

电热法测量焦耳热功当量实验

【引言】

电热法测量焦耳热功当量实验是证明能量守恒和转换定律的基础实验，焦耳从 1840 年起，花费了几十年的时间做了大量实验，论证了传热和做功一样，是能量传递的一种形式:热功当量是一个普适常数，与做功方式无关，从而为能量守恒和转换定律的确立奠定了坚实的实验基础。

【实验目的】

- 1、熟悉热学实验中的基本问题--量热和计温:
- 2、研究电热法中做功与传热的关系;
- 3、学习使用一元线性回归法进行散热修正:
- 4、了解热学实验中合理安排实验和选择参量的重要性:
- 5、熟悉热学实验中基本仪器的使用。

【实验原理】

1、电热法测量焦耳热功当量实验原理

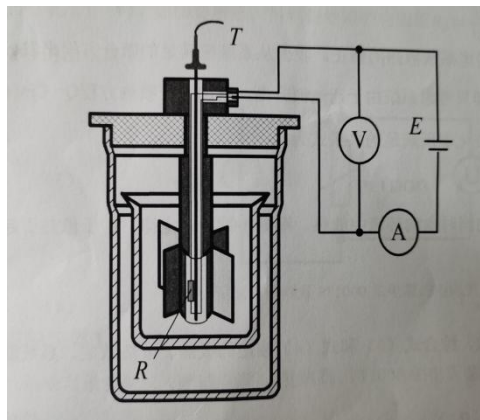


图 1. 电热法测量焦耳热功当量原理图

如图 1 所示，给电阻 R 两端加上电压 V ，通过 R 的电流为 I ，通电时间 t 内电场力做功 $W=VIt$ 。若这些功全部转化为热量，使一个盛水的量热器系统由初温 θ_0 升高至 θ (单位 K)，系统吸收的热量为 Q ，则热功当量 $J=W/Q$ 。按照能量守恒定

律，若采用国际单位制，则 W 和 Q 的单位都是焦耳 (J)，比值 $J=1$ ；若 Q 用卡 (cal) 作单位，则 $J=4.1868\text{J/cal}$ ，表示产生 1 卡热量所需作的功。

单位都是焦耳(J)，比值 $J=1$ ：若 Q 用卡(cal)作单位，则 $J=4.1868\text{J/cal}$ ，表示产生 1 卡热量所需作的功。

实验在装水的量热筒中进行，系统吸收的热量为：

$$Q = (c_0 m_0 + c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - \theta_0) = Cm(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

式中， c_0 、 c_1 、 c_2 分别是水、量热筒及加热器的比热容； m_0 、 m_1 、 m_2 分别是其相对应的质量； $Cm = c_0 m_0 + c_1 m_1 + c_2 m_2$ 是系统的总热容； θ_0 为系统初温。本实验的主要内容就是测定热功当量：

$$J = \frac{VI t}{Cm(\theta - \theta_0)} \quad (2)$$

已知参数如下：

水的比热容为 $c_0 = 4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ；

量热筒材料为铜，比热容 $c_1 = 0.389 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ；

加热器由功率电阻和铝搅拌器组成，两者的总热容可按 $c_2 m_2 = 64.35 \text{ J/K}$ 计算；忽略温度计的热容 δm 。

2、散热修正

本实验的难点是如何考虑系统散热的修正。我们从系统应满足的微分方程出发。若把系统看成是理想绝热的，即只考虑系统由于通电而升温，则由系统吸热方程 $Q = Cm(\theta - \theta_0)$ 对时间求导可以得到温度变化率所满足的关系式为：

$$\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{\text{放}} = \frac{VI}{JCm} \quad (3)$$

考虑通电时系统吸热的同时也向环境中放热，根据牛顿冷却定律，由于放热引起的温度变化率为：

$$\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{\text{放}} = -K (\theta - \theta_{\text{环}}) \quad (4)$$

式中，K 为系统的散热系数。综合式(3)和式(4)描述的吸热、放热效应，系统温度的实际变化率为：

$$\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{\text{放}} = \frac{VI}{JCm} - K(\theta - \theta_{\text{环}}) \quad (5)$$

这是一个一阶线性常系数微分方程，我们试图利用一元线性回归法处理数据，令 $y = \frac{d\theta}{dt}$ ， $x = \theta - \theta_{\text{环}}$ 式(5)变成 $y = a + bx$ ，其中 $a = \frac{VI}{JCm}$ ， $b = -k$ 。给加热系统通电，并同时记录系统温度——时间的变化关系，每隔 1min 记录一次温度，共测 30 个连续时间对应的温度值，即 $(t_1, \theta_1), (t_2, \theta_2), \dots, (t_{30}, \theta_{30})$ ，这样由一系列 (t_i, θ_i) 就换算出 (y_i, x_i) 数据了，代入回归系数计算式求得 a，从而由下式计算出热功当量 J，即：

$$a = \frac{VI}{JCm} \rightarrow J = \frac{VI}{aCm} \quad (6)$$

3、铂电阻温度计

本实验采用 PT1000 铂电阻温度计测量温度(见图 1 中 T)，铂电阻温度计是利用铂丝电阻随温度的变化来测量温度的，铂具有正的电阻温度系数，PT1000 铂电阻在 0.00℃时电阻为 $R_0=1000.00\Omega$ ，铂电阻 R_t与温度 t(0-650℃范围)的关系如下：

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7)$$

式(7)中：

R_t 是温度为 t℃时铂电阻的电阻值，单位Ω；

R_0 是温度为 0℃时铂电阻的电阻值，单位Ω；

A，B 为分度常数： $A=0.0039083/^\circ\text{C}$ ， $B=-0.0000005775/^\circ\text{C}^2$ ；

实验测温时，可采用 1mA 标准恒流输出接在铂电阻温度计两端，通过测量铂电阻温度计上的电压 U(V)，如图 2 所示，得到铂电阻的电阻值

$$R_t = \frac{U(V)}{1(mA)} = 1000U\Omega$$

，通过查表得到对应的温度值 t 。

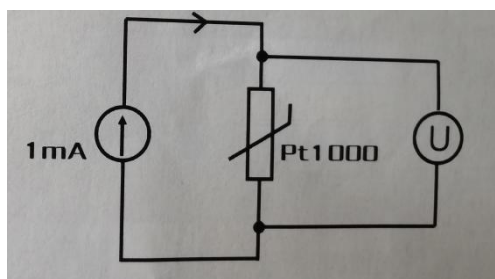


图 2.恒流源法测量 PT1000 铂电阻的电阻值

【实验仪器】

热功当量实验仪(测试电源)、量热器、PT1000 铂电阻温度计、电子天平(用户自备)、量杯等。

(1) 热功当量实验仪测试电源使用说明

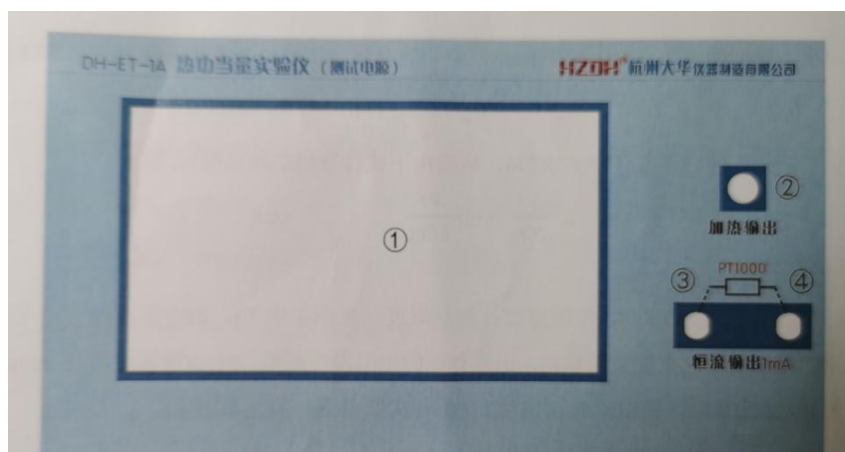


图 3 测试电源面板图

- ① 7 英寸彩色触摸液晶屏；
- ② 加热输出：与量热器相连，给加热器内部功率电阻提供工作电压；
- ③ 恒流源输出正极；
- ④ 恒流源输出负极；

(2) 液晶屏首页显示说明



图 4 测试电源首页界面图

1. 加热棒——电压：电压显示范围 $0 \sim 20.00V$ ；
2. 加热棒——电流：电流显示范围 $0 \sim 550mA$ ；
3. 加热电压调节：调节加热电压大小，短按细调，长按粗调；
4. 加热控制：按下后按钮图标变红色，开启加热输出，此时有加热电流显示；
5. Pt1000-电压：测量范围 $0 \sim 1.9999V$ ；
6. Pt1000-电阻：根据测量的电压值和恒流源电流 $1mA$ 计算得到 Pt1000 电阻值。
7. 复位：系统复位,清除测量数据；
8. 启停：开始/停止计时，开始计时的同时开始记录数据和曲线。
9. 参数设置：进入参数设置界面；
10. 实验：进入实验测量界面，包括曲线显示和数据表格显示；
11. 计算：根据实验结果，通过一元线性回归法处理数据，计算热功当量；

(3) 参数设置界面说明

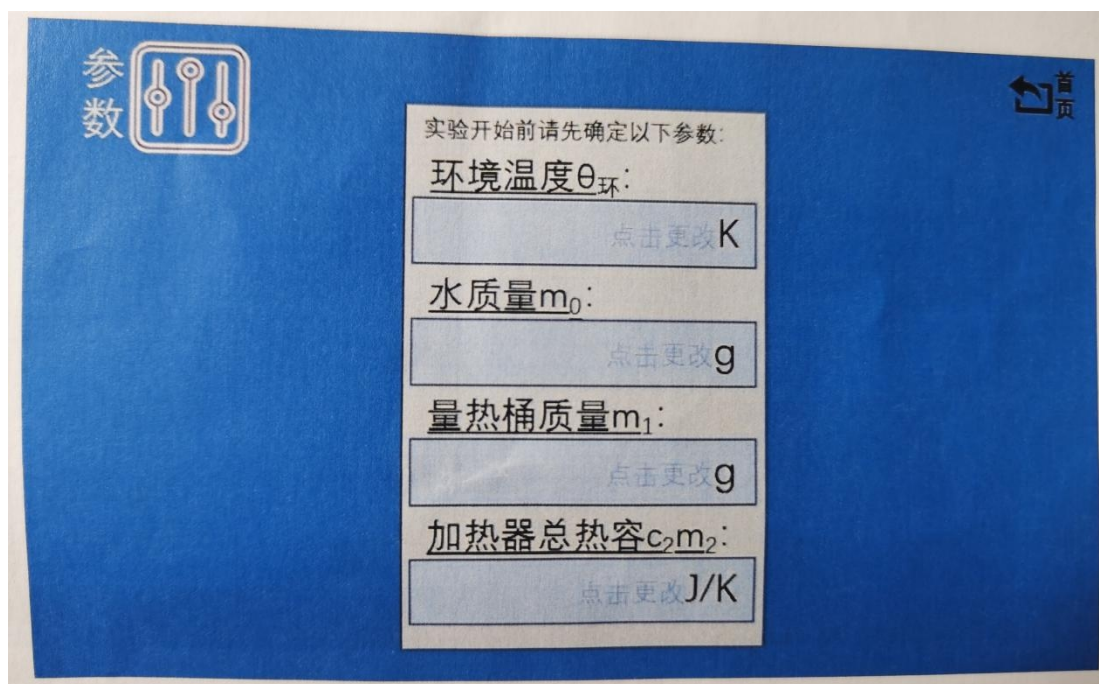


图 5 参数设置界面图

点击各个变量相对应的显示框，输入相应的数据，用于热功当量的计算。

(4) 实验界面说明

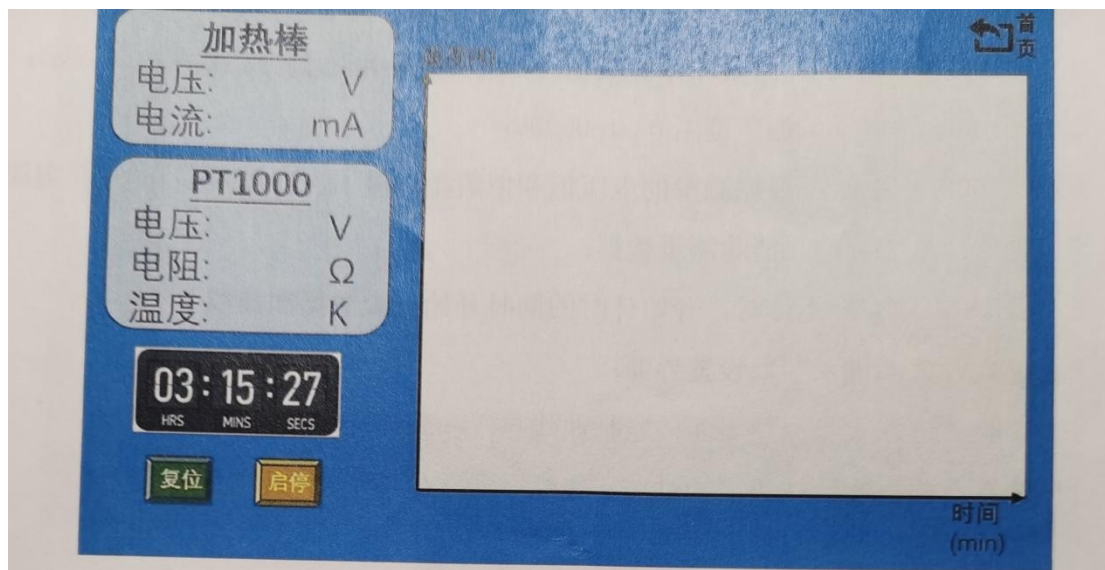


图 6 实验曲线界面图



图 7 实验数据界面图

1. 在曲线显示区和数据表格显示区的任意位置点击可以切换显示；
2. 曲线显示区的曲线根据实际数据实时动态调整，每分钟更新一次；
3. 数据表格显示区的数据可以根据实际需求将数据显示间隔设置为 1 分钟、2 分钟、3 分钟。

(5) 计算界面说明

热功当量计算

请在参数设置中更改：

环境温度 $\theta_{\text{环}}$ ：
K

水质量 m_0 ：
g

量热桶质量 m_1 ：
g

加热器总热容 c_2m_2 ：
J/K

$V_1 =$ V, $I_1 =$ mA
 $V_2 =$ V, $I_2 =$ mA

量热器总热容：
 $cm = c_0m_0 + c_1m_1 + c_2m_2$

采用一元线性回归法处理数据，
得到 $y = a + bx$ ；
 $a =$ $\times 10^{-3}$
 $b =$ $\times 10^{-4}$
代入公式 $J = \frac{VI}{acm}$ 得：

$J =$

图 8 热功当量计算界面图

进入此界面后，系统根据实验始末的电压电流值，和实验过程中记录的温度值，通过一元线性回归法计算出 a, b 。然后根据已经录入的环境温度、水质量、量热桶质量、加热器总热容计算出量热器总热容量 cm 。代入公式 $J = \frac{VI}{acm}$ ，自动计算出热功当量。

【实验内容】

1、实验准备

(1) 先称量干净的量热筒质量 m_1 ，再加水称量后得出水的质量 m_0 ：注意：水量约占量热筒容积的 $2/3$ 以上，确保加热器浸没在水中。

(2) 将 PT1000 的香蕉插头与恒流源输出 1mA 连接，并测定环境温度 $\theta_{\text{环}}$ ：将

测试电源上“加热输出”与量热器加热输入插座对应相连，调节加热电压值(10-18V 之间，电压越大加热越快)。

(3) 点击液晶显示屏中的“参数设置”，将以上各测量数据对应录入(如图 5 所示)。提示:加热器由功率电阻和铝搅拌器组成，两者的总热容可按 $c_2 m_2 = 64.35 J / K$ 计算;

2、测量时间——温度关系

点击“加热控制”按钮，开启加热;点击“启停”按钮开始计时且系统开始采集数据，点击“实验”进入图 6 的界面，再点击曲线图表的任意位置，可进入图 7 界面。实验结束再次点击“启停”按钮，停止采集数据。在连续升温的 30min 内，应等间隔地读取 31 个温度值(每分钟 1 次);建议先开启加热 1~2 分钟后再记录数据(加热过程中请连续搅拌)。

【注意事项】:

① 系统的初始应低于环境温度 5~10℃，末温高于环境温度 5~10℃，使系统接近环境温度，减小实验误差。

② 升温过程中必须不断搅拌(转动搅拌器叶片)以保证温度均匀。同时搅拌过程中要随时监视电源电压是否改变，防止因搅拌动作过大引起电源接触不良。

③ 用铂电阻温度计记录温度，即可测量 PT1000 上通过 1mA 电流时的电压

值 $U(V)$ ，根据欧姆定律可以得到对应的电阻值 $R_t = \frac{U(V)}{1(mA)} = 1000U\Omega$ ，查表得到对应摄氏温度值 t ，开尔文温度 $\theta = 273.15 + t(K)$ 。

3、测量加热器的电功率

分别在实验开始和实验结束时记录测试电源面板上显示的加热电压 V_1 、 V_2 和加热电流 I_1 、 I_2 ，加热功率 $P = VI$ 。