

# 不良导体热导率的测量

## 一、实验简介

导热系数(又叫热导率)是反映材料热性能的重要物理量。热传导是热交换的三种(热传导、对流和辐射)基本形式之一,是工程热物理、材料科学、固体物理及能源、环保等各个研究领域的课题。材料的导热机理在很大程度上取决于它的微观结构,热量的传递依靠原子、分子围绕平衡位置的振动以及自由电子的迁移。在金属中电子流起支配作用,在绝缘体和大部分半导体中则以晶格振动起主导作用。因此,某种材料的导热系数不仅与构成材料的物质种类密切相关,而且还与材料的微观结构、温度、压力及杂质含量相联系。在科学实验和工程设计中,所用材料的导热系数都需要用实验的方法精确测定。测固体材料热导率的实验方法一般分为稳态法和非稳态法两类。

本实验的目的是了解热传导现象的物理过程,学习用稳态平板法测量不良导体的导热系数并用作图法求冷却速率。

## 二、实验原理

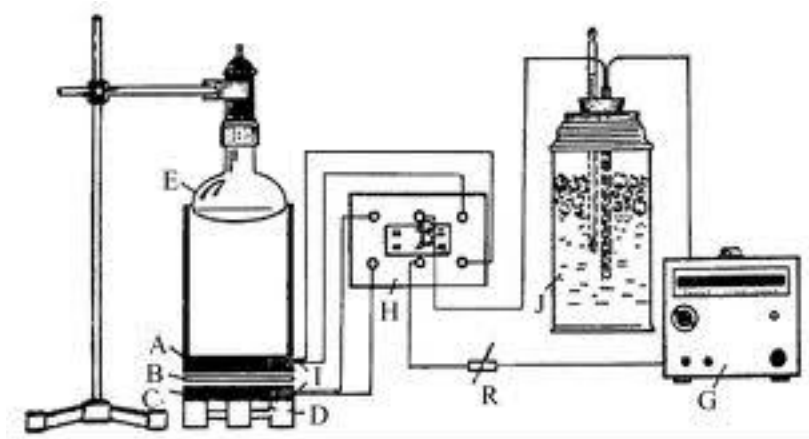


图 1 不良导体热导率测定装置原理图

### 1. 导热系数

1882 年法国科学家傅里叶(J.Fourier)建立了热传导理论,目前各种测量导热系数的方法都是建立在傅里叶热传导定律的基础之上的。本实验采用的是稳态平板法测量不良导体的导热系数。

当物体内部有温度梯度存在时,就有热量从高温处传递到低温处,这种现象被称为热传导。傅里叶指出,在  $dt$  时间内通过  $dS$  面积的热量  $dQ$ , 正比于物体内部的温度梯度,其比例系数是导热系数,即:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} \cdot dS \quad (1)$$

式中  $\frac{dQ}{dt}$  为传热速率,  $\frac{dT}{dx}$  是与面积  $dS$  相垂直的方向上的温度梯度,“-”号表示热量由高温区向低温区域,  $\lambda$  是导热系数,表示物体导热能力的大小。在 SI 中  $\lambda$  的

单位是 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。对于各向异性材料，各个方向的导热系数是不同的(常用张量来表示)。

## 2. 不良导体导热系数的测量

图 1 是不良导体导热系数测量装置的原理图。设样品为一平板，则维持上下平面有稳定的 $T_1$ 和 $T_2$ (侧面近似绝热)，即稳态时通过样品的传热速率为：

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{h_B} S_B \quad (2)$$

式中 $h_B$ 为样品厚度， $S_B = \pi * R_B^2$ 为样品上表面的面积， $(T_1 - T_2)$ 为上、下平面的温度差， $\lambda$  为导热系数。

在实验中，要降低侧面散热的影响，就需要减小 $h$ 。因为待测平板上下平面的温度 $T_1$ 和 $T_2$ 是用传热圆筒 A 的底部和散热铜盘 C 的温度来代表，所以就必须保证样品与圆筒 A 的底部和铜盘 C 的上表面密切接触。

实验时，在稳定导热的条件下( $T_1$ 和 $T_2$ 值恒定不变)，可以认为通过待测样品盘 B 的传热速率与铜盘 C 向周围环境散热的速率相等。因此可以通过 C 盘在稳定温度 $T_2$ 附近的散热速率 $\frac{dT}{dt}$ ，求出样品的传热速率 $\frac{dQ_{\text{传}}}{dt}$ 。

在读取稳态时的 $T_1$ 和 $T_2$ 之后，拿走样品 B，让 C 盘直接与传热筒 A 底部的下表面接触，加热铜盘 C，使 C 盘温度上升到比 $T_2$ 高 $10^\circ\text{C}$ 左右，再移去传热筒 A，让铜盘 C 通过外表面直接向环境散热(自然冷却)，每隔一段时间记下相应的温度值，求出 C 盘在 $T_2$ 附近的冷却速率 $\frac{dT}{dt}$ 。

对于铜盘 C，在稳态传热时，其散热的外表面积为 $\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C$ ，移去传热筒 A 后，C 盘的散热外表面积为 $2\pi R_C^2 + 2\pi R_C h_C = 2\pi R_C(R_C + h_C)$ ，考虑到物体的散热速率与它的散热面积成比例，所以有：

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\pi R_C(R_C + 2h_C)}{2\pi R_C(R_C + h_C)} \cdot \frac{dQ_{\text{传}}}{dt} = \frac{R_C + 2h_C}{2R_C + 2h_C} \cdot \frac{dQ_{\text{传}}}{dt} \quad (3)$$

式中 $R_C$ 和 $h_C$ 分别为 C 盘的半径和高度。

根据热容的定义，对温度均匀的物体，有：

$$\frac{dQ_{\text{传}}}{dt} = mc \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

对应铜盘 C，就有：

$$\frac{dQ_{\text{传}}}{dt} = m_{\text{铜}} c_{\text{铜}} \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

其中 $m_{\text{铜}}$ 和 $c_{\text{铜}}$ 分别是 C 盘的质量和比热容，将此式代入式(3)中，有：

$$\frac{dQ}{dt} = m_{\text{铜}} c_{\text{铜}} \frac{R_C + 2h_C}{2R_C + 2h_C} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

比较式(6)和(2)，便得出导热系数的公式：

$$\lambda = m_{\text{铜}} c_{\text{铜}} h_B \frac{R_C + 2h_C}{2\pi R_B^2(T_1 - T_2)(R_C + h_C)} \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

---

$m_{\text{铜}}$ 、 $h_B$ 、 $R_B$ 、 $h_C$ 、 $R_C$ 、 $T_1$  和  $T_2$  都可由实验测量出准确值，本实验所用黄铜盘比热容为  $0.3709\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，因此，只要求出  $\frac{dT}{dt}$ ，就可以求出导热系数  $\lambda$ 。

### 三、实验内容

本实验的主要内容为测量橡胶盘的导热系数。

1. 观察和认识传热现象、过程及其规律。

(1) 用游标卡尺测量铜盘和橡胶盘的直径及厚度，多次测量，并求出平均值。

(2) 熟悉各仪表的使用方法，按图1连接好仪器。

(3) 接通自耦调压器电源，缓慢转动调压旋钮，使红外灯电压逐渐升高，为缩短达到稳态的时间，可先将红外灯电压升到200V左右，大约5min之后，再降到110V左右，然后每隔一段时间读一次温度值，若10min内 $T_1$ 和 $T_2$ 的示值基本不变，则可以认为达到稳定状态。记下稳态时的 $T_1$ 和 $T_2$ 值。随后移去橡胶盘B，让散热C盘与传热筒A的底部直接接触，加热C盘，使C盘的温度比 $T_2$ 高约 $10^\circ\text{C}$ 左右，把调压器调节到零电压，断开电源，移去传热筒A，让C盘自然冷却，每隔30s记一次温度T值，选择最接近 $T_2$ 前后的各6个数据，填入表格中。

2. 用逐差法求出铜盘C的冷却速率 $\frac{dT}{dt}$ ，并由公式(6)求出样品的导热系数 $\lambda$ 。

3. 绘出T-t关系图，用作图法求出冷却速率 $\frac{dT}{dt}$ 。

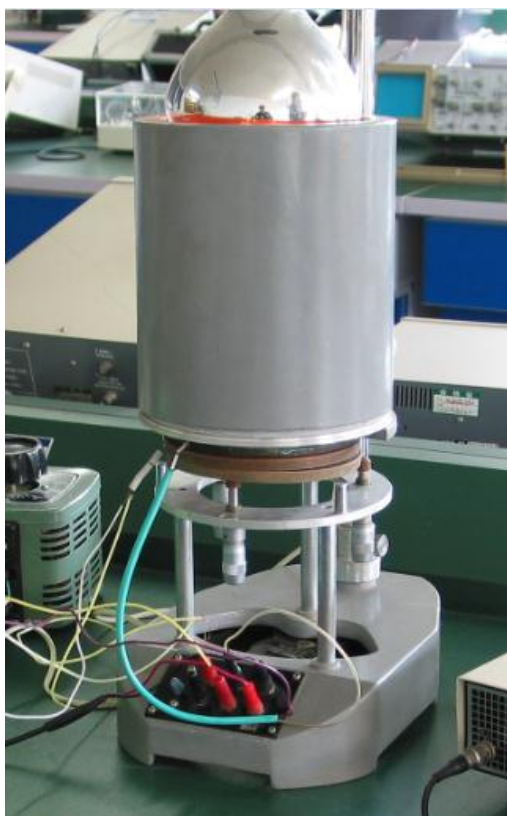
4. 用方程回归法进行线性拟合，求解冷却速率 $\frac{dT}{dt}$ 及其误差，将结果代入公式中，计算橡胶盘的导热系数 $\lambda$ 。

### 四、实验仪器

不良导体热导率的测量实验的主要仪器有：主仪器，自耦调压器，数字电压表，杜瓦瓶，游标卡尺，电子秒表。

**主仪器：**

实际照片和程序中的显示：



实际仪器



仿真仪器

操作提示：

拖动桌面上的橡胶盘可拖至主仪器的支架上。点击红外灯可调节红外灯的高度，在调节前应移除红外灯上的连线。点击保温筒可调节保温筒的位置，在调节

---

前应将红外灯移至最大位置，并且同时移除加热铜盘上的连线。点击双刀双掷开关，可改变开关的位置

### 自耦调压器:

实际照片和程序中的显示:



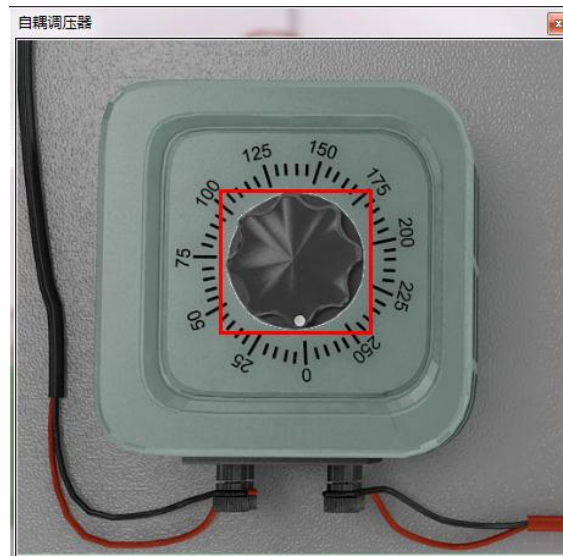
实际仪器



仿真仪器

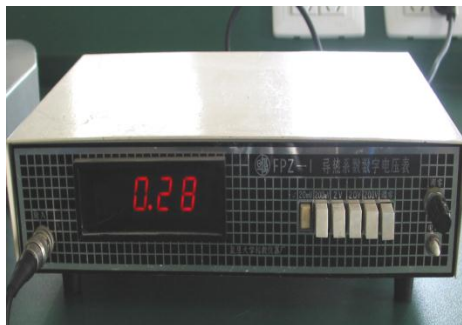
操作提示:

鼠标左键或右键点击调压旋钮，调节输出电压。



### 数字电压表:

实际照片和程序中的显示:



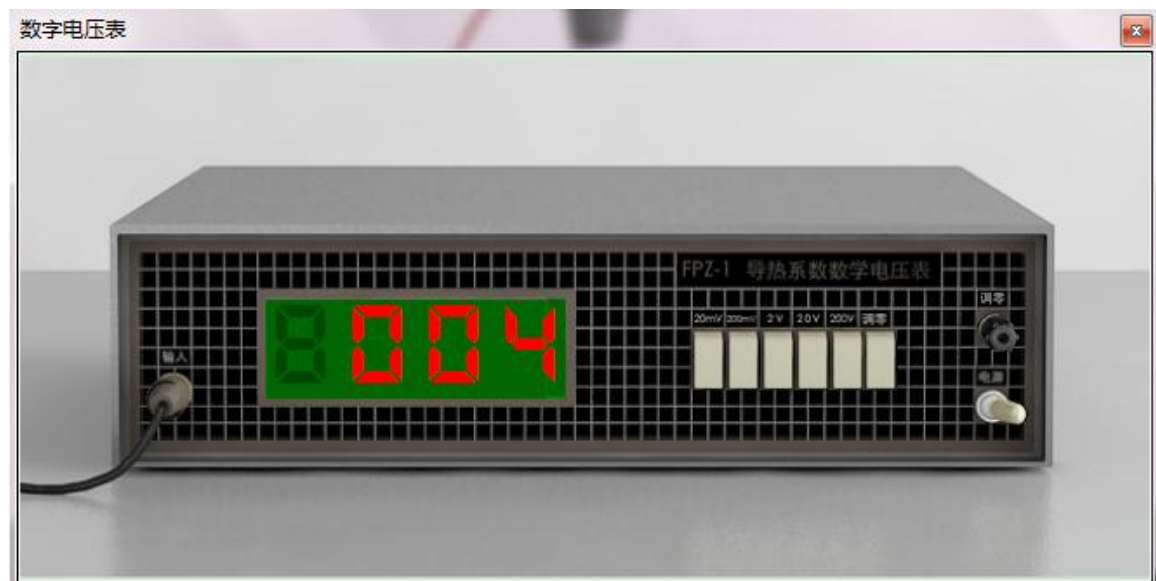
实际仪器



仿真仪器

### 操作提示:

点击电源开关可打开或关闭数字电压表。点击大视图中的相关按钮,可进行相应的设置及调节(按下调零按钮,可点击调零旋钮对其进行调零;调零后即可选择合适的档位进行测量)

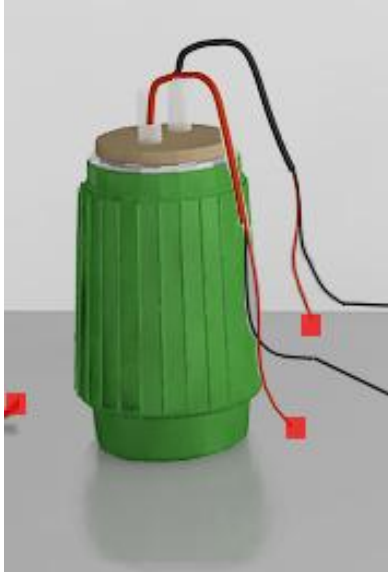


杜瓦瓶:

实际照片和程序中的显示:



实际仪器



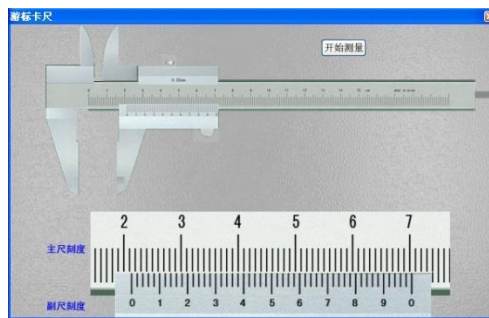
仿真仪器

### 游标卡尺:

实际照片和程序中的显示:



实物照片



仿真仪器

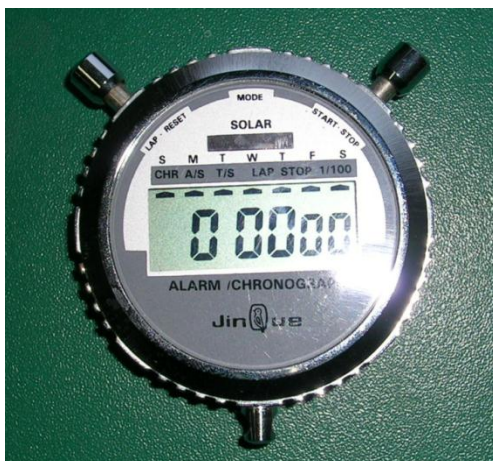
操作提示:

可以拖动副尺部分，改变测量卡口张开的大小。用鼠标左键或者右键点击锁定旋钮，来锁住或者解锁副尺

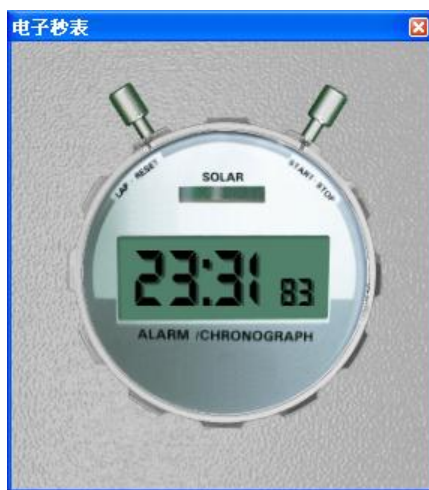
### 电子秒表:

实际照片和程序中的显示





实物照片



仿真仪器

操作提示：

鼠标点击开始暂停按钮可以开始或者暂停计时，鼠标点击复位按钮可以对秒表复位。

## 五、实验指导

### 实验重点及难点

实验重点：

1. 观察和认识传热现象和过程，理解傅里叶导热定律
2. 学习用平板稳态法测量不良导体（橡胶盘）的导热系数。

实验难点：

1. 测量加热时，加热桶、铜盘、橡胶盘的平衡温度。
2. 加热过程中系统升、降温速度的控制。
3. 铜盘散热速率的求解。

### 辅助功能介绍

界面的右上角的功能显示框：当在普通做实验状态下，显示实验实际用时、记录数据按钮、结束实验按钮、注意事项按钮；在考试状态下，显示考试所剩时

间的倒计时、记录数据按钮、结束考试按钮、显示试卷按钮（考试状态下显示）、注意事项按钮。

右上角工具箱：各种使用工具，如计算器等。

右上角 help 和关闭按钮：help 可以打开帮助文件，关闭按钮功能就是关闭实验。

实验仪器栏：存放实验所需的仪器，可以点击其中的仪器拖放至桌面，鼠标触及到仪器，实验仪器栏会显示仪器的相关信息；仪器使用完后，则不允许拖动仪器栏中的仪器了。

提示信息栏：显示实验过程中的仪器信息，实验内容信息，仪器功能按钮信息等相关信息，按 F1 键可以获得更多帮助信息。

实验状态辅助栏：显示实验名称和实验内容信息(多个实验内容依次列出)，当前实验内容显示为红色，其他实验内容为蓝色；可以通过单击实验内容进行实验内容之间的切换。切换至新的实验内容后，实验桌上的仪器会重新按照当前实验内容进行初始化。

## 实验操作方法

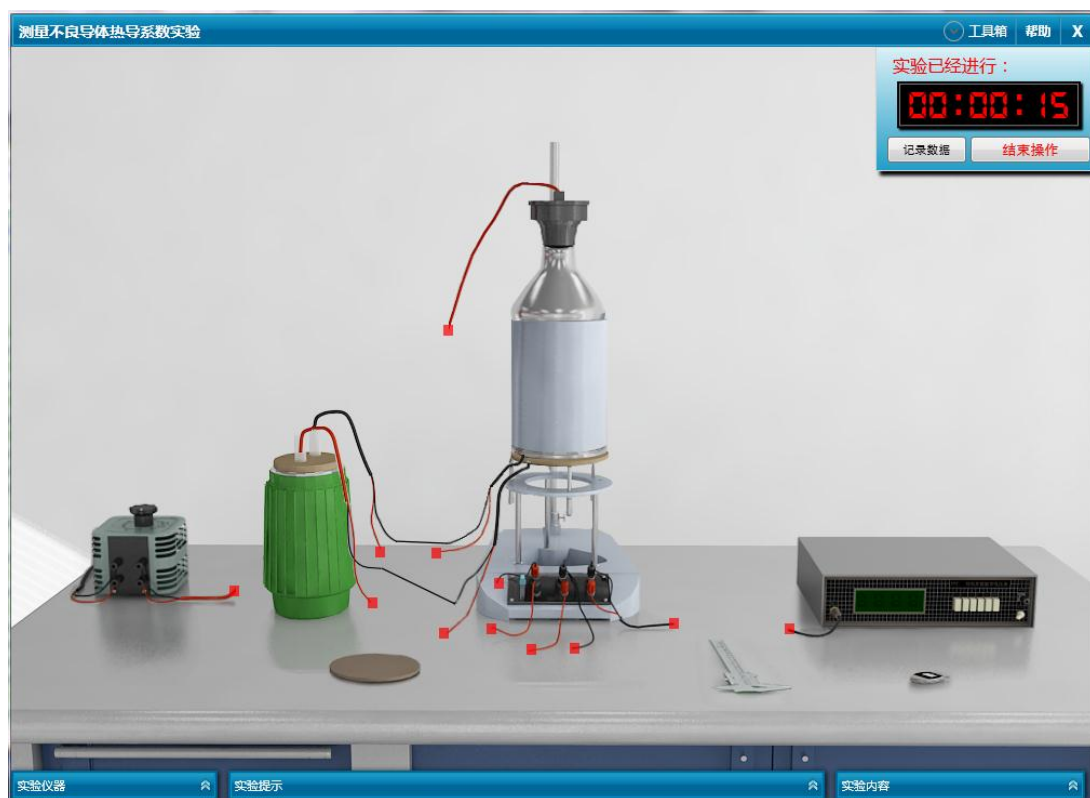
### 1. 主窗口介绍

成功进入实验场景窗体，实验场景的主窗体如下图组所示：



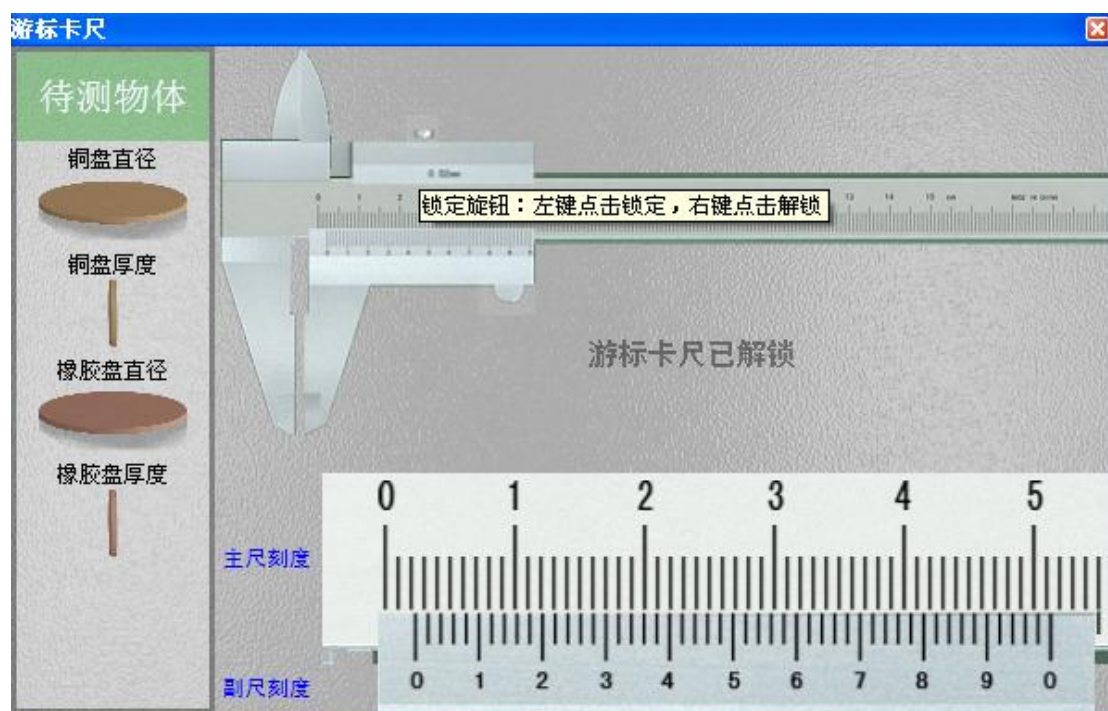
### 2. 正式开始实验：

(1) 开始实验后，从实验仪器栏将橡胶盘、电子秒表和游标卡尺拖至实验台上。



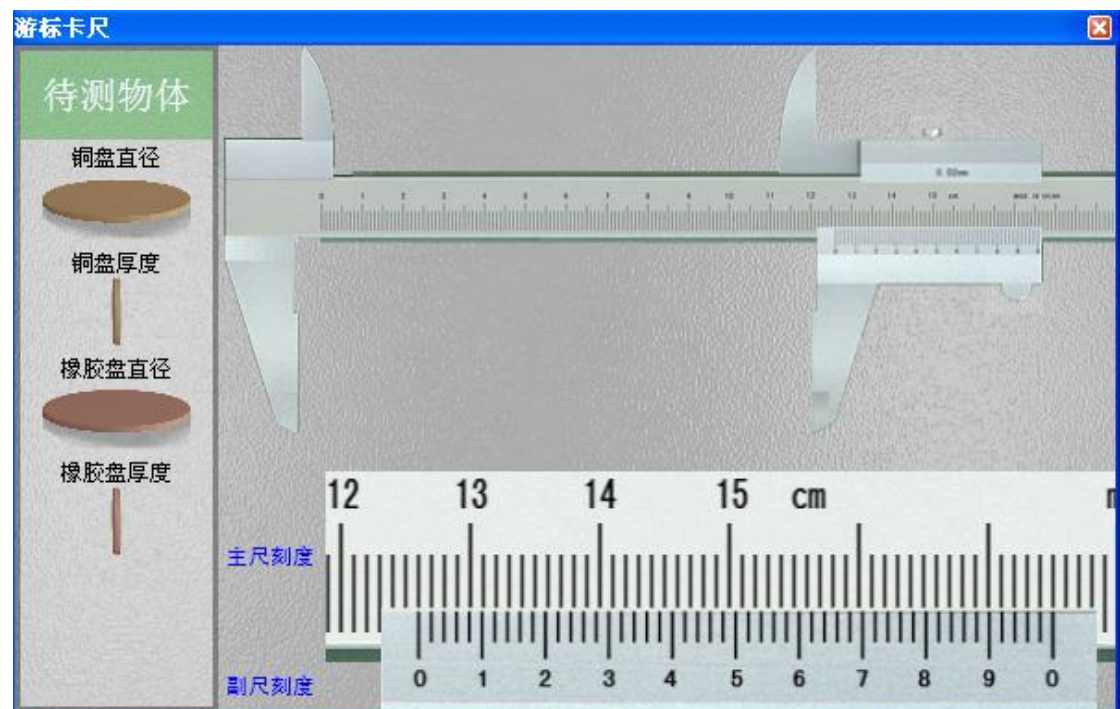
(2) 测量铜盘、橡胶盘的直径及厚度并记录到实验表格中。

右击锁定按钮，将游标卡尺解锁：

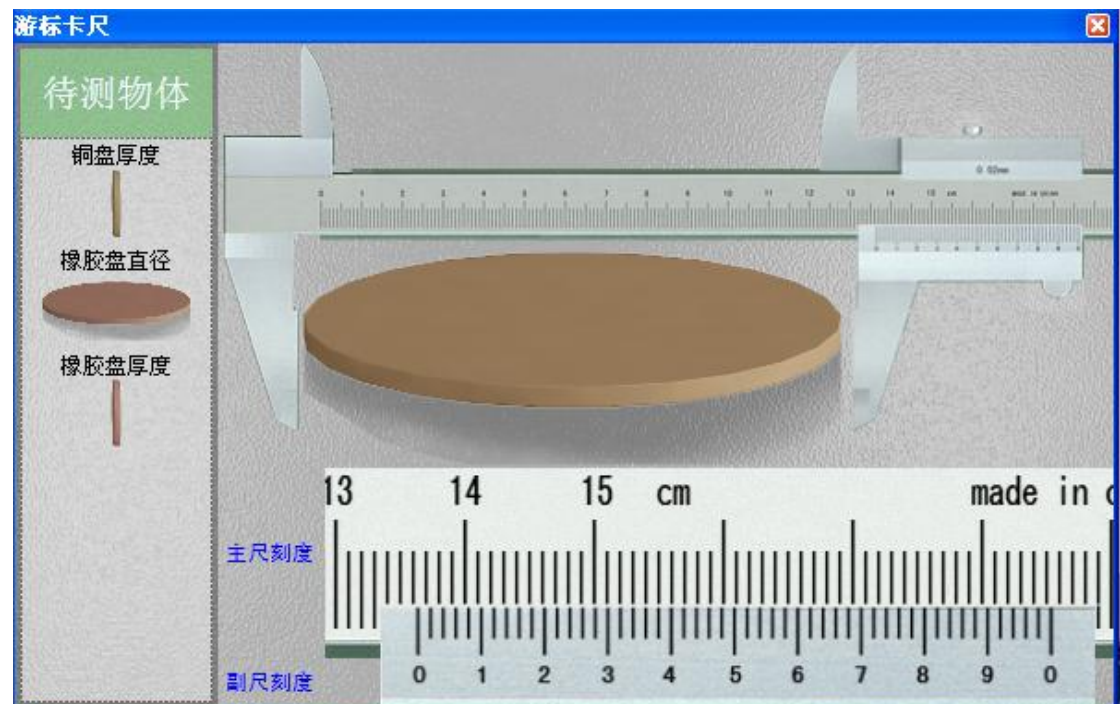


拖动下爪一段距离：

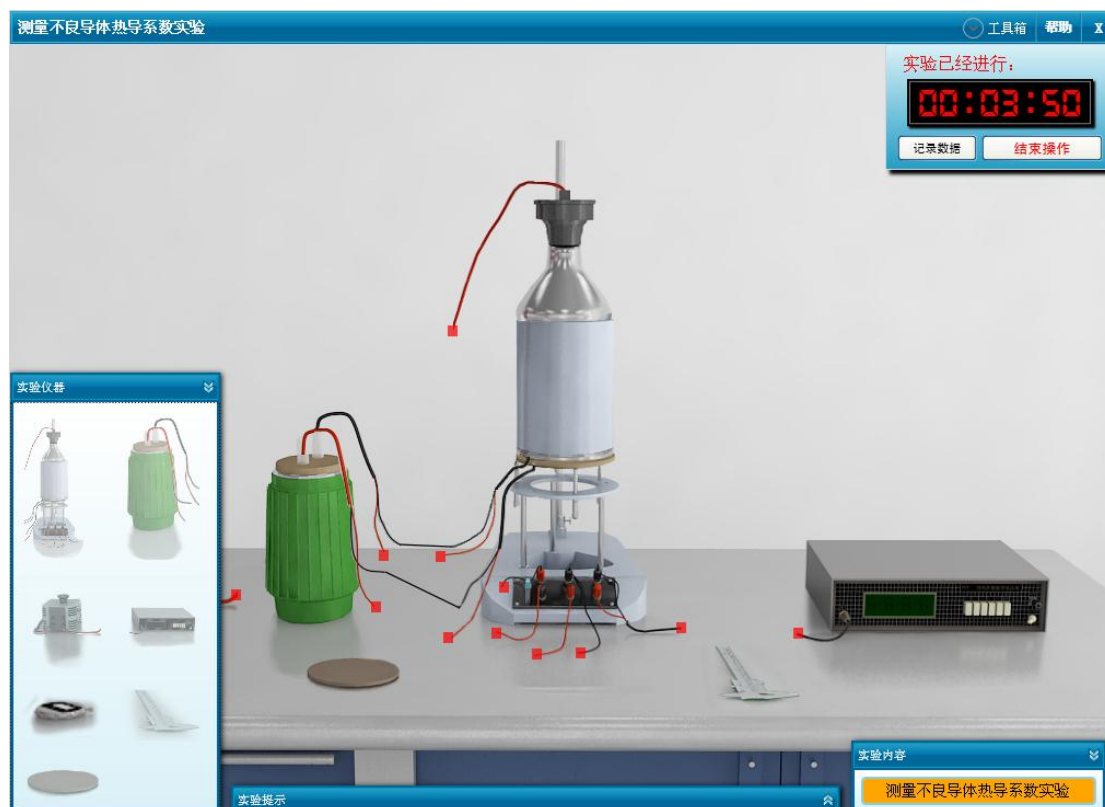




将待测物体从待测物栏中到两爪之间，松下鼠标，待测物会放在合适的位置：



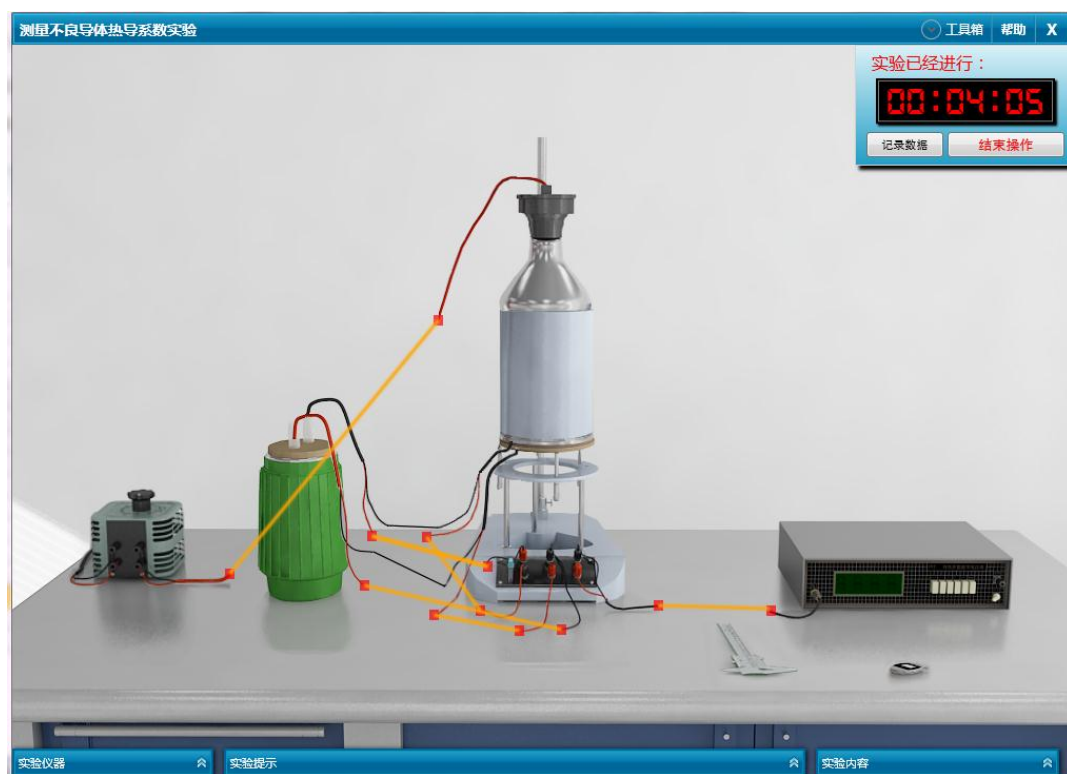
- (3) 将橡胶盘拖至主仪器的支架上。
- 1) 先将橡胶盘从实验仪器栏中拖放到实验桌上：



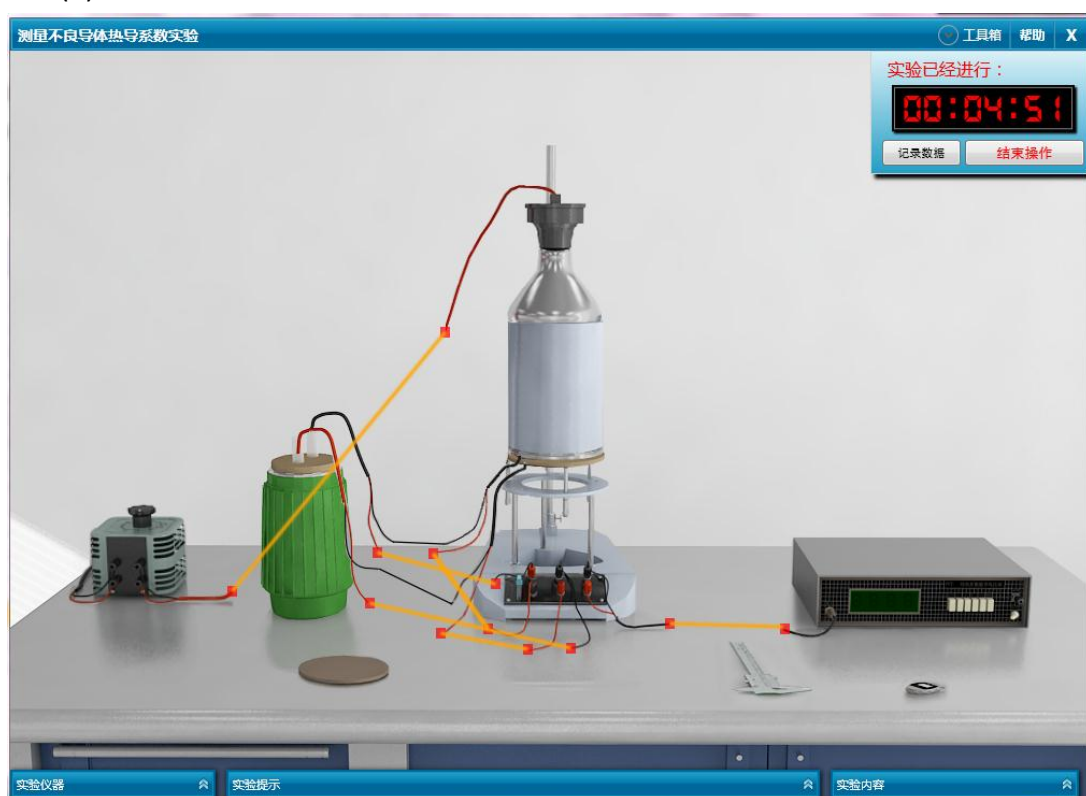
2) 双击打开主仪器窗体，依次移开红外灯、保温桶，再将橡胶盘拖放到散热铜盘上：



(4) 连接好线路，调节自耦调压器，开始加热。

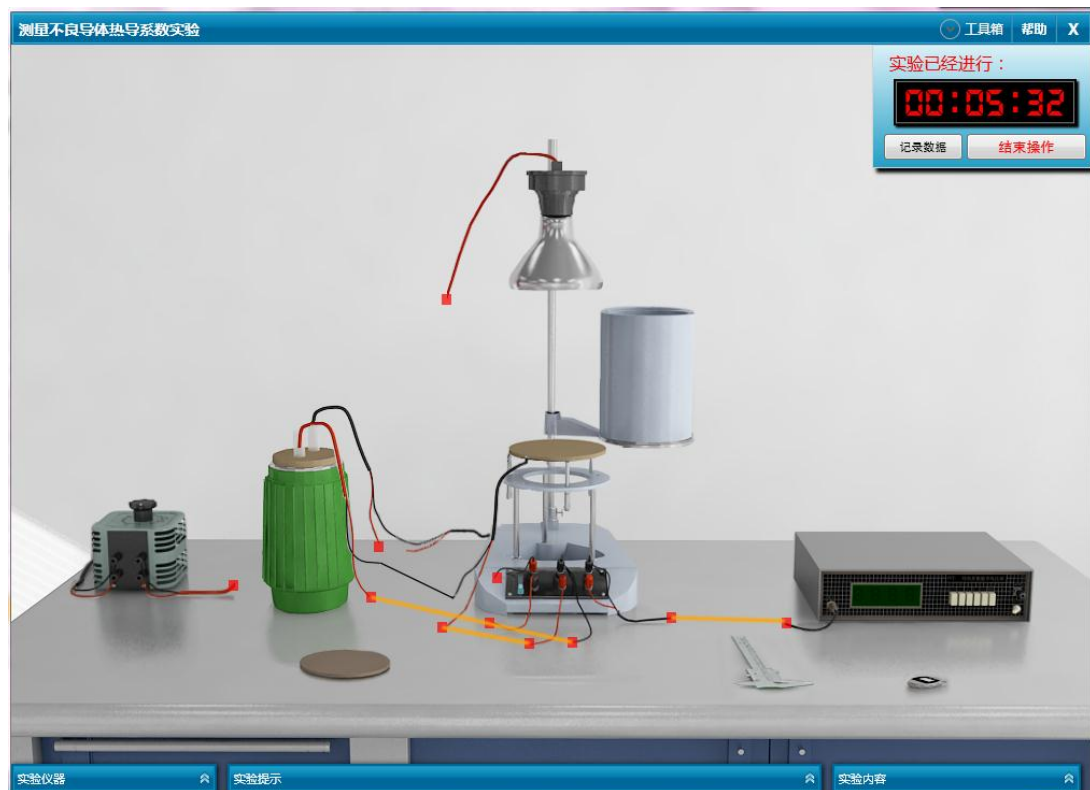


(5) 移走橡胶盘，加热铜盘 A、C。



(6) 移走上铜盘，让下铜盘独立散热。





(7) 记录数据。

实验数据表格

**A铜盘加热到平衡温度时的温差电动势**  
测量A铜盘加热到平衡温度时的温差电动势的绝对值(mv) \_\_\_\_\_

**C铜盘加热到平衡温度时的温差电动势**  
测量C铜盘加热到平衡温度时的温差电动势的绝对值(mv) \_\_\_\_\_

加热C盘，使C盘的温度比T2高约10℃左右(即温差电动势升高0.42mv左右)让C盘自然冷却，测量C铜盘降温过程中不同时刻温度对应的温差电动势：  
测量C盘降温过程中不同时刻温度对应的温差电动势(每隔30s记录一次)，并记录到下表中

测量次数	1	2	3	4	5	6
电压(mv)						

增加列 减少列

**散热盘散热速率**  
散热盘散热速率测定(mv/s) \_\_\_\_\_

**橡胶盘的导热系数。其中铜盘的质量为800g，橡胶盘的质量为200g，铜的比热容为370.8J/(Kg\*℃)**  
计算橡胶盘的导热系数 $\lambda$ (W/(m\*℃)) \_\_\_\_\_

关闭

(8) 根据记录及已知数据求解橡胶盘的热导系数并填写到表格中。

---

## 六、思考题

1. 试分析实验中产生误差的主要因素以及实验中是如何减小误差的？
2. 傅里叶定律 $dQ/dt$  (传热速率)是不易测准的量。本实验如何巧妙地避开了这一难题？

## 七、参考资料

1. 谢行恕，霍剑青，康士秀主编.《大学物理实验》第二册.高等教育出版社.2001.