

文章编号:1005-4642(2020)08-0055-06



基础教育

基于 DIS 的电容器充放电实验

任淑红,张铁炳

(宁夏大学物理与电子电气工程学院,宁夏银川 750021)

摘要:利用 DIS 实验系统探究电容器充放电的特性,直观地显示电容器充放电过程中电流和电压随时间的变化规律.通过即插式可调电阻改变放电电路中阻值的大小,可以控制电容器放电的时间.

关键词:电容器;充放电特性;DIS 实验系统

中图分类号:G633.7

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.08.011

实验是研究和学习物理学的基本方法,物理实验以其形象、生动、形式多样等特点蕴藏了非常活跃的教学因素,为学生提供了全面发展的空间,活化知识结构和训练思维空间,为以后从事科研工作及其他工作打下坚实的基础^[1].在基础物理实验中,电容器充放电是应用非常广泛的电学实验,但传统的电容器充放电实验使用灯泡或电流表显示电路中短暂的充放电电流,学生很难通过实验现象分析归纳出电容器充放电的规律.将基于传感器设备的数字化信息系统(DIS)与物理实验教学结合,能够实现物理实验现象与物理学原理的转换,将一些不明显的现象显性化,使得现象更容易被观察^[2].因此,本文利用 DIS 实验系统探究电容器充放电过程中电流和电压随时间的变化,可以使学生通过观察实验图像分析归纳出电容器充放电的规律及延缓放电的方法,从而更好地理解电容器充放电的特性.

1 实验研究背景

1.1 传统实验分析

传统的电容器充放电实验有 2 种方法:第一,通过观察电路中的电流表指针是否偏转,判断电路中是否有电流通过,思考在充放电过程中电容器的极板带何种电荷,实验操作简单,能说明电容器的充放电过程中有电流,但是充电、放电过程非

常短暂,只观察电流表,带给学生的记忆不深刻,无法给学生视觉上的冲击.第二,用小灯泡代替电流表,通过观察小灯泡的发光感知电容器放电过程的短暂和正负电荷中和的实际效果,小灯泡发光比观察电流表指针偏转似乎更容易引起学生的兴趣,但在实际操作中,该实验又存在以下缺点:1)无法观察电容器充电时电路中电流的变化及时间长短,充电时间只能通过观察判断;2)放电现象不明显,一般实验室准备的电容器容量较低,灯泡亮的时间短暂;3)实验可见度不高,实验中使用的电容器、小灯泡都是较小的元件,做演示实验时不利于学生观察^[3].

1.2 DIS 实验分析

利用 DIS 实验系统研究电容器的充电和放电过程,不仅可以高频率、高密度地对数据进行采集和处理,展现快速过程中物理量的变化,还可以采用组合图形、数据表格、指针显示等方式,使实验具有形象、直观、测量精确和实验结果易分析等特点.对比以上传统实验,本实验的优势具体表现为:1)利用微电流传感器和电压传感器快速、精确地测量电路中的电流和电压值,并将电流和电压值转换成实验所需形式的信息输出,让学生通过观察实验现象,分析归纳出电容器充放电时电流和电压随时间的变化规律;2)放电电路中加入即插式可调电阻,其调节范围为 $5\ \Omega\sim 100\ \text{k}\Omega$,电

收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 71663042)

作者简介:任淑红(1992—),女,宁夏固原人,宁夏大学物理与电子电气工程学院 2019 级研究生.

通讯作者:张铁炳(1964—),女,宁夏银川人,宁夏大学物理与电子电气工程学院教授,硕士,主要研究方向为物理教育. E-mail:793667402@qq.com



容器在充放电时可以切换电阻连续记录,方便学生对比分析不同阻值下放电时间的快慢.

2 实验原理分析

电容器具有储存电场能量的性质,实际体现在电容器具有充电和放电的特性.图1所示为电容器充放电的实验原理图.电源由9V干电池提供,电容器的规格为25V 2200 μ F,单刀双掷开关控制充放电电路,当开关打向a时电容器开始充电,电流从电源的正极出发沿逆时针方向;当开关打向b时电容器开始放电,电流从电容器的正极出发沿逆时针方向,与充电方向相反.微电流传感器串联在中间电路,测量电容器充放电时电流随时间的变化;电压传感器与电容器并联,测量电容器充放电时电压随时间的变化.放电电路中接入即插式可调电阻,保持电容C不变,探究电阻R对放电时间的影响.

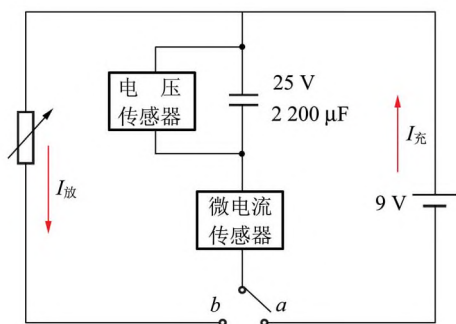


图1 实验原理图

2.1 电容的充电

设电容器在充电的某一时刻电流为 I ,电容器上的电荷量为 q ,电容两极板间电压为 U ,且电压 U 与电荷量 q 的关系为 $U=q/C$.如图1所示,整个回路以电流 $I_{充}$ 为正方向,根据基尔霍夫定律有

$$IR + \frac{q}{C} - U_0 = 0, \quad (1)$$

式中 R, C 和 U_0 均为常量, q 为电容在电流为 I 时的电荷.如果在时间 dt 内,流过电路的电量为 dq ,那么电路中的电流为 $I=dq/dt$,所以式(1)可写成

$$\frac{Rdq}{dt} + \frac{q}{C} - U_0 = 0,$$

考虑到 $t=0$ 时 $q=0$,积分可得

$$q = CU_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, q 趋于 CU_0 ,这就是说,当电容长时间充电以后,电容所带的电荷趋于极大值 CU_0 ,令 $q_0 = CU_0$,则有 $q = q_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$,则充电时电路中电流随时间的变化规律为

$$I = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2)$$

式(2)中 I_0 为电流的最大值,也就是 $t=0$ 时的电流值,随着充电时间的增长,电流按指数规律衰减,直至为零^[1].

根据 $q=CU$,有 $CU = CU_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$,可得

$$U = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (3)$$

式(3)中 U_0 为电压的最大值,也就是 $t \rightarrow \infty$ 时的电压值,随着充电时间的增长,电路中电容器两端的电压按指数规律增大,当时间趋于无限大时,电压达到最大值.

2.2 电容的放电

电容器在放电的过程中,有电流通过电阻 R ,如图1所示,在某一时刻以电流 $I_{放}$ 为正方向,根据基尔霍夫定律有

$$IR - \frac{q}{C} = 0, \quad (4)$$

在电容放电过程中,其电荷随时间增长而减少,故 $I = -\frac{dq}{dt}$,式(4)为

$$\frac{Rdq}{dt} = -\frac{q}{C},$$

式中 R 和 C 都是常量,并且在 $t=0$ 时电容的电荷量为 $q_0 = CU_0$,积分可得 $q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$,可知放电时电路中电流随时间的变化规律为

$$I = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (5)$$

式(5)中 I_0 为电流的最大值,也就是 $t=0$ 时的电流值,随着放电时间的增长,电流亦按指数规律衰减,直至为零^[5].

根据 $q=CU$,有 $CU = CU_0 e^{-\frac{t}{RC}}$,可得

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (6)$$

式(6)中 U_0 为电压的最大值,也就是 $t=0$ 时的电压值,电容在放电的过程中,电压 U 随时间 t 的增长按指数规律在减小.

根据式(5)和式(6)可知,电容器在放电时电流和电压变化的时间分别为 $t_1 = RC \ln \frac{I_0}{I}$, $t_2 = RC \ln \frac{U_0}{U}$,由于 $I_0 \geq I, U_0 \geq U$,因此 RC 越大,电流

和电压变化的时间越长. 令 $\tau=RC$, 叫做时间常量, 可以反映电容器放电过程的特征^[6]. 实验中保持电容 C 不变, 探究电阻 R 对电容器放电时间的影响.

3 实验过程及现象分析

3.1 实验仪器连接

实验仪器主要由自制电容器充放电演示器、THDSWL-3 型微电流传感器和电压传感器、计算机等构成. 如图 2 所示, 传感器与计算机之间用数据采集器和 USB 数据线连接, 在进行探究实验时, 分别用微电流传感器和电压传感器测量电路中的电流值和电压值, 然后通过数字化仪通用软件在数据表格窗口记录数据, 数据采集完毕后, 基于所采集的实验数据在组合图形窗口绘制实验图形.

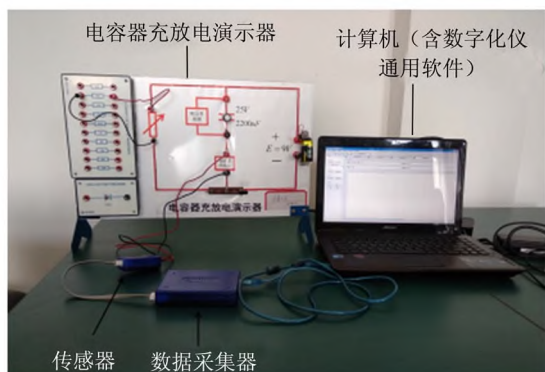


图 2 实验仪器连接实物图

3.2 传感器软件

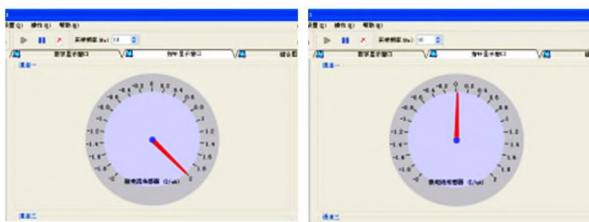
3.2.1 微电流传感器软件

1) 将微电流传感器通过数据采集器与计算机连接, 打开数字化仪通用软件, 其设置的采样频率默认为 20 Hz, 为了能够快速采集数据, 将采样频率设置为 $f=10$ Hz, 则微电流传感器的数据采集周期 $T=0.1$ s, 因此, 电流的变化时间为 $t=NT=0.1N$, N 为采集点数.

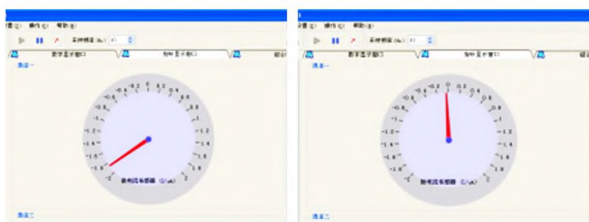
2) 打开数字显示窗口, 在通道一进行反复校零设置, 然后切换到指针显示窗口, 将开关打向 a 对电容器充电, 观察到指针沿顺时针方向由零增加到最大值, 随后又逐渐减小到零, 如图 3 所示; 将开关打向 b 对电容器放电, 观察到指针迅速沿逆时针方向偏转到最大值, 随后逐渐减小到零, 如图 4 所示. 对比 2 幅图像可以看出电容器充放电时电流的方向相反, 且都是从最大值逐渐减小到零.

3) 打开数据表格窗口, 点击开始采集按钮, 然

后选择可调电阻的阻值为 200Ω , 将开关打向 a 使电容器开始充电, 同时记录数据, 随着采集点数的增加电流从最大值逐渐减小, 直至为零, 此时电容器完成充电过程. 随后立即将开关打向 b 使电容器开始放电, 由于放电时电流方向与充电方向相反, 因此电流为负值, 并随着采集点数的增加逐渐增大, 如图 5 所示. 为了进行实验对比, 将可调电阻的阻值调到 2000Ω , 同理, 使电容器开始充放电并记录数据.



(a) (b)
图 3 电容器充电时电流指针的变化



(a) (b)
图 4 电容器放电时电流指针的变化

图 5 电流数据表格窗口

4) 基于以上所采集的数据, 点击绘图, 切换到组合图形窗口. 根据数据表格可知, 采集的点数最多 1 000 个, 电流的最大值为 $3.40 \mu A$, 且电流值有正负之分, 因此组合图形的横坐标采集点数 N 可设为坐标范围为 $0 \sim 1000$, 纵坐标电流 I 可设为 $-4 \sim 4 \mu A$, 设置完成点击确认绘制图像. 图 6 和图 7 分别为 200Ω 和 2000Ω 的阻值下电容器充放电时电流随时间的变化图像.

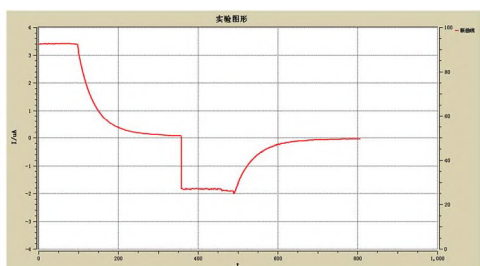


图 6 200 Ω 时电容器充放电的 I-t 图像

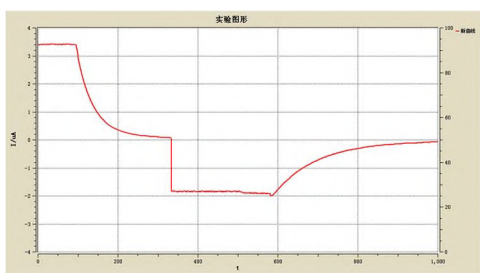


图 7 2 000 Ω 时电容器充放电的 I-t 图像

3.2.2 电压传感器软件

1) 将电压传感器通过数据采集器与计算机连接, 打开数字化仪通用软件, 将采样频率也设置为 $f = 10 \text{ Hz}$, 则电压传感器的数据采集周期 $T = 1/f = 0.1 \text{ s}$, 因此, 电压的变化时间为 $t = NT = 0.1 N$, N 为采集点数。

2) 打开数字显示窗口, 在通道一进行反复校零设置, 然后切换到指针显示窗口, 将开关打向 a 对电容器充电, 观察到指针沿顺时针方向由 0 迅速增加到最大值, 如图 8 所示; 将开关打向 b 对电容器放电, 观察到指针由最大值逐渐减小到零, 如图 9 所示。对比 2 幅图像可知电容器充放电时电

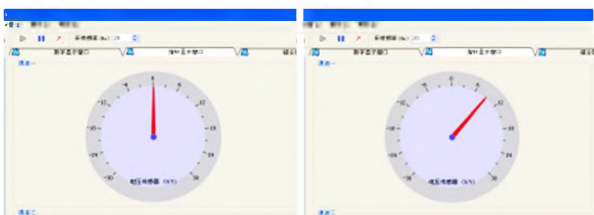


图 8 电容器充电时电压指针的变化

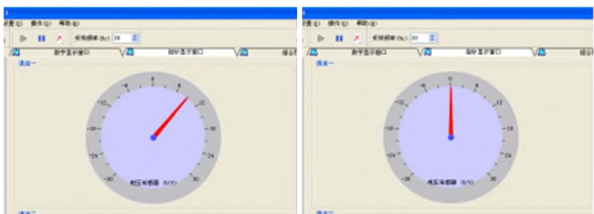


图 9 电容器放电时电压指针的变化

压的方向不变, 且充电时电压随时间逐渐增大, 放电时电压则随时间逐渐减小。

3) 打开数据表格窗口, 点击开始采集按钮, 然后选择可调电阻的阻值为 200Ω , 将开关打向 a 使电容器开始充电, 同时记录数据, 随着采集点数的增加电压从最小值逐渐增大到最大值, 此时电容器完成充电过程。随后立即将开关打向 b 使电容器开始放电, 随着采集点数的增加电压由最大值逐渐减小为零, 如图 10 所示。为了进行实验对比, 将可调电阻的阻值调到 2000Ω , 同理, 使电容器开始充放电并记录数据。

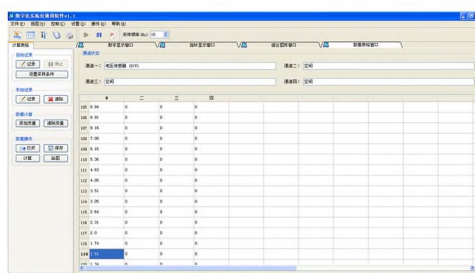


图 10 电压数据表格窗口

4) 基于以上所采集的数据, 点击绘图, 切换到组合图形窗口。根据数据表格可知, 采集的点数最多 400 个, 电压的最大值为 8.9 V , 因此组合图形的横坐标采集点数 N 可设为坐标范围为 $0 \sim 400$, 纵坐标电压 U 可设为 $0 \sim 10 \text{ V}$, 设置完成点击确认绘制图像。图 11 和图 12 分别为 200Ω 和

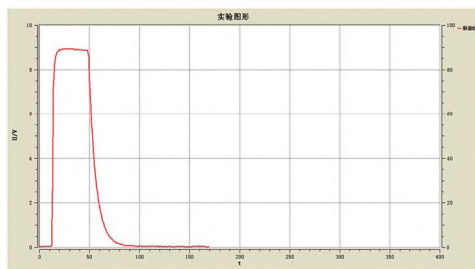


图 11 200 Ω 时电容器充放电的 U-t 图像

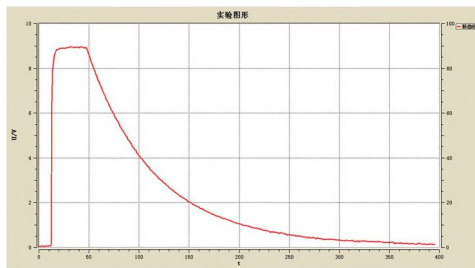


图 12 2 000 Ω 时电容器充放电的 U-t 图像

2 000 Ω 的阻值下电容器充放电时电压随时间的变化图像.

3.3 实验现象分析

3.3.1 电容器充电特性分析

为方便观察电容器充电时的特性,用微电流传感器和电压传感器分别测得电容器充电时电流和电压随时间的变化曲线,如图 13~14 所示.

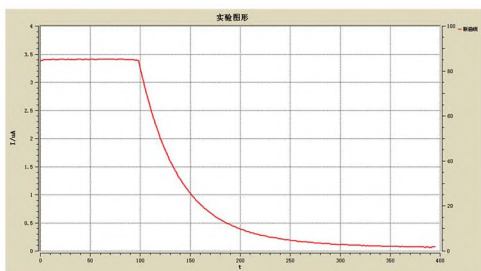


图 13 电容器充电的 I-t 图像

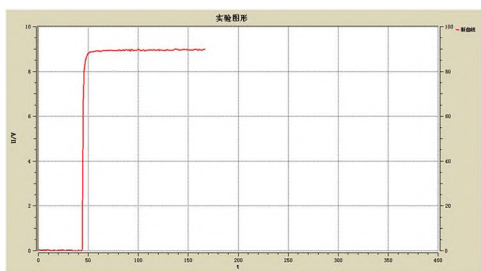


图 14 电容器充电的 U-t 图像

从图 13 可以看出电容器充电时,电流随时间的增大按指数规律减小;从图 14 则可以看出电容器充电时,电压随时间的增大按指数规律增大,并且当时间趋于无限大时,电压达到最大值.

3.3.2 电容器放电特性分析

1) 电容器在 200 Ω 和 2 000 Ω 的阻值下放电时电流的变化特性.

探究电容器放电时电流变化特性的实验中,将微电流传感器的接头调换方向,使之与充电方向相同,分别测得电容器在不同阻值下放电时电流的变化曲线,如图 15~16 所示.当电阻为

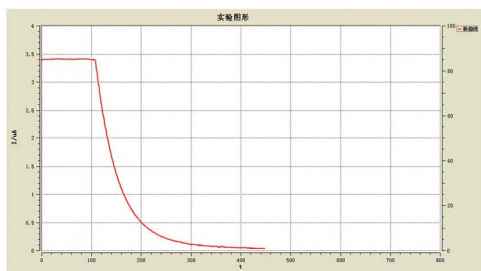


图 15 200 Ω 时电容器放电的 I-t 图像

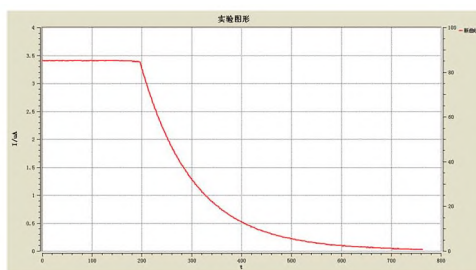


图 16 2 000 Ω 时电容器放电 I-t 图像

200 Ω 时,电流从最大值减小为 0 的时间 $t_1 = 20$ s,当电阻为 2 000 Ω 时,电流从最大值减小为零的时间 $t_2 = 40$ s,即电容器放电时,增大电阻使电流减小到零的时间延长了 20 s.

2) 电容器在 200 Ω 和 2 000 Ω 的阻值下放电时电压的变化特性.

探究电容器放电时电压变化特性的实验中,利用电压传感器分别测得电容器在不同阻值下放电时电压的变化曲线,如图 17~18 所示.当电阻为 200 Ω 时,电压从最大值减小为零的时间 $t_3 = 5$ s,当电阻为 2 000 Ω 时,电压从最大值减小为零的时间 $t_4 = 27$ s,即电容器放电时,增大电阻使电压减小到零的时间延长了 22 s.

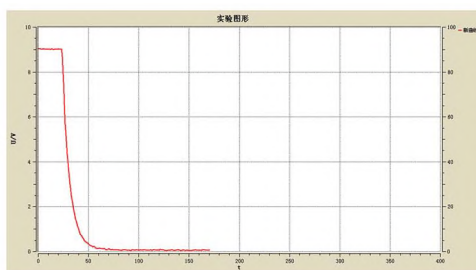


图 17 200 Ω 时电容器放电的 U-t 图像

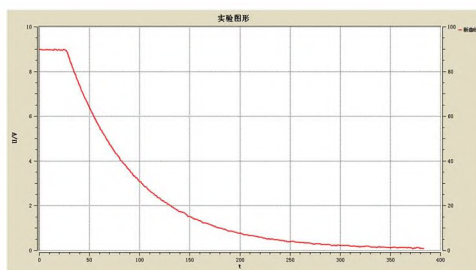


图 18 2 000 Ω 时电容器放电的 U-t 图像

结论:电容器放电时,增大电阻会延缓放电时间,即通过即插式可调电阻改变放电电路中阻值的大小,可以控制电容器放电的时间.

4 结束语

利用 DIS 实验系统测量并分析了电容器充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]