

# 热效应电流表设计及相关指标的研究\*

谢佳龙 齐云

(西南石油大学理学院 四川 成都 610500)

朱宇鹏

(西南石油大学机电工程学院 四川 成都 610500)

(收稿日期:2022-03-25)

**摘要:**分析了热效应电流表的测量原理,研究设计了一种利用电流热效应测量电流大小的实验装置,并通过以参考电流表所测电流为参考值,热效应电流表所测电流为实验值,根据两者相对误差确定热效应电流表准确度和精确度,通过实验原理及所用器材参数,确定了设计得到的热效应电流表的量程、分度值和准确度等级。

**关键词:**电流的热效应 电流测量 定标 指标参数 准确度 精密密度

在工程实践和科学研究中,所用电流表大多数是磁电式电流表、电磁式电流表和数显式电流表等,环境温度改变对上述电流表的电流测量存在影响,温度对电子设备的影响是广泛讨论的问题<sup>[1]</sup>,通常温度对电子测量设备的精度影响较大.本文以影响电流表精度的温度为自变量,利用热效应原理探讨测量电流的方法,研制利用热效应测量电流的实验装置,并对装置进行测试,分析该测量装置的准确度和精密密度。

## 1 电流测量原理

### 1.1 电流的热效应

焦耳定律是定量说明传导电流将电能转换为热能的定律,焦耳-楞次定律<sup>[2,4]</sup>表达式如下

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

式(1)中  $I$  的单位为安(A),  $R$  单位为欧( $\Omega$ ),  $t$  的单位为秒(s),  $Q$  的单位为焦耳(J)。

### 1.2 物质的比热容

比热容  $c$ , 简称比热, 表示物体吸热或散热能力. 单位质量的物体吸收或发出热量时, 它的温度也会因此而发生变化. 据此便可得出以下公式<sup>[2]</sup>

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (2)$$

其中,  $c$  的单位为焦耳每千克开尔文 [ $J/(kg \cdot K)$ ],  $Q$  的单位为焦耳(J),  $m$  的单位为千克(kg),  $\Delta T$  的单位为开尔文(K)。

### 1.3 电流测量原理

由式(1)、(2), 可得纯电阻的电流与比热容关系

$$I = \sqrt{\frac{cm \Delta T}{Rt}} \quad (3)$$

根据式(3)可知, 电流与温度、时间以及选用材料的质量、比热容、阻值等参量有关. 可以根据式(3)来确定电流值, 本文将根据此原理设计热效应电流表。

对一确定物质而言, 其质量  $m$  和比热容  $c$  为定值. 采用电阻随温度变化幅度弱的材料进行实验可认为电阻值近似不变。

因此可令常数  $K = \frac{Cm}{R}$ , 得到式(3)简化表达式

$$I = \sqrt{\frac{K \Delta T}{t}} \quad (4)$$

在下述实验中, 将首先对  $K$  进行定标, 进而通过一定时间内的材料温度变化量求得电流大小, 即可实现热效应电流表的功能。

\* 四川省大学生创新创业训练计划项目, 项目编号: S202110615132

作者简介: 谢佳龙(2002- ), 男, 在读本科生, 电子信息科学与技术专业。

指导教师: 齐云(1982- ), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事物理实验教学及科研。

## 2 实验器材及测量方法

电阻丝(镍铬合金丝,额定电流为 300 mA),温度传感器 PT1000,保温材料(离心玻璃棉,导热系数低,保温性能好),稳压直流电源,单片机温度采集模块,液晶屏显示和控制,万用表,电阻箱。

实验中还需考虑到电流热效应产生热量的去向,电流热效应产生热量部分用于导体升温,也必然存在热辐射,对环境的热传导所带来的能量损失,因此实验采用性能好的保温材料.镍铬电阻丝电阻率随温度变化较小。

本实验采取的主要测量方法:为减少热效应电流表使用时的数据输入量,由式(4)中的  $K$  通过实验进行定标; $t$  为单片机记录并显示时间; $\Delta T$  由温度传感器 PT1000 测量.由 PT1000 测量所得温度通过单片机获取温度信息后,即可在显示屏上显示测量所得温度。

## 3 定标及测试

### 3.1 定标基本原理

如图 1 所示,使用保温材料对电阻丝进行保温处理后将其与电流表、电源串联.将温度传感器紧贴电阻丝<sup>[6]</sup>,引脚引入单片机进行温度采集,并在显示屏显示,即构成定标测试电路。

由式(4)可得  $I^2 t = K \Delta T$ ,即

$$I^2 t \propto \Delta T$$

电流的平方  $I^2$  与时间  $t$  的积与温度变化量  $\Delta T$  成正比,根据最小二乘法即可求得  $K$ 。

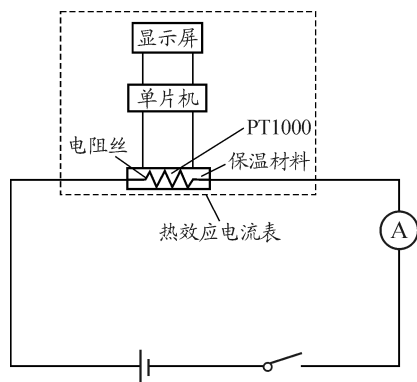


图 1 定标  $K$  值电路原理图

### 3.2 数据测量及处理

在  $U = 7.7 \text{ V}$ ,  $I = 46.3 \text{ mA}$  条件下,有如表 1 所

示时间、温度以及温度变化数据.根据表 1 数据作出  $I^2 t - \Delta T$  图像,如图 2 所示。

表 1 时间与温度变化数据表

$t/\text{s}$	$T/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
15	31.75	0
30	32.10	0.53
45	32.51	0.94
60	33.11	1.54
75	33.53	1.94
90	33.94	2.37
105	34.31	2.74

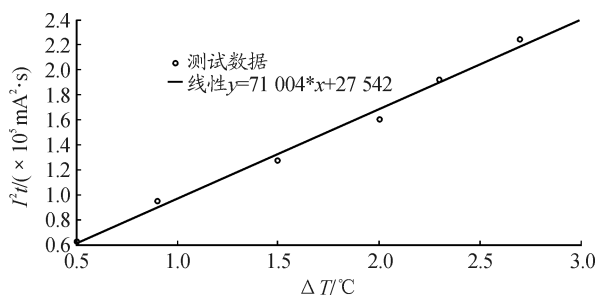


图 2 最小二乘法拟合曲线

通过最小二乘法定标得实验用电阻丝的  $K = 7.1004 \times 10^4 \text{ mA}^2 \cdot \text{s}/^\circ\text{C}$ 。

### 3.3 电流表准确度测试

采用如图 3 所示电路图对热效应电流表进行准确性测试.具体测试方案为:在原定标测试电路的基础上,增加电阻箱,以电流表所测电流为参考值,热效应电流表所测电流为实验值.根据两者相对误差大小确定热效应电流表准确度<sup>[5]</sup>。

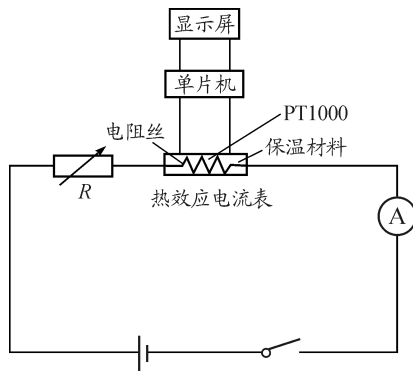


图 3 测试电路原理图

通过测试电路对热效应电流表进行测试,参考电流  $I$  由参考电流表测得,仪器电流  $I_1$  即热效应电流表测得,如表 2 所示实验数据及处理结果。

表2 测试数据及处理结果

参考电流 $I/\text{mA}$	仪器电流 $I_1/\text{mA}$	相对误差 $\%$
16.4	16.36	0.244
26.9	27.14	0.893
39.1	33.38	2.183
45.5	45.28	0.484
64.6	65.74	1.665
84.6	87.09	2.943
103.5	104.08	0.564
123.1	117.25	4.752
140.1	138.11	1.420
199.0	200.98	0.995
250.0	226.64	9.344
300.0	146.14	17.953

由实验测试结果分析可知,在测量的数据当中,对于 200 mA 以内的电流测量,参考电流表与热效应电流表的相对误差均小于 5%,结果表明热效应电流表准确度较高.当电流接近 250 mA 时误差增大,热效应电流表准确度降低.

对测量的数据分析得到 3 点基本结论:

- (1) 相对误差最大为 17.953%;
- (2) 相对误差的绝对值最小为 0.244%;
- (3) 相对误差不超过 10% 占比为 91.67%;

根据上述数据及分析可知,该电流表测量的电流误差较小、准确度较高.

### 3.4 电流表精密度测试

同样基于电路图 3,通过多次重复实验,对测定的实验数据(表 3),即热效应电流表所测电流数据进行分析,通过实验数据中热效应电流表所测电流,测定值彼此离散的程度,也即标准偏差确定热效应电流表的精密度<sup>[5]</sup>.

表3 多次重复测量数据

测量次数 $i$	$\frac{\Delta T}{t}/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	$I_1/\text{mA}$
1	0.022 37	39.85
2	0.026 98	43.77
3	0.028 38	44.89
4	0.025 45	42.51
5	0.020 09	46.22

续表 3

测量次数 $i$	$\frac{\Delta T}{t}/(\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	$I_1/\text{mA}$
6	0.026 72	43.56
7	0.026 80	43.62
8	0.027 49	44.18

根据表 3 中多次重复实验测量结果可得到:

- (1) 平均电流:  $\bar{I} = 43.58 \text{ mA}$ .
- (2) 标准偏差:  $\sigma = 1.85 \text{ mA}$ .
- (3) 相对标准偏差: 4.3%.

根据上述结果相对标准偏差

$$\frac{\sigma}{\bar{I}} = 4.3\% < 5\%$$

表明多次重复实验所得热效应电流表测量值间的离散程度较小,也即热效应电流表精密度较高.同时对于电流表这样的测量仪器而言,其基本参数包括量程、分度值、准确度等级<sup>[8]</sup>是需要确定的.

## 4 电流表指标参数的确定

### 4.1 量程的确定

通过实验原理及所用器材参数,确定了设计得到的热效应电流表的理论量程.

理论量程:忽略散热的情况下,量程下限是零;由于电阻丝的额定电流为 300 mA,量程上限为 300 mA.理论量程为 0 ~ 300 mA.

同时根据具体实验过程中所得测试数据,根据相对误差确定热效应电流表的实际量程.

实际量程下限:由于当  $Q_p \approx Q_{散}$  时,温度达到动态平衡,无法测量电流;经过实验验证,温度达到动态平衡时电流下限为 8 mA,因此我们设定量程下限为 10 mA.

实际量程上限:在测量的数据当中,200 mA 以内相对误差均小于 5%,以相对误差小于 5% 作为精准界限,因此量程上限为 200 mA.

因此,设定实际量程为 10 ~ 200 mA.

### 4.2 分度值的确定

分度值根据原理公式的有效数字运算法则决定,根据热效应电流表测量电流的理论式(4),其中各参量分度值取值如下.

- (1) 时间  $t$ : 0.01 s.
- (2) 温度变化量:  $\Delta T$ : 0.01 °C.

(3) 定标参数  $K = \frac{Cm}{R}$  :  $0.000\ 1\ \text{mA}^2 \cdot \text{s}/^\circ\text{C}$ .

将数据代入式(4)得热效应电流表分度值为

$$I = 0.01\ \text{mA}$$

故通过计算,热效应电流表的分度值为  $0.01\ \text{mA}$ .

### 4.3 准确度等级的确定

根据 JJG124-2005《电流表、电压表、功率表及电阻表检定规程》,仪表的准确度级别及最大允许误差应符合表4规定.

表4 仪表的准确度级别及最大允许误差

精确度等级	最大允许误差 / %
0.1	$\pm 0.1$
0.2	$\pm 0.2$
0.5	$\pm 0.5$
1.0	$\pm 1.0$
1.5	$\pm 1.5$
2.0	$\pm 2.0$
2.5	$\pm 2.5$
5.0	$\pm 5.0$
10	$\pm 10$
20	$\pm 20$

仪表的基本误差在标度尺测量范围内(有效范围)所有分度线上,不应超过表4规定的最大允许误差.在实际量程范围内,最大允许误差为5%.因此

根据表4将热效应电流表准确度等级设定为5级.

## 5 结束语

本文通过对热效应基本原理的分析,硬件设计,实验测试,实现了通过热效应原理测量电流大小的功能,并确定了热效应电流表的量程、分度值和准确度等级.通过对参数  $K$  的定标,可以完成不同温度下电阻的温度和电流同步测量,为相关实验提供了便利.但该热效应电流表存在着无法区分电流方向的问题.

## 参考文献

- 周雄兵. 温度试验对电子元器件的性能影响分析[J]. 信息通信, 2016(11): 257 ~ 258
- 吴芳明, 杨志越, 张永强, 等. 基于热效应的电流改装装置[J]. 科技创新与应用, 2021(28): 39 ~ 41, 44
- 叶艳萍. 探究电流热效应的创新实验[J]. 好家长, 2018(75): 78
- 李健. 电流的热效应[J]. 农村电工, 2017(25): 18 ~ 20
- 胡迪忠, 谭恺炎. 精度、精密度、精确度、准确度、正确度等释义与应用[J]. 大坝与安全, 2017(5): 15 ~ 17
- 周旭. 现代传感器技术[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2007: 44 ~ 52
- 郭秉柏. 《探究: 电流的热效应与哪些因素有关》实验方案及装置的改进[J]. 考试周刊, 2019(28): 160 ~ 162
- 涂亮亮. 运用热效应测电流大小的仪器设计[J]. 福建质量管理, 2020(6): 272

# Research on Design and Related Indexes of Thermal Effect Ammeter

Xie Jialong Qi Yun

(College of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500)

Zhu Yupeng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500)

**Abstract:** In this paper, the measuring principle of thermal effect ammeter is analyzed, and an experimental device for measuring the current by using the thermal effect of current is studied and designed. By taking the current measured by the reference ammeter as the reference value and the current measured by the thermal effect ammeter as the experimental value, the accuracy and accuracy of the thermal effect ammeter are determined according to the relative error between them. The measuring range of the designed thermal effect ammeter is determined through the experimental principle and equipment parameters, Division value and accuracy level.

**Key words:** thermal effect of current; current measurement; calibration; index parameter; accuracy; precision