核心半径、速度随位置与高度的分布,以及任一控制量与速度分布的关系。

3 实验数据分析

利用风速探头测量自制龙卷风中风场中各点的切向速度、径向速度和纵向速度,绘制相关图像进行分析对比,并在此基础上,改变可能影响风场特性的因素,探究这些因素分别对风场和涡旋形态的影响。

3.1 不同高度涡旋切向速度的变化趋势

3.1.1 不同高度涡旋切向速度变化趋势

图9给出了距离涡旋中心0~60 cm范围内对应的不同高度的切向速度,说明涡旋在3组高度上(12,22,32 cm)的切向速度的变化情况都为“涡旋中心切向速度最小,接近为0,呈先增大后减小的趋势”。与Rankine涡旋模型(如图10)一致。

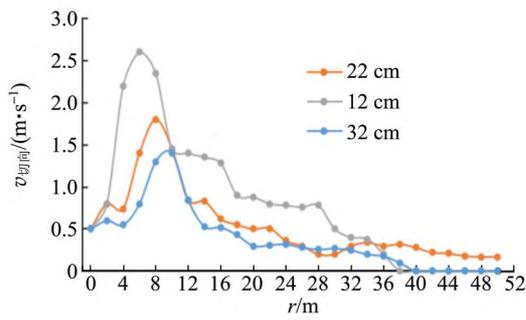


图 9 不同高度涡旋切向速度与位置关系图

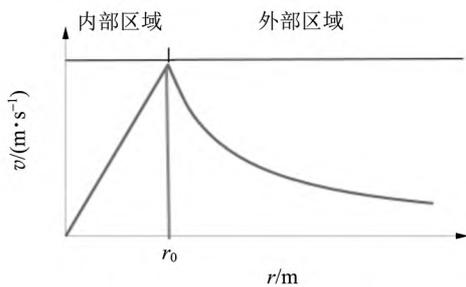


图 10 Rankine 涡旋模型

3.1.2 高度对核心半径、最大切向速度的影响

图 11 表明了涡旋的核心半径随高度的增加呈上升趋势,而图 12 表明最大切向速度随着高度的增加而逐渐降低。

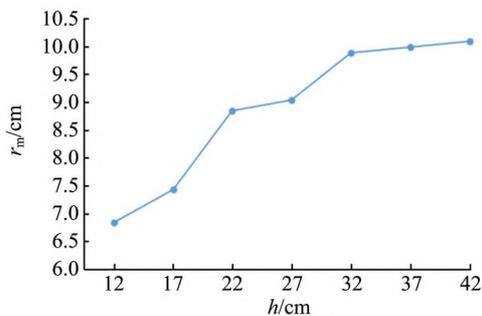


图 11 核心半径与高度关系图

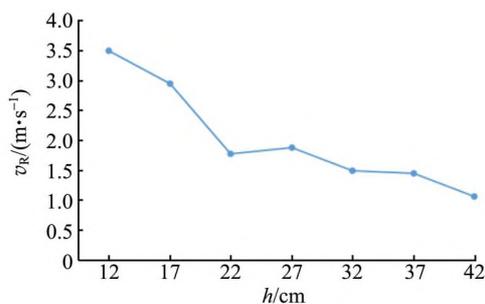


图 12 最大切向速度与高度关系图

综合图 9、图 11 和图 12,可看出自制龙卷风不同高度上的切向速度分布都遵循同一变化规律:随着相对自制龙卷风中心的距离减小,切向速度逐渐增加,当增加到 10 cm 范围内的某一最高值时切向速度开始迅速减小,直至在涡旋中心处,切向速度减至接近于零,也侧面验证了该装置形成的涡旋在高度为 12, 22, 32 cm 时仍为单涡结构;将 3 条“切向速度与观测位置的关系曲线”进行对比易知,随着高度的增加,距离自制龙卷风中心同一距离的切向速度逐渐减小,且达到最大切向速度的位置距自制龙卷风中心更远,以上是由实测数据得到的自制龙卷风的风场特征。

3.2 不同高度涡旋径向速度的变化趋势

图 13 给出了以 20 cm 为半径的圆形范围内 3 组高度对应的径向速度的变化情况,不同高度上的径向速度分布都遵循同一变化规律:径向速度在涡旋中心位置达到峰值,沿半径远离涡旋中心的过程中,径向速度不断下降。

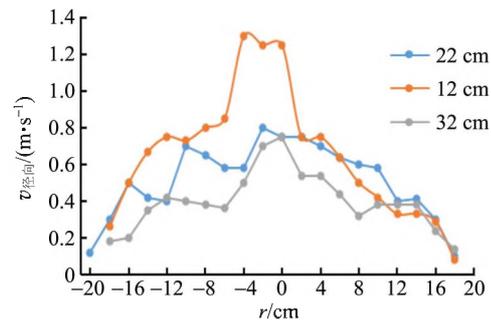


图 13 不同高度下涡旋径向速度与位置关系图

可做出猜想,由于涡旋的形成要满足四周空气向内汇聚且涡旋中心为低气压并形成上升气流的条件,对于径向速度来说,在测量点接近涡旋中心的过程中,风速的向内汇聚使径向速度增大。

3.3 不同高度涡旋纵向速度的变化趋势

图 14 给出了距离涡旋中心 35 cm 的范围内 3 组高度所对应的纵向速度的变化情况,由图 14 可知各个高度的纵向速度在距涡旋中心 5~15 cm 的范围内达到最大值,总的变化趋势呈“先增后减”。

已知中心的上升气流是形成涡旋的条件之一,结合涡旋纵向速度与涡旋位置关系图,可以做出对涡旋内部风场状况的可能性分布推测,上升气流集中于近涡旋中心的四周而非涡旋中心,涡旋中心因为气压较低,有部分下降气流。故涡旋

中心的纵向速度小,稍远离涡旋中心处伴随着强烈的上升气流,表现为急速增长的纵向速度。

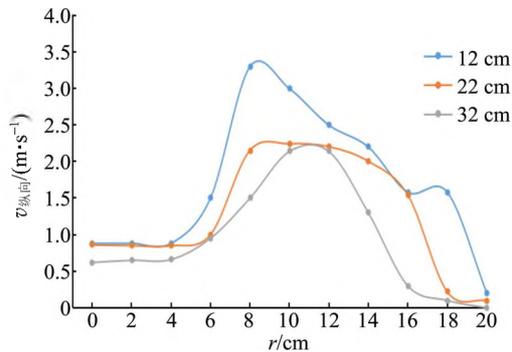


图 14 在不同高度下涡旋纵向速度与位置关系图

3.4 入风角度和入风速度对风场特征的影响

本方案通过改变入风速度、导流片角度来改变各高度上的核心半径,从而改变涡流比。如图 15 所示,当持续增大入风速度或持续减小入风角度,测得同一高度核心半径变小,涡流比变小,龙卷风涡旋的整体形态变得更细直,如图 16 所示,可见涡流比较小时涡旋更为细直。

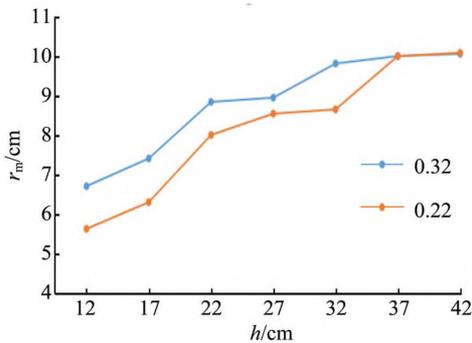


图 15 不同涡流比下核心半径与高度的关系图



(a)0.32

(b)0.22

图 16 涡流比分别为 0.32 和 0.22 时涡旋外观

4 结论

基于 Ward 模型的低成本人造龙卷风发生及测量装置能产生持续稳定的龙卷风,多次的测量结果表明此装置 3 个维度的速度均符合 Rankine 涡旋模型,通过对探究实验的分析可以得出:随着涡流比变小,在涡旋高度较低的位置,同一高度横截面涡旋的核心半径变小,龙卷风涡旋的整体形态将变得更细直。该装置实现了进风角度和进风量的实时连续变化,同时利用激光等可视化手段,可更直观地观察到涡流比对龙卷风形态的影响。

参考文献:

- [1] Church C R, Snow J T, Agee E M. Tornado vortex simulation at Purdue University [J]. Bulletin American Meteorological Society, 1977, 58(9): 900-908.
- [2] 方明,丁绪星,周嵬,等. 一种龙卷风模拟产生装置 [P]. 中国:CN202383889U,2012-08-15.
- [3] 张冀喆. 龙卷风风场数值模拟及发生装置研制 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [4] Refan M. Physical simulation of tornado-like vortices [D]. London: University of Western Ontario, 2014.
- [5] Wurman J, Alexander C R. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, Storm. Part II: Comparison of observed damage and radar-derived winds in the Tornadoes [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(1): 97-119.
- [6] 汤卓,张源,吕令毅. 龙卷风风场模型及风荷载研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 104-110.
- [7] 张景松. 人造龙卷风形成机理 [J]. 煤炭学报, 1996 (4): 69-72.
- [8] 郭瑞雪,王鹏程,周司维,等. 可持续性涡旋的产生与测量 [J]. 物理实验, 2020, 40(5): 44-49.
- [9] 徐枫,肖仪清,李波,等. 龙卷风风场特性的 CFD 数值模拟 [J]. 空气动力学学报, 2013, 31(3): 350-356, 370.
- [10] 李春曦,郭宁,李娜,等. 类龙卷风涡动力学特征的数值研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 81-87.
- [11] 路帅,王泽宇,李渊,等. 低成本小型纹影风洞 [J]. 物理实验, 2019, 39(12): 35-39.

(下转 60 页)

4 结束语

利用 DIS 实验系统测量并分析了电容器充放电时电流和电压随时间的变化规律,并通过测量不同阻值下电容器放电的时间,得出了增大电阻可以延缓放电时间的结论.学生通过学习电容器充放电的原理,测量其基本特性曲线,得出了有意义的结果,极大地激发了学生的研究兴趣,提高了学生的动手能力和解决问题的能力.

参考文献:

- [1] 冯杰. 高中物理探究实验及案例教学设计[M]. 北京:北京大学出版社,2011:1-3.
- [2] 欧勇,黄彦媚. 基于 DIS 实验进行原电池电极电势变化的实验探究及其拓展[J]. 物理实验,2019,39(12):56-59.
- [3] 吴亚梅. 电容器充放电演示仪的改进[J]. 物理通报,2015(S1):81-82.
- [4] 马文蔚,周丽青,解希顺. 物理学教程(下册)[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:28-31.
- [5] 杨君. 从电容器充、放电实验所想到的[J]. 物理教师,2017,38(2):63-65.
- [6] 李传文,张泽宝. 关于物理实验中的误差分析——电容器充放电时间常数测定的讨论[J]. 物理实验,1987,7(5):220-221.

Capacitor charging and discharging experiment based on DIS

REN Shu-hong, ZHANG Yi-bing

(School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Using the DIS experimental system, the characteristics of capacitor charging and discharging were explored. The change law of current and voltage with time could be intuitively displayed during the process of charging and discharging. In the discharge circuit, through changing the resistance by the plug-in adjustable resistance, the discharge time of the capacitor could be controlled.

Key words: capacitor; charging and discharging characteristics; DIS experimental system

[责任编辑:尹冬梅]

(上接 54 页)

Low-cost artificial tornado generator based on Ward model and three-dimensional measurement of vortex parameters

YE Zhi-feng, CHEN Ruo-lin, HUANG Hui-min, ZENG Qi-wen, LI Cui-ying, PENG Li

(School of Physics and Telecommunication Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A low-cost artificial tornado generator based on the Ward model was built. Changing the inlet air angle and the inlet air volume could change the vortex ratio and produce stable visual vortices of different shapes. The intelligent car drove a thermal wind speed probe to detect the tornado wind field parameters, and to analyze the tangential, radial, longitudinal speed and core radius and other vortex parameters of the tornado at different height cross sections under different vortex ratios. The experimental results showed that the tangential wind speed of the tornado increased with the radius at first and then decreased, and the longitudinal and radial wind speed decreased with the height.

Key words: artificial tornado; eddy current; Ward; smart car; three-dimensional speed measurement

[责任编辑:郭 伟]