



# 非理想电容器

## ——第51届国际物理奥林匹克竞赛实验第1题

刘丽飒 宋峰

(南开大学物理科学学院 300071)

原计划2020年7月举行的第51届国际物理奥林匹克竞赛由于疫情延后于2021年7月17日至25日在立陶宛举行。本次实验考试仪器由立陶宛邮寄到各国或者地区线下进行。本届竞赛的实验考试时间总计5小时,总分20分。实验第1题是“非理想电容器”,10分;实验第2题“发光二极管”,10分。“非理想电容器”题目主要内容为测量不同温度下非理想电容器的微分电容。与其他几届由基础测量设备与基本实验原件组成的实验仪器不同,本实验考试仪器主要是方便邮寄的集成化电路板和平板电脑,部分实验操作通过平板电脑上的软件进行,很多学生并不适应这种实验方式。为此,本文不吝篇幅详细介绍了考试软件操作界面。

### 1. 实验装置与考试软件操作界面介绍

由于实验装置与考试软件操作界面是两道实验题公用的,在本实验题目的操作中有些原件和操作界面可能用不到。题目所用电路板等实验器材如图1所示。

图1中,1所示为含有待测元件和测量模块的电路板。其中,a为2个相同的+9V恒压源端子(标注为+9V)和2个相同的-9V的恒压源端子(标注为-9V);b为2个相同的接地端子(标注为GND);c为2个相同的电容端子(标注为IN);d为电容C1或C2的切换开关(标注为SW1);e为高阻抗电压表,其内置在电路板中,外部不可见,因此无法在图中标出位

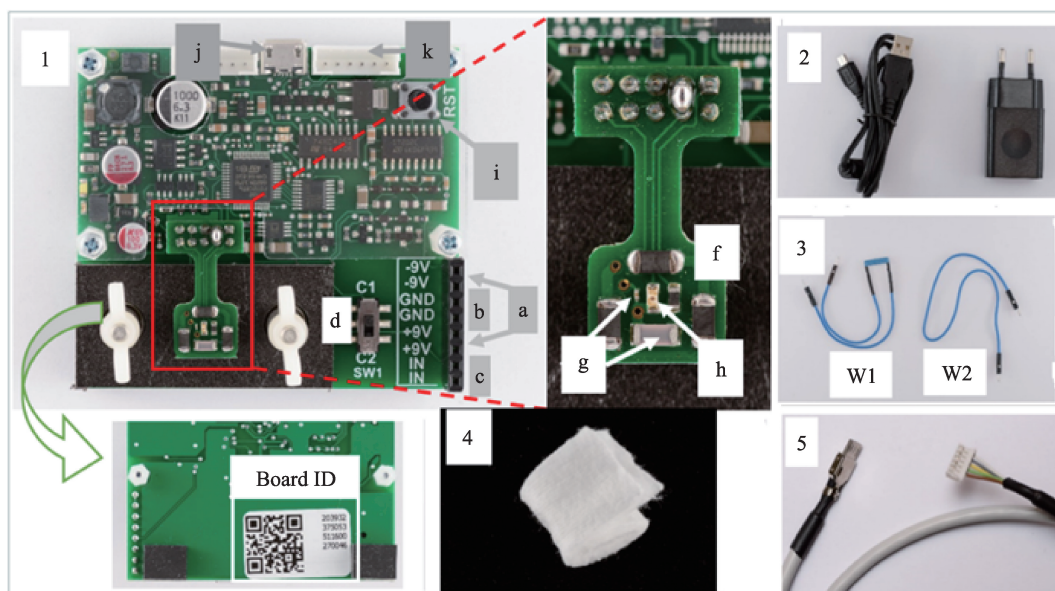


图1 实验装置

置;右侧放大图中f为恒温器,带有加热器和温度传感器;g为待测电容器C1和C2;h为待测发光二极管(LED),与恒流源和电压表相连;i为重置按钮(标注为RST);j为USB供电接口;k为六针数据线接口,用于连接平板电脑。

图1中,2所示为带有USB和Micro-B接线的充电器;3所示为接有100MQ电阻R的跳线W1和无电阻的跳线W2;4所示为恒温器的绝热材料;5所示为连接电路板与平板电脑数据线。另外考场还提供温度计。

图1中f恒温器的温度由NTC(负温度系数)热敏电阻测量,如图2所示。该热敏电阻的电阻值与绝对温度(以开尔文为单位的)的关系为

$$R(T) = R_0 e^{B/T} \quad (1)$$

其中, $B=3500\text{ K}$ , $R_0$ 是常量,可由已知的环境温度算出其数值,该数值对第51届国际物理奥林匹克竞赛实验第1题和第2题都是必需的。恒温器的温度可以通过APP软件设置调节加热电流控制。每次改变加热电流后,需等待一段时间,让系统达到稳定的温度。为使系统达到稳定的热平衡状态,需在恒温器上放置一层绝热材料。如图3所示,绝热材料由一块小塑料板压住,通过2个螺钉固定。假设恒温器上的电容器、热敏电阻和LED等元件之间的热平衡可瞬时达到,没有明显的延迟。

实验注意事项:避免损坏电路板和插座,确保插头正确插入,不要用力过猛。液体会对电子产品产生破坏,所以在实验装置附近处理液体时(如饮用水)要小心。不要往电子产品上洒上液体。

设备还包括运行IPhO2021实验程序的触摸屏

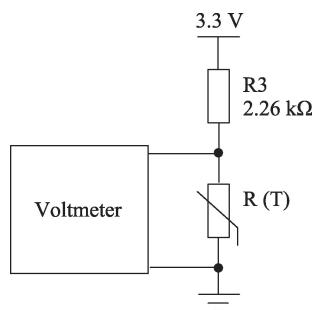


图2 热敏电阻测试电路

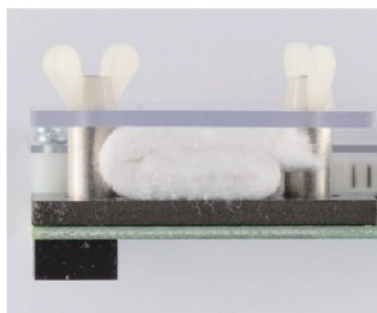


图3 绝热材料固定照片

平板电脑。实验软件可以通过点击图4所示的图标,从平板电脑的主屏幕启动。然后执行以下三个步骤:(1)使用充电器为电路板供电;(2)使用连接线6针一端连接电路板和Micro-USB一端连接平板电脑;(3)电路板重置需要10秒,之后请在程序内确认USB访问状态。



图4 实验考试软件图标

注意:如果在任何时刻出现以下情况:

- (1) 无论是在“检查状态”还是测量模式下,电路不响应或不返回测量值,
- (2) 热敏电阻电压没有变化或者LED在最大电流下也不发光,

请按下电路板上RESET按钮,执行步骤(3)“确认USB访问……”。

如果问题依然没有解决。尝试如下几种操作:点击两次后退键退出应用程序;拔掉电路板的插头;再次打开应用程序;重新连接电路板并执行前述步骤(3)。

考试程序的主窗口如图5所示。图中各控件用数字和字母标注,作用罗列如下:

- 1: 点击, 开始一次测量, 再次点击停止测量。
- 2: 打开开关时, 屏幕显示实时测量值。
- 3: 弹出设置页面。
- 4: 弹出设置的简短摘要。
- 5: 保存或删除测量标题。
- 6: 以新名称保存新测量或选定的测量。
- 7: 删除选定的测量值。
- 8: 选择先前保存的测量。
- 9,10,11: 键盘输入加热电流  $i_H$ , LED 电流  $i_L$ , LED 电流脉冲持续时间  $t_L$  值。空值表示 0。 $t_L=0$  表示恒定直流电。
- 12、13、14: 拉动以改变相应的值(其中 LED 电流呈指数级变化!)
- 15: 打开函数编辑器。
- 16,17,18: 选择测量表各列的变量或函数。
- 19: 测量表显示区域。
- 20: 点击可在图表区域中重新绘制测量值。
- 21,22: X 轴最小和最大值(可键盘输入并按下 20 按钮重绘)。
- 23,24: Y 轴的最小和最大值。
- 25,27: 选择图表的 Y 和 X 轴。
- 26: 选择要绘制在图表上的测量值。
- 28: 图表区域。
- BB: Android 操作系统中后退按钮, 点击两次关闭应用程序。

### 设置扫描 I-V 特性曲线测量

对于实验 2, 通过主窗口的设置按钮 3, 可以控制 LED 参数。弹出的设置页面如图 6 所示。通过按钮 3 弹出页面可以设置扫描 I-V 测量曲线的电流变化参数。在下面的描述, 图 6 中各行设置名称(加黑的英文)的直译用加引号的中文表示, 图中的设定值(非加黑的英文)及其作用对应写在设置名称之后。从上到下分别为: “显示控制项范围” 可以表示页面控制项的作用范围为实验 2(LAB2) 或所有实验。“测量的时间步长” 图中为 140 毫秒。“测量完成后关闭 LED” 的选择开关。“测量完成时关闭加热电流” 的选择开关。“扫描测量” 启动开关, 此设置通过增加电流, 在扫描模式下相应的电压测量结果, 可以绘制出 I-V 测量曲线。“扫描测量”(红色英文): “最低扫描测量电流” 图中为 0.1 毫安; “最大扫描测量电流” 图中为 50 毫安; 分别设置扫描测量时 LED 电流的起始值和结束值。“扫描测量步数” 图中为 51 步。“根据几何级数增加电流” 开关。“设置脉冲电流” 开关, 打开状态下可以设置电流脉宽时间, 图中为不设置, 空(null)毫秒, 可以让 LED 电流的每个值按设定的时间脉冲增加。上述设置完成后, 测量时 LED 电流将为 0 mA, 1 mA, …49 mA 和 50 mA 增长。按下图中最下面的后退键即可返回主窗口, 开始测量 I-V 曲线。

点击 15 函数编辑按钮, 可以打开图 7 所示的功



图 5 APP 主窗口



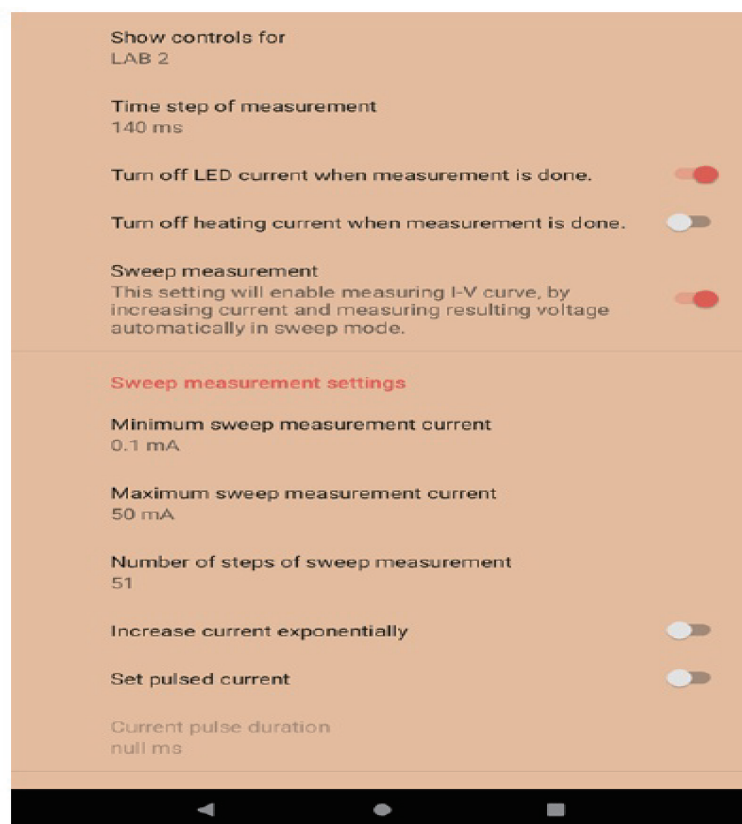


图6 设置页面

能编辑窗口,为电路板上的利用测量量编辑函数算式。这些量包括:电容  $C_1$  或  $C_2$  的电压(标注为  $u_C$ , 单位 V),热敏电阻的电压(标注为  $u_T$ ,单位 V), LED 的电压(标注为  $u_L$ ,单位 V),各电压对时间的导数(分别标注为  $du_C$ 、 $du_T$  和  $du_L$ ,单位为 V/s),LED 的电流(标注为  $i_L$ ,单位 mA),加热电流(标注为  $i_H$ ,单位 mA),时间(标注为  $t$ ,单位 s)。

图7中显示了可以使用的数学函数辅助按钮。也

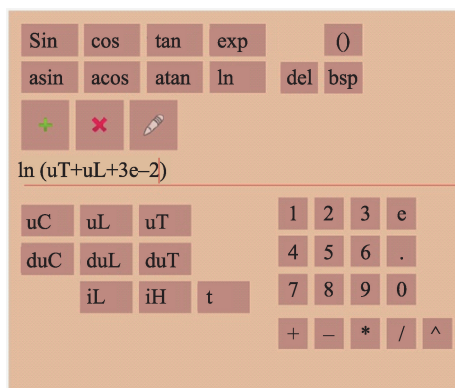


图7 函数编辑页面

可以用标准 Android 键盘输入自定义函数,然后按下绿色加号按钮保存。可以用图形或表格保存。铅笔按钮代表选择已有的函数。按下红色×键可以删除选中的功能。数字采用十进制格式(例如 25.02)和科学格式(例如  $2.502 \times 10^1$ )都可以使用。图中\*是乘法运算符,/是除法运算符,^是幂运算符。

完成的测量可以通过在主窗口控件5中输入文件名并按附近的绿色+按钮6来保存。原始测量数据被保存后可以在数据图中任何轴上显示。通过点击图表角落附近区域26处,如图8,可以显示保存的测量数据。

绘制的数据图可以平移/缩放查看。在数据图上点击鼠标,会显示最近的测量点并显示其坐标。通过点击现有的轴标签(图表区域25和27)来选择轴,界面如图9。

本题与传统的实验题目不一样,是通过软件操作来操控实验。需要通过大量阅读,来了解如何使用软件以及如何操作。操作说明非常详细,只要认



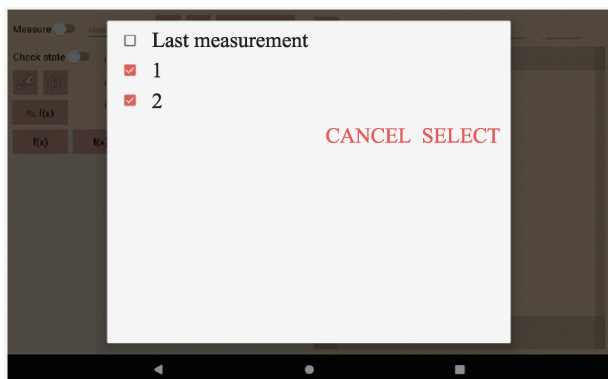


图8 数据选择页面

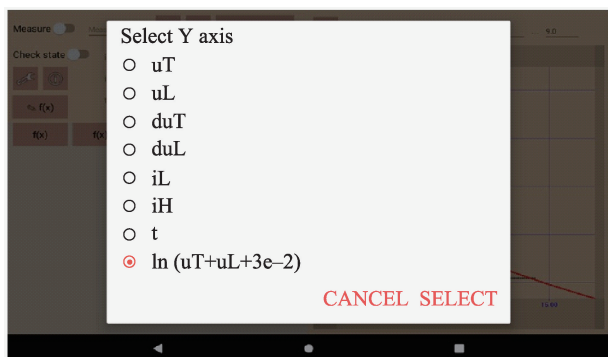


图9 坐标轴参数选择界面

真阅读,正确操作,就没有什么问题。

## 2. 实验要求

本实验旨在研究电容器的性质。电容器的电容(在本实验中总是指微分电容)可在与电阻  $R_1$  相连的情况下由电容的充电曲线  $U(t)$  来确定。根据所用的电路,需要测量电容器的充电电流与电压的关系  $I(U)$  并用于确定电容:

$$C(U) = \frac{dq}{dU} = \frac{Idt}{dU} = \frac{I(U)}{dU/dt} \quad (2)$$

本实验的电路如图 10 所示。电路板上的开关  $S_1$  可用于在电容器  $C_1$  和  $C_2$  之间切换。开关的中间位置没有任何作用,在实验中无需使用。

注意:其中一个电容器中包含有电介质,其介电常数依赖于电压变化速率。为了使电压变化速率尽可能保持稳定,测量正电压下的数据时,应先让电容器充电至  $9V$ ,然后在下降到  $-9V$  的过程中进行测量;而在测量负电压下的数据

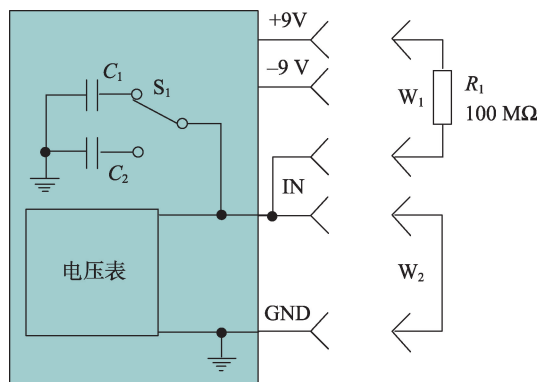


图10 实验1电路图

时,应先让电容器充电至  $-9V$ ,然后在上升到  $9V$  的过程中进行测量。测量的电容值会受电容器先前状态的影响,所以在测量之初,电容器在起始电压至少应该保持 10 秒。

### A 部分. 室温下的电容器 (4.0 分)

测量并画出室温下电容器  $C_1$  和  $C_2$  的电容与电压的关系(所有曲线用相同的坐标轴画在同一张坐标纸上)。

A.1 测量并在  $-7V$  到  $7V$  的电压范围内分别画出  $C_1(U)$  和  $C_2(U)$ 。在表 1 上写下  $0V, 3V$  和  $6V$  时的  $C_1$  和  $C_2$  值。写出用原始测量数据计算电容的公式。同时记下电路板号(board ID)和室温数值。(2.3 分)

A.2 求电压  $U_{\max \text{ change}}$ , 在该电压时电容器的相对电容随电压变化  $(\frac{dC(U)}{C(U)dU})$  最快。在答题纸上写下哪个电容器( $C_1$  或  $C_2$ )的变化最快,以及观察到最快变化时的电压  $U_{\max \text{ change}}$ 。(0.5 分)

A.3 电容器  $C_1$  和  $C_2$  在  $6V$  时的电荷  $q_1$  和  $q_2$  是多少? (1.2 分)

A 部分答题卡中提供了坐标纸。学生需要依据电路图 10,按照正确的操作顺序完成电路板与

表1 A.1 数据测量表

$U$	$C_1$	$C_2$
0 V		
3 V		
6 V		

W1与W2的连接。电容器的充电电流无法测得,需要利用其他可测量物理量取得。本部分的实验需要学生了解传统实验中万用表测量电容的过程,手动模拟这个过程两个阶段。电容的充电与放电都需要经过一定的时间。题目中还给出测量时,需要在初始电压停留的时间间隔。通过APP进行相应的设置,测量界面绘制出的电压 $u_C$ 与 $t$ 的数据表与数据曲线,提取相关数据,用于在答题卡纸上绘制电容器C1和C2的电容与电压的关系曲线。利用绘制好的曲线解答A1-A3部分的数据。因为这是考试的第一部分,学生需要对软件操作与数据提取进行熟悉,必要时需要进行一些测试尝试,会花费一定的时间。前面对操作界面的设置,很多是以LED测量要求举例,需要先读懂,然后根据本部分测试要求进行相关的设置与操作。

### B部分. 校准负温度系数 (NTC) 热敏电阻(1分)

测量在已知室温下NTC热敏电阻的电压。室温数值从考场的温度计上读取。电阻随温度变化参考公式(1),测试电路参考图2。

B部分答题卡中要求给出 $R_0$ 的计算公式与计算数值。需要APP进行相应的设置测量并显示出NTC热敏电阻电压测量数据 $u_T$ 。按照电路图2,依据分压原理,计算出室温下NTC热敏电阻的阻值。利用公式(1)与相关参数计算 $R_0$ 。这一本部分的实验操作没有难度,只是为C部分中的温度测量做准备。

### C部分 不同温度下的电容器(3分)

C.1 分别在 $40^\circ\text{C}$ 、 $65^\circ\text{C}$ 和 $85^\circ\text{C}$ 时测量,并绘制 $-7\text{V}$ 至 $7\text{V}$ 电压范围内的 $C_1(U)$ 和 $C_2(U)$ 。(1.3分)

C.2 分别对 $0\text{V}$ 和 $6\text{V}$ ,绘制从室温到 $85^\circ\text{C}$ 的 $C_1(T)$ 和 $C_2(T)$ 随温度变化的曲线(0.5分)

C.3 在答题纸上写下电容器C1和电容器C2分别在 $0\text{V}$ 和 $6\text{V}$ 时, $85^\circ\text{C}$ 下的电容相对于 $40^\circ\text{C}$ 时的电容的比值 $C(85^\circ\text{C})/C(40^\circ\text{C})$ 。

C部分答题卡中提供了C.1和C.2作答的坐标纸。要求通过APP设置加热电流为恒温器升温。其温度可以通过热敏电阻的电压显示。所以先要计算出题目要求测量温度对应的热敏电阻的电压 $u_T$ 值。在为恒温器升温的实验中,学生需要尝试设置加热电流 $i_H$ 为某个值,并让 $u_T$ 稳定在某个值。实验测量完成时系统会自动关闭加热电流,实验过程中需要关注 $u_T$ 值的实时变化,例如观察达到题目要求测量温度所对应的热敏电阻的电压后,热敏电阻的电压 $u_T$ 值是否稳定。这部分体现了学生依据实际情况制定实验方案的能力。在恒温器达到稳定的温度要求后再完成题目C.1要求的针对两个电容进行电容与电压关系测量,方法与A部分相同。题目C.2和C.3则是利用C.1以及A.1得出的数据绘制和计算即可。

### D部分测量误差的来源(2.0分)

在本实验之前的任务中,测量开始时需要长时间地充电。当起始充电时间较短时(0.1至10s)可能会有多种误差来源:1.漏电流。2.电容器中电介质的极化特性,该特性可以用依赖于过程时间尺度的介电常数来表示。

注意:隔热材料可能会吸收空气中的水分而导电。在进行漏电测量时去掉它。

确定测量C1和C2的主要误差来源。因为电容器漏电和电压表输入电流与电压密切相关,所以在电压接近 $9\text{V}$ 时估计这些误差。为了确定误差来源并估计误差,请确定该做哪些辅助测量,并确定在什么条件下进行这些测量。回答D.1和D.2题时,可参考下表2个例子的格式,指出你的测量条件、测量哪些量以及根据测量得出什么结论。

注意:下表只是如何描述你的测量的例子;你需要自行确定你测量的相关条件。

应该如何书写问题D.1和D.2的答案的示例:  
示例1.

本示例显示连接到测量电路的C1的电压变

化速率在9V时比在0V时更快。

开关S1可能的位置:C1、C2

IN 接线端可能的连接 : +9V、-9V、接地 (GND)、空置(Free)

初始设置:

开关S1位置	IN端口连接
C1	9V

过程:

步骤	开关S1位置	IN端口连接	持续时间 (s)	测量的量
1	C1	Free		$ duC(t)/dt $
2	C1	GND		
3	C1	Free		$ duC(t)/dt $

由数据可验证: $|duC(t)/dt|_1 > |duC(t)/dt|_3$

示例 2.

本示例显示 C1 在 9 V 时的电压变化速率大于从 0 V 开始持续 1000 秒的平均电压变化速率。

可能的开关S1位置:C1、C2

可能的 IN 端口连接 : +9 V、-9 V、接地 (GND)、空置(Free)

初始设置:

开关S1位置	IN端口连接
C1	9V

过程:

步骤	开关S1位置	IN端口连接	持续时间 (s)	测量的量
1	C1	Free		$ duC(t)/dt $
2	C1	GND		
3	C1	Free		$uC$
4	C1	Free	1000	
5	C1	Free		$uC$

由数据可验证:  $|duC(t)/dt|_1 > (uC|_3 - uC|_5)/1000$

D.1 通过测量确定 C1(9 V)的主要误差来源是什么? 在表格中写下测量的步骤。(1分)

D.2 通过测量确定 C2(9 V)的主要误差来源是什么? 在表格中写下测量的步骤。(1分)

答题卡:

开关S1可能的位置:C1、C2

IN 接线端可能的连接 : +9V、-9V、接地 (GND)、空置(Free)

初始设置:

开关S1位置	IN端口连接

步骤:

步骤	开关S1位置	IN端口连接	持续时间(s)	测量的量

主要错误来源(打钩):

1. 漏电流
2. 电容器介质的极化特性

D 部分是学生经验较少的误差测量。为了能测到误差这样的小量,在制订测量方案和测量条件时,要挑选合适的参数,尽可能扩大这些误差因素。漏电流是电容器电荷从极板流向环境。通常电容施加的电压越大,漏电流越大。施加电压时间越长,漏电流影响越小。实际电容器内介质极化会在内部产生少量自由电荷。电容器施加的电压越大,介质极化影响越大。施加电压时间越长,介质极化影响越小。题目已经明确要求对电容在高电压短时间内进行充电检测。答题卡只是让学生排查对电容 C1 和 C2 的测量中主要误差来源是漏电流和电容器介质的极化特性中的哪一个。学生可以依据测量结果选择误差主因是否是漏电流即可完成这部分题目。学生首先依据示例中提供的开关 S1 的位置和 IN 接线端连接选择,在初始位置表中填写测量条件。制定对比实验的方案。在实验操作上需要完成电路连接。通过 APP 设置测量保存  $uC$  与  $t$  的数据,分析对比实验结果。

\* \* \* \* \*

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞赛活动,并在答案公布前将您的解答发送至 [aosai@ihep.ac.cn](mailto:aosai@ihep.ac.cn) 邮箱。对于参与并答对每期题目的前 20 名读者,编辑部将赠阅 1 年《现代物理知识》杂志。