



# 非理想电容器

## ——第51届国际物理奥林匹克竞赛实验第1题解答

刘丽飒 宋峰

(南开大学物理科学学院 300071)

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。实验第1题:非理想电容器,10分。分为四部分:A、室温下的电容器,B、校准负温度系数(NTC)热敏电阻,C、不同温度下的电容器,D、测量误差的来源。本文在参考官方提供的答案和评分标准的基础上,补充介绍了操作过程中的数据变化,进行各种不同解答对比分析,以明确实验数据最优区间的科学依据;并以对程序操作结果截屏的方式,给出了部分原始数据图。

### A 部分. 室温下的电容器 (4.0 分)

题目的操作提示符合计算机程序控制操作实验设备的常规。学生在操作前先要确保设备软硬件的连接和运转是正常的。将电路板连好插座和平板电脑,打开平板上的考试程序,在程序内确认设备连接成功后进行实验。程序相关设置页面如图1所示,选择控制实验1,测试过程中保持加热电流关闭。图1中测试的时间间隔虽然可以改变,但程序运行时始终按0.140 s这个时间间隔运行。在图2的数据栏函数中先选择显示 $u_C$ ,对这个数据的实时变化进行观测,同时记录时间,以便后续作图使用。

电容器的充电电流无法通过直接测量测得,需利用其他可测量物理量推导出公式(1)

$$C(U) = \frac{I(U)}{dU/dt} = \frac{U_f - U(t)}{R1} / \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

此公式0.2分。

将S端置于C1,尝试用导线W1连接IN和GND,观察测量结果 $u_C$ ,可知C1的电压为 $-0.0038$  V左右,数据稳定无变化。这个结果表明对零电压的测

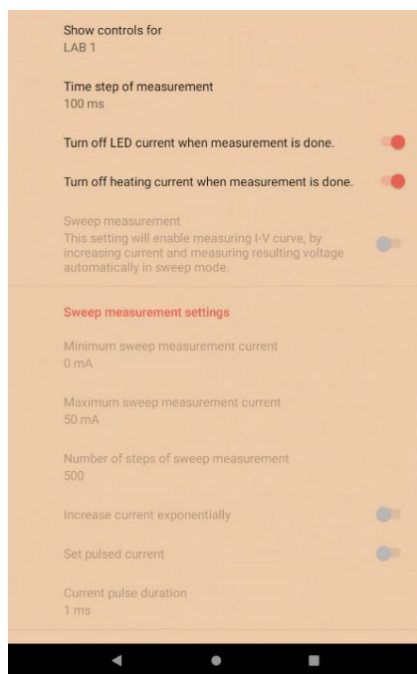


图1 实验1常温测量时的设置

量误差在 $10^{-3}$ 伏。用导线W1连接IN和 $-9$  V,观察测量结果 $u_C$ ,可知C1的电压为 $-8.936$  V左右,数据稳定无变化。此时电容完成充电,参考解答将这个最终电压标记为 $U_f$ 。用导线W2连接IN和 $9$  V,对电容进行放电测量,原始数据图见图2右侧。可以通过考试程序中的函数运算,对上述数据进行计算,在图2左侧数据列显示数值,在图2右侧显示图形,以便观察分析,完成题目要求。图3为C1放电过程中C1的计算数据以及 $C_1(U)$ 的图形示例。 $C_1(U)$ 基本恒定。很多学生用 $9$  V代替最终电压( $U_f$ )进行计算,得到 $C_1=101.9$  nF,与参考解答标准值(见本文表1)相比,误差在2%左右,落在评分标准的满分范围,并不影响成绩。

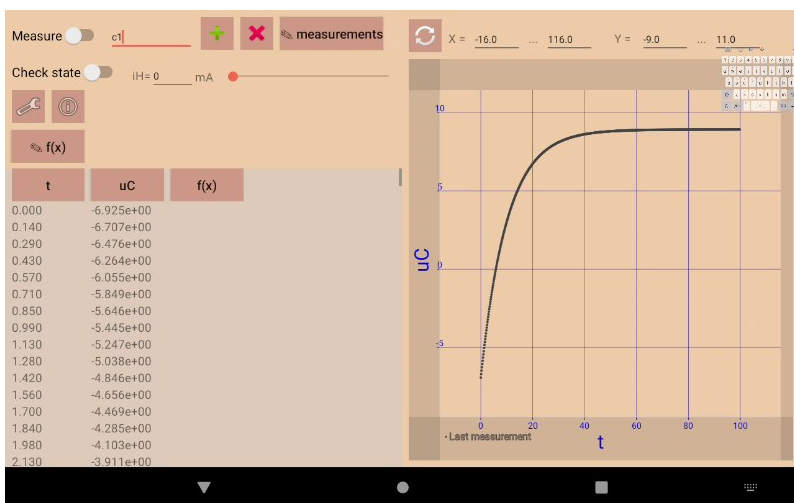


图2 常温下C1测量时电压变化数据图

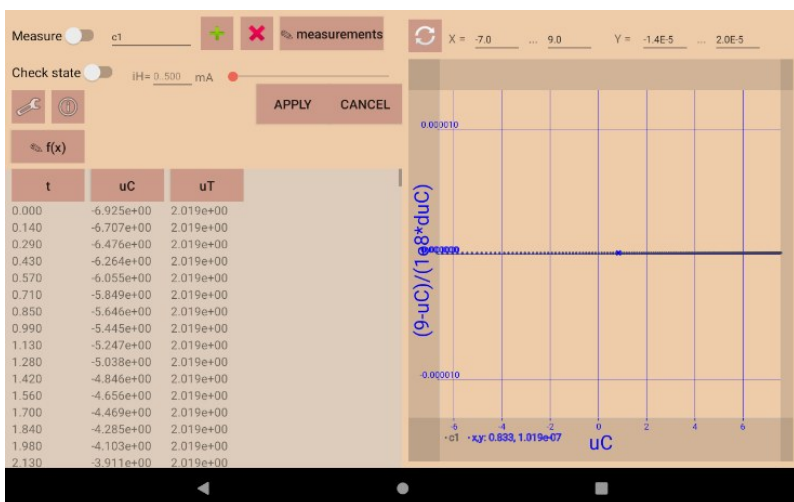


图3 常温下对C1测量C(U)原始数据图

将S端置于C2,用导线W1连接IN和-9V,按照题目中的注意事项提醒,时间停留10秒以上。再用导线W2连接IN和9V,对电容进行放电测量。电容数据图见图4。C2(U)测量值不恒定,表明它是含有电介质的非理性电容。此测量结果还表现为最高点不在0V,左右不对称。按题目描述这个电容测量的注意事项: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。所以图4只能保留负电压下这一段的测量数据。之后用导线

W1连接IN和9V,用导线W2连接IN和-9V,对正电压下电容进行数据测量。

读取部分相关测量数据,在一张图上画出C1(U)和C2(U),如图5所示,该题0.9分。评分标准指出,坐标轴、单位、作图区间合理为0.1分,画出(-7,7)V内C1(U)全部数据,误差在0.5%以内0.3分;如果只画出(-7,0)或(0,7)V内部分C1(U)数据,误差在0.5%以内0.1分;画出(-7,7)V内C2(U)全部数据,关于0V对称0.5分;仅画出图4,0.2分;只画出(-7,0)或(0,7)V内部分C2(U)数据,0分。

测量表1中C1数据0.2分,C2数据误差在20%以内满分1.0分,误差20%~30%得0.7分,误差30%~

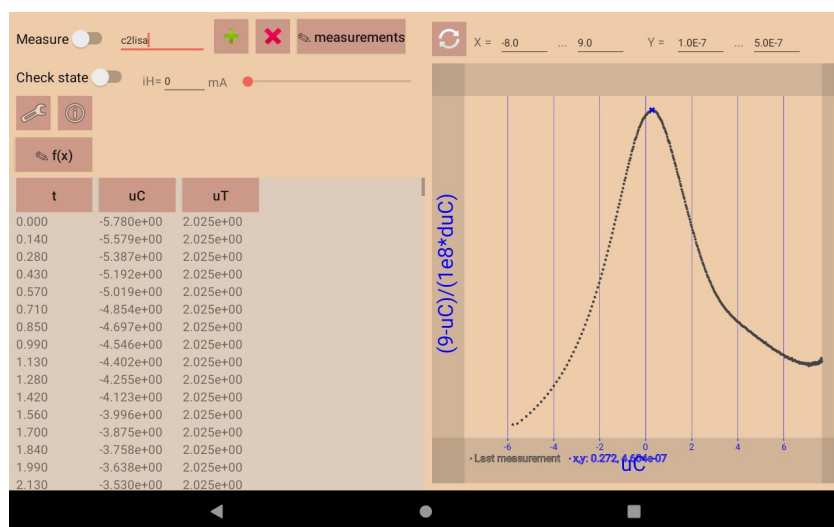


图4 常温下C2充电至9V再下降到-9V测量C(U)原始数据图

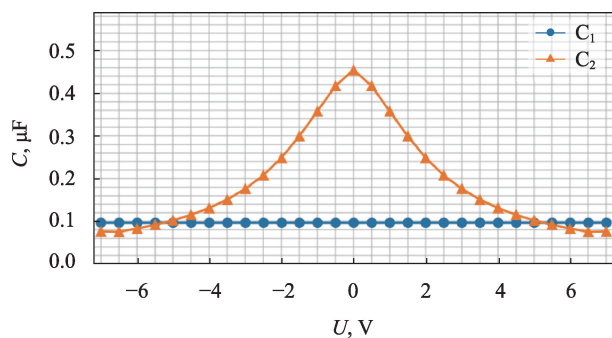


图5 A1部分坐标纸上的解答

表1 A.1数据测量表

U/V	C1/nF	C2/nF
0	100	473
3	100	183
6	100	86

40%得0.5分,误差20%~30%得0.2分。如果学生按图4计算C2值在3V的测量值偏差大于40%,6V的测量值偏差远超过50%,按评分标准只能评定为0分。

A1部分,应根据题目给出的C2电容的测量注意事项,熟悉测量软件的应用,实验操作上难度不大。题目中指出舍弃图4正电压测量下电容测量值的原因是电压变化速率不稳定。利用考试程序的功能,可以通过设置完成图6的输出观察电压变化速率。图6中数据列从左到右显示的物理量为时

间、电容C1的电压和uT值。从uT值可以看出图6是对高温下C2测量结果的分析(参考C部分解答)。观察电压变化速率在整个测量过程中的情况,电压的变化速率在接近9秒之后发生了较大改变。对照数据列,9.42秒时电压为-0.626V。观察图2、3、4中的时间数据,不难发现时间间隔偶有0.150秒,说明时间测量误差位在 $10^{-2}$ 秒,所以参考解答时间数据都只保留到 $10^{-2}$ 秒。

调取对电容C1的测量数据,进行分析,结果见图7。电压的变化速率在接近13秒之后发生了较大改变。对照数据列,12.96秒时电压为-0.151V(考虑到测量误差数据只保留到mV位)。通过上述数据分析电压的变化速率对电容C1的测量影响不如C2显著。

A2部分:因为C1电容值恒定,C1的相对电容随电压变化率 $\left(\frac{dC(U)}{C(U)dU}\right)$ 是0,C2的相对电容随电压变化率无法利用考试软件中的函数编辑计算数值。学生需要对图5中记录的电容以及电压变化数据进行初步计算,找到最大时可能的U区间,结果误差在10%以内即可得到满分0.5分。

利用图4,系统导出电容负电压测量区间C2在相邻时刻的值递减逐差得到 $dC/dt$ ,除以对应的 $C*duC$ 计算 $\frac{dC(U)/dt}{C(U)dU/dt}$ ,得到图8。相对电容随电

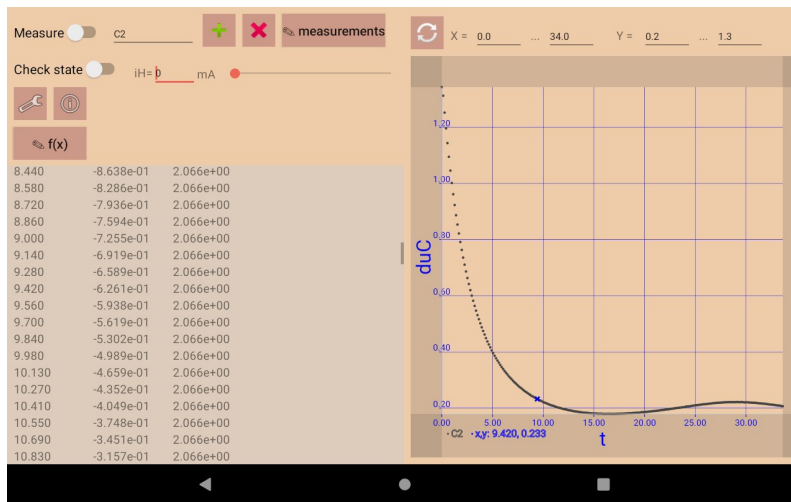


图6 C2 充电至9 V再下降到-9 V过程中电压变化速率分析

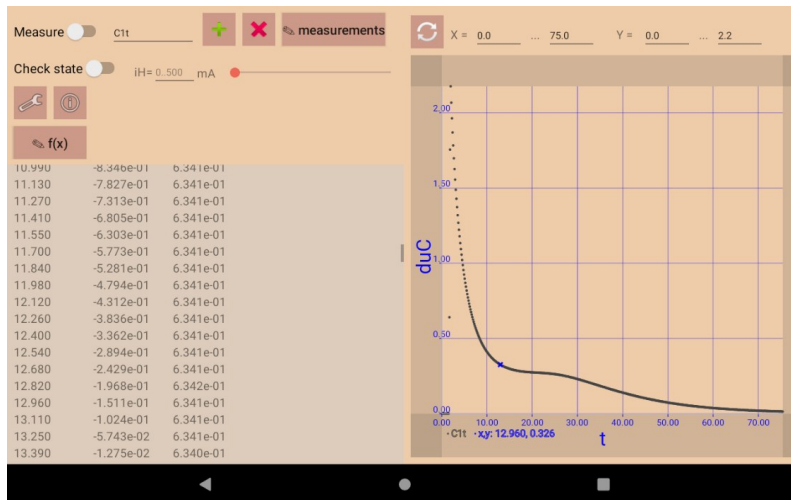


图7 C1(85°C)充电至9 V再下降到-9 V的过程中电压变化速率分析

压变化率在6秒之前稳定增长,6秒之后相对电容随电压变化率波动很大,平均值为下降趋势。5.91秒对应的电压为-1.609 V,6.05秒对应的电压为-1.561 V。参考解答指出:C2的相对电容随电压变化率大,最大相对电容随电压变化率对应的电压值为1.6 V。需要指明由于电容电压值正负对称,最大相对电容随电压变化率对应的电压值也可以是对应区间的负电压值。考场上学生利用计算器粗算的范围应该在附近,评分标准指明电压值在(1.46, 1.76)V区间满分,偏离此区间误差10%~15%,0.35分;15%~20%,0.25分;20%~25%,0.1分。

A2部分相对电容随电压变化率的变化趋势无法利用公式或者软件输出的图形进行简单地推理得出,只能踏实计算。有学生分析逻辑不严谨会造成估计错误,而失掉所有分数。如图6,实验中电压绝对值较小时电压变化率的改变,将引起C2值的误差增大。经过多次运算才能得到相对电容随电压变化率,误差迭代后,绝对值较小时电压对应的数据结果准确性会丧失,需探求总体变化趋势,结论才正确。如将个别数据值视作准确值,所得出的结论不一定能落在满分区间。例如:图8中时间在6.61秒的相对电容随电压变化率最大为5.28/V,对应电容电压-1.378 V;5.77秒相对电容随电压变化

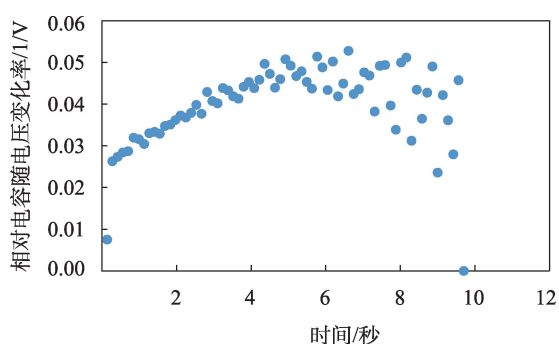


图8 C2的相对电容随电压变化率

率5.14/V,对应-1.658 V电压;8.16秒相对电容随电压变化率5.12/V,对应-0.936 V电压。若学生以这些测量值作答均会失分。

A3部分:电容电量即对应电压区域内C(U)曲线下的面积。在图5中数格子计算 $q_2$ 最直接,即:大约可拼为136个小格子,每小格代表 $0.02 \times 10^{-6} \times 0.5$  C。

$$q_1 = 0.100 \times 10^{-6} \times 6 = 6 \times 10^{-7} \text{ C}$$

$$q_2 = 136 \times 0.02 \times 10^{-6} \times 0.5 = 13.6 \times 10^{-7} \text{ C}$$

评分标准: $q_1=0.60 \mu\text{F}$ 误差0.5%以内,0.2分; $q_2=1.3 \mu\text{F}$ 误差10%以内,1.0分,误差10%~15%,0.7分;15%~20%,0.5分;20%~25%,0.2分。

B1部分:在A部分实验中,学生需要记录实验室温度计的室温,如22.9 °C,在查阅系统中存储数据时,在图2的左侧数据栏自动显示 $uT=2.187$  V。当然也可以选择在没有加热电流时实时显示测量 $uT$ 值。依据热敏电阻的测试电流图,依据分压原理,有

$$\frac{3.3}{uT} = \frac{R(T) + 2.26 \times 10^3}{R(T)}$$

求得

$$R(22.9) = 4.39 \times 10^3 = R_0 e^{B/22.9}$$

代入 $B=3500$  K,求得

$$R_0 = 0.0326 \Omega$$

按题目要求整理计算公式

$$R_0 = \frac{U_{T_0} R_3}{U - U_{T_0}} e^{-B/T_0}$$

其中 $U_{T_0}$ 为室温时的 $uT$ 值, $T_0$ 为温度计测量的室温值, $U=3.3$  V。

评分标准:公式0.7分, $R_0=0.0341 \Omega$ 。误差10%以内0.3分;误差10%~15%,0.2分;15%~25%,0.1分。

B部分实际利用实验室中的温度计,对热敏电阻温度测量装置进行定标的过程。在实验设计中很有意义。计算难度不大,但计算公式分值高。

C部分:在程序设置图1界面中关闭测试时关闭加热电流的选项。图2中iH设定为任意值,左侧函数列选择实时检测 $uT$ ,右侧图形显示 $uT(t)$ 曲线开始测试。如图9恒温器升温,初始时设置 $iH=240$  mA观察到 $uT$ 不断减小;之后设置 $iH=0$  mA,观察到 $uT$ 缓慢上升,说明保温棉不能完全阻止热量散失,温度持续下降;之后通过不断更改 $iH$ 设置,找到补偿温度散失时加热电流值。最后 $iH=55$  mA时 $uT$ 稳定在1.50 V附近。根据B1中的计算公式确定

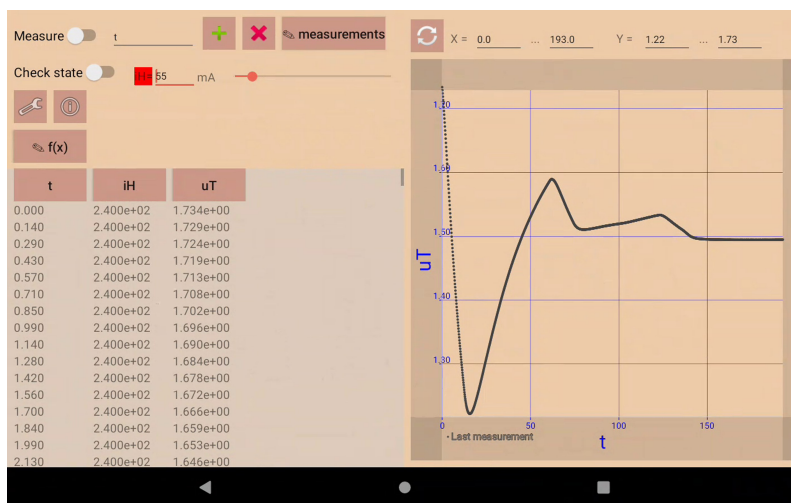


图9 对恒温器的控温尝试

40 °C, 65 °C 和 85 °C 时的  $uT$  值。按前述方法调整加热电流, 可以确保测量要求的  $uT$  值附近进行。图

10 与图 11 为在 65 °C 测试 C2 时两张原始数据测量的程序截图。

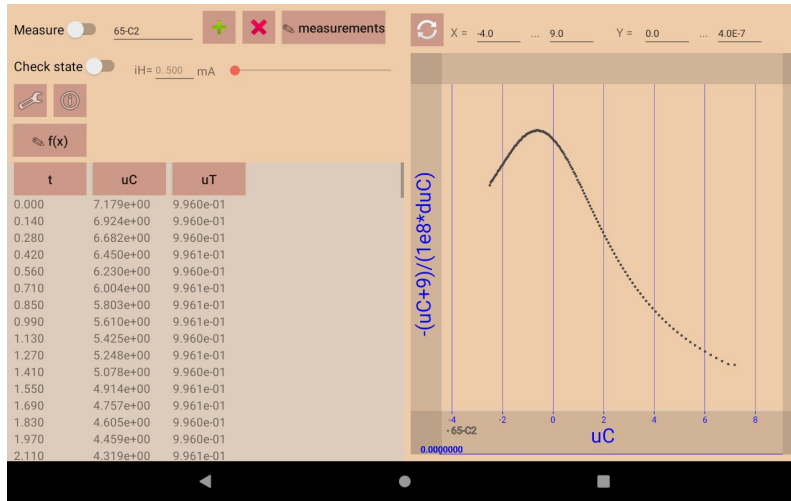


图 10 65 °C 时 C2 充电至 9 V 再下降到 -9 V 的测试截图

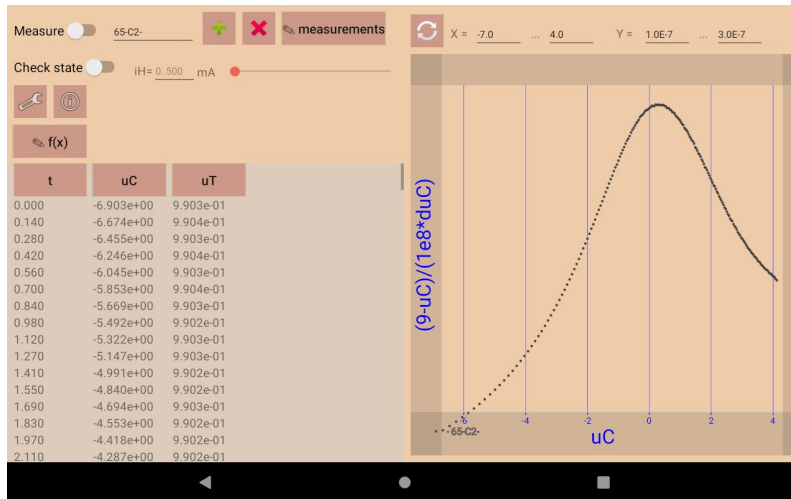


图 11 65 °C 时 C2 充电至 -9 V 再上升到 9 V 的测试截图

选取图 10 中 0~6V 和图 11 中 -6~0V 的 C2 数据点即可绘制成图 12 中的相应曲线。评分标准: C1 部分 1.3 分, 其中坐标轴、单位、作图区间合理 0.1 分, C1 为直线 0.3 分, C2 曲线 0.9 分。C2 部分的绘图只需要将图 5 和图 12 中的数据点读取绘制成图 13, 0.5 分。其中坐标轴、单位、作图区间合理 0.1 分, C1 不是直线扣 0.2 分, 没画出室温对应的值扣 0.2 分。C3 部分的直接利用相应数据计算即可。  $C_1(85\text{ °C})/C_1(40\text{ °C})_{0V}=1.00$  误差 0.5% 的 0.2 分,  $C_1(85\text{ °C})/C_1(40\text{ °C})_{6V}=1.00$  误差 0.5% 的 0.2 分,  $C_2(85\text{ °C})/C_2(40\text{ °C})_{0V}=0.63$

误差小于 0.10% 的 0.4 分,  $C_2(85\text{ °C})/C_2(40\text{ °C})_{6V}=$

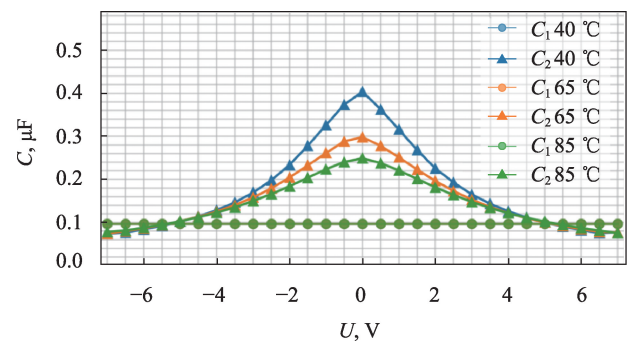


图 12 C1 部分坐标纸上的解答

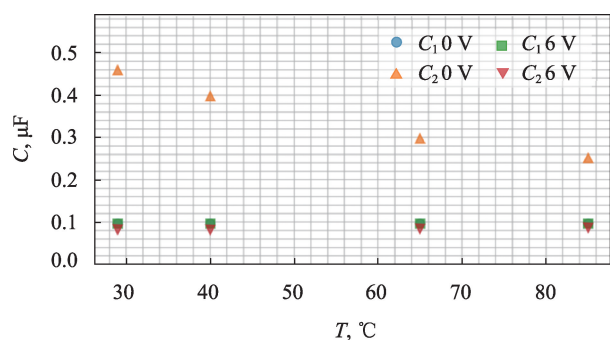


图13 C2部分坐标纸上的解答

1.06, 误差小于0.10%的0.4分。

C部分,找到补偿温度散失时加热电流值的实验思路有一定难度。在解答C3部分时有学生会认为数据量少而对其他温度下的电容值进行测量,耽误考试时间。从后续题目看,图13中无需绘制准确直线。

D部分,在完成A与C部分题目时可以观察到两个电容充电至8.936 V后下降到-9 V的测量刚开始,电容的电压就快速下降,只能测量6 V或7 V之内的电容。要按题目要求在电压接近9 V时估计这些误差,只有将电容充电至8.936 V后,空置IN端才能实现。在将电容充电至8.936 V后在未进行任何线路连接时,电容的电压就不断下降,说明存在漏电现象。提示避免导热棉吸水引起的漏电,这部分的实验策略是需要取下绝热棉。如果测量结果显著依赖于时间,则介质极化为漏电主因。

按答题卡要求整理测试方案。

初始设置:

开关S1位置	IN 端口连接
C1/C2	9 V

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/C2	9V	小于2s	
2	C1/C2	Free		$ duC(t) /dt$
3	C1/C2	9V	5s	
4	C1/C2	Free		$ duC(t) /dt$

除去绝热棉后,对C1与C2分别进行上述实验方案,结果见图14。曲线初始的短直线段为步骤1对应的数据,随后的斜线为步骤2对应的数据;较长的直线段为步骤3对应的数据,随后的斜线为步骤

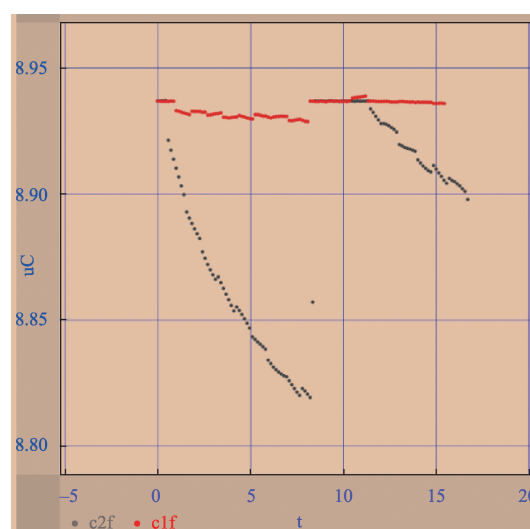


图14 无绝热棉、充电小于2秒和5秒空置IN端电压变化(C1红色,C2黑色)

4对应的数据。对C1充电5秒的 $uC(t)$ 斜率与充电小于2秒的斜率区别不显著。说明介质极化对C1的影响测量不到。但观测到存在漏电现象,所以C1测量误差主要来源为漏电流。比较C2充电5秒的 $uC(t)$ 斜率与充电小于2秒的斜率,会发现二者显著不同。这说明介质极化对C2的影响很显著。这里对小量的测量,实验误差较大,影响了结果的数值准确性,所以只做显著性判断。

评分标准:C1的测量误差主要来源为漏电流,0.2分,说明判断依据0.5分,实验方案表格填写正确0.3分。C2的测量误差主要来源为介质极化,0.2分,说明判断依据,指明斜率差异显著0.5(只说明斜率差异仅得0.3分),实验方案表格填写正确0.3分。

D部分考察学生对电容漏电的理解。操作时对小量的测量探索需要消耗一定的时间。可能需要尝试若干种方案来找到符合题目要求并结论明显的测试结果。在这个过程中学生可能会观察测量到各种微小变化量,并对它们的产生原因进行分析、估计与解释。比如学生可能将设备中任何一端空置,观测到电容电压下降或上升;或者尝试在某些操作后将电容接地,分析其对测量的影响。最后整理出与题目要求相关的观察结果,进行符合逻辑的判断从而对误差影响的主次因素做出正确判断。这部分是对学生实验能力高要求的考察,也是探索未知的必要途径。