

利用传感器观察电容器充电放电现象的实验方案

李兆锋 李琪 康建华

(对外经济贸易大学附属中学 北京 100102)

(收稿日期:2018-09-04)

摘要:从理论角度对电容器充电放电过程进行分析,提出利用传感器和计算机观察电容器充电放电现象的实验方案,对实验中可能出现的问题进行分析讨论并提出建议.

关键词:传感器 电容器 充电 放电 实验方案

1 问题的提出

电容器是一个重要的电学元件,电容器的应用是高中物理教学的重点内容之一.在新的《普通高中物理课程标准》(2017年版)中,要求学生“观察常见的电容器,了解电容器的电容,观察电容器的充电放电现象,能举例说明电容器的应用”.与“旧课标”相比较,“新课标”注重对学生物理学科核心素养的培养,增加了“观察电容器的充电放电现象”的教学要求.但是,如何通过实验观察电容器的充电放电现象,在现行各版本高中物理教材中均没有给出具体的实验方案.

实验观察电容器充电放电过程中电流及电压随时间的变化,利用传统的实验仪器不能够实时记录数据并直观地呈现这一过程的变化规律.将物理实验与数字信息化系统结合,利用传感器实时记录实验数据、利用计算机处理实验数据,可以得到电容器充电放电过程中电压及电流随时间变化的图像,从而直观地反映电容器的充电放电过程.

本实验方案着重于利用传感器及 KDIS 软件,直观地呈现电容器充电放电过程中电压及电流随时间的变化情况,力求得到效果良好的实验结果,便于在教学一线的师生中推广使用.

2 理论分析

2.1 RC 电路的暂态过程

电容器的充电放电过程可以通过 RC 电路的暂态过程得以实现,RC 电路的暂态过程就是电容器 C 通过电阻 R 的充电或者放电的过程.讨论这个过程

时,可以先分析电容器的带电荷量随时间的变化规律 $q(t)$,进而得到电容器充电放电过程中电压随时间的变化规律 $u_C(t)$ 以及电流随时间的变化规律 $i_C(t)$.

如图 1 所示为 RC 电路电容器充电放电的原理图.将一个电容和一个电阻串联构成 RC 电路,当 RC 电路与直流电源连接时,电源通过电阻 R 给电容器 C 充电;当 RC 电路与导线连接时,充电后电容器 C 通过电阻 R 放电.通过理论推导,可以得到在 RC 电路充电放电过程中 u_C 和 i_C 随时间 t 变化的规律.

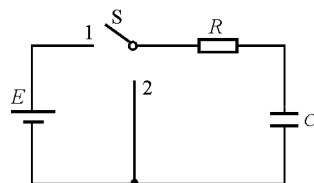


图 1 电容器充电放电原理图

在图 1 所示的电路中,将单刀双掷开关接 1 位置,电容器被充电.在忽略电源内阻的情况下,电源电动势为电容器 C 两极板上电压与电阻 R 上电势降落之和,即

$$E = \frac{q}{C} + iR \quad (1)$$

其中 i 为电路中的瞬时电流.将 $i = \frac{dq}{dt}$ 代入式(1),可得到充电过程中,关于电荷量 q 的一阶常系数微分方程

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E$$

$$q|_{t=0} = 0$$

解得

$$q = CE(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

式(2)为充电过程中电容器的电荷量 q 与时间 t 的函数关系式.

在图1所示的电路中,当单刀双掷开关接1位置电路达到稳态后(即充电结束),此时电容器的电荷量为 $q_0 = CE$.再将单刀双掷开关接2位置,则电容器开始通过电阻 R 放电,并且 $t=0$ 时, $q_0 = CE$.在放电过程中,电源未接入电路,则式(1)中 $E=0$,即

$$\frac{q}{C} + iR = 0 \quad (3)$$

同理,将 $i = \frac{dq}{dt}$ 带入式(3),得到放电过程中电荷量 q 的一阶常系数微分方程

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

$$q|_{t=0} = q_0$$

解得

$$q = CE e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

式(4)为放电过程中电容器的电荷量 q 与时间 t 的函数关系式.

由式(2)和式(4)可以看出,在 RC 电路的充电和放电过程中,电荷量 q 随时间 t 均按指数规律变化,且不可能发生突变.

在充电和放电过程中,电容器上的电压均为 $u_C = \frac{q}{C}$,分别将式(2)和式(4)代入,则充电过程中电容器上的电压为

$$u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (5)$$

放电过程电容器上的电压为

$$u_C = E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

分析式(5)和式(6)可知,在充电放电过程中,电容器上的电压随时间的变化规律与电荷量随时间的变化规律一样,都不会发生突变,均随时间按指数规律逐渐变化.

电容器在充电放电过程中,由于两极板上电荷量的变化,电路中出现了充电电流和放电电流,电路

中的电流为 $i = \frac{dq}{dt}$.分别将式(2)和式(4)代入,则

充电过程中电路中的电流为

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

放电过程中电路中的电流为

$$i_C = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (8)$$

分析式(7)和式(8)可知,当 $t=0$ 时,充电放电电流均达到最大 $i_{\max} = \frac{E}{R}$.可见, RC 电路在电容器

充电放电过程中电流在 $t=0$ 时刻从零突变为最大值,之后电流从最大值按指数规律逐渐减小为零,并且充电电流与放电电流的方向相反.

2.2 RC 电路中电容器充电放电时间

由上面的讨论可知,电容器在充电放电过程中,其电荷量、电压及电流均随时间变化.为了讨论充电放电的快慢,可令 $\tau = RC$, τ 称为 RC 电路的时间常数,电容器充电放电的快慢仅由时间常量 τ 决定.以放电过程为例,当 $t = \tau = RC$ 时,由式(6)可得

$$u_C = E e^{-1} \approx 0.368E$$

上式说明, τ 表示放电过程中 u_C 由 E 衰减到 E 的36.8%所需要的时间.同理可知,时间常数 τ 的值越大, u_C 的变化越慢,即电容器充电放电进行的越慢,通过改变时间常量 τ 的数值,可以改变电容器的充电放电时间.

在理论上,电容器的充电放电时间应接近无限长,在实际中,一般认为当充电放电时间达到 $3\tau \sim 5\tau$ 时,充电放电过程基本完成.

2.3 RC 电路电容器充电放电过程中电压和电流随时间变化的图像

根据式(5)、式(6)、式(7)和式(8),利用Mathematica软件,拟合电容器充电放电过程中电压、电流随时间变化的函数图像,函数图像分别如图2、图3、图4和图5所示.

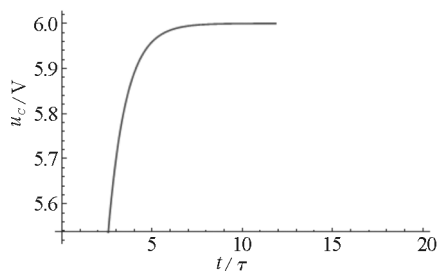


图2 充电 u_C-t 函数图像

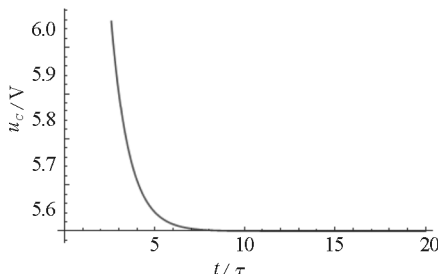
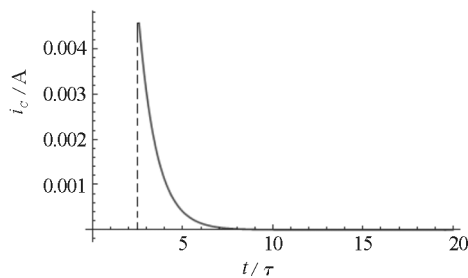
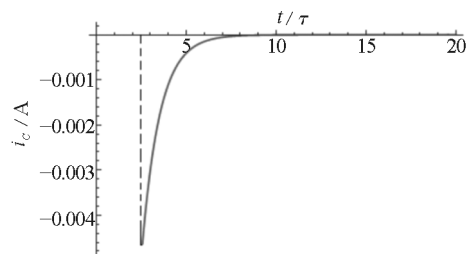


图3 放电 u_C-t 函数图像

图4 充电 $i_c - t$ 函数图像图5 放电 $i_c - t$ 函数图像

3 实验方案

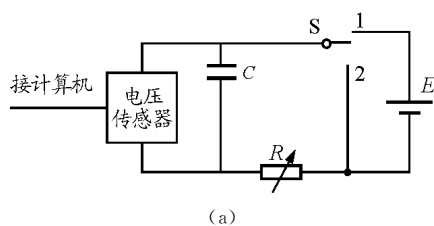
3.1 实验设计

(1) 实验目的

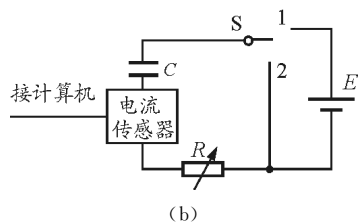
观察和记录电容器充电放电过程中电压、电流随时间变化的图像。

(2) 实验原理

分别利用如图6所示的RC电路,通过选择适当的 R, C 数值控制电容器充电放电的时间,利用电压传感器、电流传感器以及KDIS软件,观察和记录电容器在充电放电过程中电压、电流随时间变化的图像。



(a)



(b)

图6 RC电路

(3) 实验仪器和器材

计算机及KDIS软件,电压传感器和电流传感

器,电容器(电容 $1 \times 10^4 \mu\text{F}$),电阻箱(100Ω),学生电源,单刀双掷开关,导线等。

3.2 实验过程 实验操作及实验结果

(1) 观察电容器充电放电过程中电压随时间的变化

1) 将电压传感器与数据采集器及计算机相连接后,与电容器并联接在如图6(a)所示的电路中;

2) 打开KDIS软件,点击“加载项”,设定电压传感器的采集时间为 0.05 s ,并且将电压传感器调零;

3) 将学生电源调至直流 6 V ,电阻箱的电阻调节为 100Ω ,此时时间常量

$$\tau = 1.0 \text{ s}$$

电容器充电放电时间约为 $3.0 \sim 5.0 \text{ s}$;

4) 在KDIS软件中先点击“制表”,再点击“开始实验”,待电压传感器稳定后,将开关S向1位置闭合,电容器开始充电,通过计算机观察电容器充电时的 $u_c - t$ 图像;

5) 观察电容器充电现象后,将开关S向2位置闭合,电容器开始放电,通过计算机观察电容器放电时的 $u_c - t$ 图像;

6) 将电容器充电放电图像记录保存后,点击“停止实验”,实验结束。

电容器充电放电过程中电压随时间变化的实验结果如图7所示。

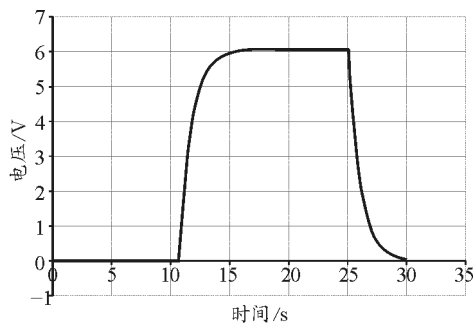


图7 电容器充电放电过程中电压随时间变化的图像

(2) 观察电容器充电放电过程中电流随时间的变化

首先将电流传感器与数据采集器及计算机连接,再与电容器串联接在如图6(b)所示的电路中;其他操作步骤与过程(1)基本相同。

电容器充电放电过程中电流随时间变化的实验结果如图8所示。

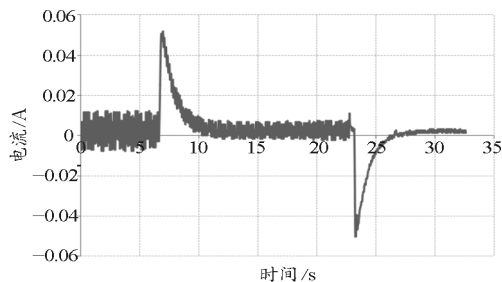


图8 电容器充电放电过程中电流随时间变化的图像

3.3 问题与讨论

实验时由于传感器自身原因及实验环境的影响,电流传感器不能准确调零,如图9所示,导致未闭合开关时,电流传感器记录的图像如图10所示。



图9 实验设置窗口

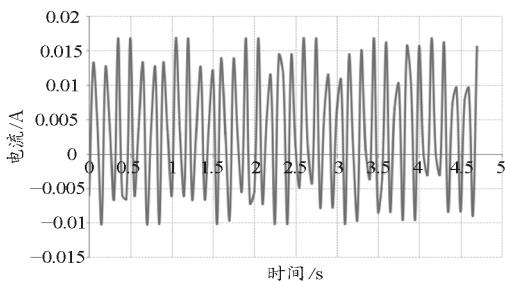


图10 电流传感器记录的电流随时间变化的图像

经过多次实验,发现电流传感器采集时间越短,图像效果越好。但是,由于仪器本身的限制或者其他未知的原因,电流随时间变化的图像没能达到非常满意的效果。

4 结束语

利用传感器,研究RC电路暂态过程中电流及电压随时间的变化,并将这一变化通过计算机软件记录并拟合成图像,能够直观地呈现电容器的充电放电过程。实验过程简单,易于学生操作,能够帮助学生了解电容器的工作过程,有助于提高学生物理的兴趣,对培养学生物理学科核心素养起到了积极作用。

本实验方案着重于利用传感器及KDIS软件直观地呈现电容器充电放电过程中电压及电流随时间的变化规律,实验设计合理可行,实验数据真实可靠,实验效果良好。希望本文能为同行提供参考,更希望得到大家的批评指正。

参考文献

- 1 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准. 北京: 人民教育出版社, 2018. 19
- 2 赵凯华, 陈熙谋. 新概念物理教程电磁学. 北京: 高等教育出版社, 2004. 336 ~ 337
- 3 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学. 北京: 高等教育出版社, 2012. 264 ~ 266

An Experimental Scheme on Observing the Charging and Discharging Phenomena of Capacitors Using Sensors

Li Zhaofeng Li Qi Kang Jianhua

(The Affiliated High School to UIBE, Beijing 100102)

Abstract: This article analyzes the charging and discharging process of capacitors from a theoretical perspective and proposes an experimental scheme for observing the charging and discharging phenomena of capacitors by using sensors and computers. The potential problems in the experiment and possible solutions are also analyzed and discussed in this article.

Key words: sensor; capacitor; charging; discharging; experimental scheme